

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů

Obor: Jaderné inženýrství



**Přestup tepla z vnějšího žebrovaného povrchu obalového
souboru typu CASTOR v podmínkách skladování**

Heat transfer from outer finned surface of cask type CASTOR in
storage conditions

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Michal Škorňa

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

Rok: 2021

Doporučená literatura:

- [1] Hejzlar R.: Sdílení tepla, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1999
- [2] Incropera, F. P., DeWitt D. P.: Introduction to Heat Transfer, John Wiley & Sons, New York, 1996, ISBN 0-471-30458-1
- [3] SUJB: Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 379/2016 Sb. o schválení typu některých výrobků v oblasti mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření a přepravě radioaktivní nebo štěpné látky, Praha, 2016
- [4] Ševeček M.: Simulace chování vyhořelého jaderného paliva v průběhu dlouhodobého suchého skladování v obalových souborech typu CASTOR, diplomová práce KJR-FJFI-ČVUT v Praze, 2014
- [5] Kraus A. D., Aziz A., Welty J.: Extended Surface Heat Transfer, John Wiley & Sons Inc., New York, 2001, ISBN 0-471-39550-1
- [6] ANSYS: Elektronická dokumentace a manuály systému ANSYS 19.2, [online], ANSYS, Inc., dostupné na <
https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/main_page.html?lang=en&v=19.1>

Jméno a pracoviště vedoucího práce: **Ing. Dušan Kobylka, Ph.D.**
KJR FJFI ČVUT v Praze


Datum zadání bakalářské práce: 19.10. 2020

Datum odevzdání bakalářské práce: 7.7. 2021

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

V Praze dne 19.10. 2020

doc. Ing. Martin Kropík, CSc.



Garant oboru

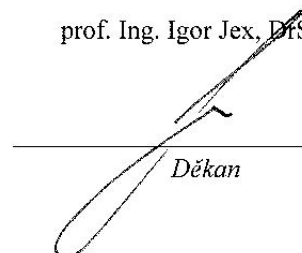
Ing. Jan Rataj, Ph.D.



Vedoucí katedry



prof. Ing. Igor Jex, DrSc.



Děkan

Doporučená literatura:

- [1] Hejzlar R.: Sdílení tepla, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1999
- [2] Incropera, F. P., DeWitt D. P.: Introduction to Heat Transfer, John Willey & Sons, New York, 1996, ISBN 0-471-30458-1
- [3] SUJB: Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 379/2016 Sb. o schválení typu některých výrobků v oblasti mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření a přepravě radioaktivní nebo štěpné látky, Praha, 2016
- [4] Ševeček M.: Simulace chování vyhořelého jaderného paliva v průběhu dlouhodobého suchého skladování v obalových souborech typu CASTOR, diplomová práce KJR-FJFI-ČVUT v Praze, 2014
- [5] Kraus A. D., Aziz A., Welty J.: Extended Surface Heat Transfer, John Wiley & Sons Inc., New York, 2001, ISBN 0-471-39550-1
- [6] ANSYS: Elektronická dokumentace a manuály systému ANSYS 19.2, [online], ANSYS, Inc., dostupné na <
https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/main_page.html?lang=en&v=19.1>

Jméno a pracoviště vedoucího práce: **Ing. Dušan Kobyłka, Ph.D.**
KJR FJFI ČVUT v Praze

Datum zadání bakalářské práce: 19.10. 2020

Datum odevzdání bakalářské práce: 7.7. 2021

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

V Praze dne 19.10. 2020

doc. Ing. Martin Kropík, CSc.

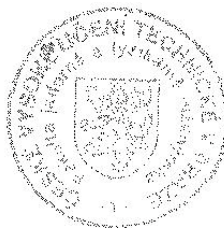


Garant oboru

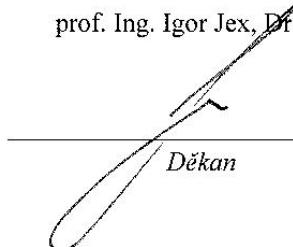
Ing. Jan Rataj, Ph.D.



Vedoucí katedry



prof. Ing. Igor Jex, DrSc.



Děkan

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, že jsem řádně citoval všechny použité prameny s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Praze dne 3.8.2021

.....

Michal Škorňa

Poděkování

Tímto bych rád hlavně poděkoval panu Ing. Dušanu Kobylkovi, Ph.D. za mnoho cenných rad, trpělivosti a připomínek, za vedení bakalářské práce, i když spolupráce se mnou nebyla kontinuální díky situaci, která nastala. Dále bych rád poděkoval Katedře jaderných Reaktorů Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze za poskytnutí výpočetních kapacit.

<i>Název práce:</i>	Přestup tepla z vnějšího žebrovaného povrchu obalového souboru typu CASTOR v podmínkách skladování
<i>Autor:</i>	Michal Škorňa
<i>Obor:</i>	Jaderné inženýrství
<i>Druh práce:</i>	Bakalářská práce
<i>Vedoucí práce:</i>	Ing. Dušan Kobylka, Ph.D. KJR FJFI ČVUT v Praze
<i>Abstrakt:</i>	Práce se zabývá problematikou přestupu tepla z obalového souboru. V první části této práce je probrána problematika skladování vyhořelého jaderného paliva, zejména suché. Je zde definován obalový soubor typu CASTOR, ale také typy tohoto obalového souboru. Je uveden popis základních bezpečnostních funkcí obalového souboru typu CASTOR a teplotně technické podmínky skladování. V další kapitole jsou vymezeny základní pojmy z fyziky sdílení tepla se zaměřením na žebrovaný povrch, podobnostní čísla a řešerše vědeckých studií ohledně problematiky přestupu tepla na žebrovaném povrchu. Dále je rozebrán obecný význam CFD, k čemu se využívá v současné době a jaké jsou možnosti simulace. Je zde také proveden konkrétní numerický výpočet v programu ANSYS fluent. Také je vysvětlena problematika výpočtu pro přirozenou konvekci a radiaci. Zmíněné zjednodušení a chyby, ke kterým mohlo při výpočtu dojít. K porovnání výsledných dat je zde rovněž zahrnut vlastní analytický výpočet pro srovnání s numerickým.
<i>Klíčová slova:</i>	sdílení tepla, přirozená konvekce, radiace, podobnostní čísla CASTOR, CASTOR 440/84M CFD, ANSYS fluent, vyhořelé jaderné palivo, vertikální stěna, přestup tepla žebrem, obdélníkové žebro,
<i>Title:</i>	Heat transfer from outer finned surface of cask type CASTOR in storage conditions
<hr/> <i>Author:</i>	Michal Škorňa
<i>Abstract:</i>	Bachelor thesis deals with the issue of heat transfer from the package. The first part of this thesis discusses the issue of storage of spent nuclear fuel, especially dry. Defined CASTOR like dry cask storage and types of CASTORS. A description of the basic safety functions of the CASTOR type packaging file and the thermal technical conditions of storage is given. The next chapter defines the basic concepts of the physics of heat transfer with focus on the finned surface, similarity numbers and other scientific studies related to the issue of heat transfer to the finned surface. Furthermore, the general meaning of CFD is discussed, what it is currently used for and what are the simulation options. Proven specific numerical calculation in the ANSYS fluent program. The explanation of the problem of calculation for natural convection, radiation, listed disturbances and errors that may occur during the calculation are used. The comparison of the resulting data here also includes its own analytical calculation.
<i>Key words:</i>	heat transfer, natural convection, radiation, characteristic numbers, CASTOR, CASTOR 440 / 84M CFD, ANSYS fluent, spent nuclear fuel, vertical plate, heat transfer fin and rectangular fin.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	8
SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN.....	9
SEZNAM POUŽITÝCH KONSTANT	11
1. ÚVOD.....	12
2. SUCHÉ SKLADOVÁNÍ VJP V KONTEJNERU TYPU CASTOR	14
2.1 SKLADOVÁNÍ VJP.....	14
2.2 MEZISKLAD VJP [8].....	15
2.3 OBALOVÝ SOUBOR.....	18
2.4 OBALOVÝ SOUBOR TYPU CASTOR	20
2.4.1 OS TYPU CASTOR 440/84 resp. 440/84M.....	21
.....	24
2.4.2 OS TYPU CASTOR 1000/19.....	24
2.5 TEPLTNĚ-TECHNICKÉ PODMÍNKY SKLADOVÁNÍ OS TYPU CASTOR	28
3. PŘESTUP TEPLA NA ŽEBROVANÉM POVRCHU	30
3.1 TEORIE PROBLEMATIKY SDÍLENÍ TEPLA [16].....	30
3.1.1 TEORIE PODOBNOSTI	31
3.1.2 PODOBNOSTNÍ ČÍSLA [28]	32
3.1.3 RADIACE [13]	34
3.2 TEORIE PROBLEMATIKY ŽEBER	36
3.2.1 EXPERIMENTÁLNÍ STUDIE PRO STANDARDNÍ OBDÉLNÍKOVÁ ŽEBRA [19]	38
3.2.2. VEDENÍ TEPLA V JEDNODUCHÉM IDEÁLNÍM ŽEBRU [13].....	43
3.2.3 VEDENÍ TEPLA POLEM ŽEBER []	44
3.2.4 ÚČINNOST SOUSTAVY ŽEBER [18]	45
3.2.5 EFEKTIVITA SOUSTAVY ŽEBER [18]	46
4. VÝPOČETNÍ SYSTÉM CFD	47
4.1 ANSYS [24]	48
4.1.1. DESIGNMODELER	49
4.1.2. MECHANICAL.....	50
4.1.3. CFX.....	50
4.1.4. THERMAL ANALYSIS.....	51

5. MODELOVÝ VÝPOČET	52
5.1 GEOMETRIE MODELU	52
5.2 ZJEDNODUŠENÝ ANALYTICKÝ VÝPOČET.....	53
5.3 MODEL PRO NUMERICKÝ VÝPOČET	56
6. ZÁVĚR	66
LITERATURA.....	67

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ZKRATKA	VÝZNAM
VJP	Vyhořelé jaderné palivo
OS	Obalový soubor
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany
ETE	Jaderná elektrárna Temelín
JE	Jaderná elektrárna
MSVP	Mezisklad vyhořelého jaderného paliva
PS	Palivový soubor
JZ	Jaderné zařízení

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

ZNAČKA	JEDNOTKA	VÝZNAM
c_p	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita
b	[1]	Účinnost žebrování
g	[m s ⁻¹]	Gravitační zrychlení
Gr	[1]	Grashofovo podobnostní číslo
h_r	[m]	Délka žebra
H	[m]	Výška žebra
k_1, k_2	[W m ⁻² K ⁻¹]	Součinitel prostupu tepla
L	[m]	Délka žebra
l	[m]	Vzdálenost, charakteristický rozměr
m	[m]	Vzdálenost mezi žebry
n	[1]	Počet žeber
Nu	[1]	Nusseltovo podobnostní číslo
M_e	[W m ⁻²]	Intenzita vyzařování
M_{e0}	[W m ⁻²]	Vyzařování dokonale černého tělesa
Pr	[1]	Prandtlovo podobnostní číslo
q	[W m ⁻²]	Plošná hustota tepelného toku
\dot{Q}_{sr}	[W]	Hustota tepelného toku
r_1	[m]	Vnitřní poloměr OS
r_2	[m]	Poloměr OS ve vetknutí
r_3	[m]	Vnější poloměr OS
Ra	[1]	Rayleighovo podobnostní číslo
S, S_2	[m]	Plocha žebra

ZNAČKA	JEDNOTKA	VÝZNAM
S_1	[m]	Plocha bez žebra
T	[K]	Termodynamická teplota
T_p	[K]	Termodynamická teplota povrchu
t_1	[°C]	Teplota v OS
t_{r1}	[°C]	Teplota na konci žebra (minimální)
t_{r2}	[°C]	Teplota žebra ve vetknutí (maximální)
t_{sr}	[°C]	Střední teplota žebra
t_2, t_∞	[°C]	Teplota okolního vzduchu
w	[m]	Šířka žebra
α, α_2	[W m ⁻² K ⁻¹]	Koeficient přestupu tepla
γ	[K ⁻¹]	Objemová roztažnost tekutiny
δ	[m]	Tloušťka stěny OS
δ_r	[m]	Šířka žebra
η_r	[1]	Účinnost žebrování
λ	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	Koeficient tepelné vodivosti
ν	[m ² s ⁻¹]	Kinematická viskozita tekutiny
ρ	[kg m ⁻³]	Hustota prostředí
ϕ	[W]	Zářivý tok
ψ	[1]	Součinitel žebrování

SEZNAM POUŽITÝCH KONSTANT

ZKRATKA	HODNOTA	JEDNOTKA	NAZEV
$c_{p_{25}}$	$1,0048 \cdot 10^3$	[J km ⁻¹ K ⁻¹]	Měrná tep. kapacitu vzduchu při 25°C [5]
ρ_{25}	1,1455	[Kg m ⁻³]	Hustota vzduchu [5]
λ_{25}	0,2547	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	Koeficient tepelné vodivosti vzduchu [5]
Pr	0,71	[1]	Prandtlovo číslo [5]
ν	$16,14 \cdot 10^{-3}$	[m ² s ⁻¹]	Kinematická viskozita vzduchu [5]
w	0,8	[1]	Koeficient dle [5]
σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$	[W m ⁻² K ⁻⁴]	Stefanova-Boltzmannova konstanta [5]

1. ÚVOD

Při provozu jaderně-energetických, výzkumných a školních reaktorů vzniká jako vedlejší produkt vyhořelé jaderné palivo (VJP). VJP z jaderných reaktorů tvoří méně než 1 % objemu všech jaderných odpadů na světě, ale také obsahuje přes 90 % veškeré radioaktivity. Na celém světě přibude ročně z provozu jaderných elektráren asi 12 000 tun VJP. [6]

V kontextu s vyhořelým jaderným palivem se často hovoří o skladování a ukládání. Termínem skladování se míní dočasné skladování (dlouhodobé i krátkodobé). Určitou dočasnost skladování vyjadřuje často používaný termín mezisklad [1]. Skladování není považováno za technickou bezradnost nad vyhořelým palivem, ale za vědomou technickou a ekonomickou volbu, protože přináší snížení aktivity, tepelného výkonu a především v budoucnu možnost dalšího přepracování. Ukládání do úložiště znamená trvalé umístění VJP s předpokladem, že se palivo nebude znovu přemísťovat a odpadnou tak podmínky na přepracování paliva a jeho dalšího využití [1,2].

Přeprava a skladování čerstvého i vyhořelého jaderného paliva jsou stejně jako provoz výzkumných nebo energetických jaderných reaktorů pod přísným dohledem příslušných úřadů, které dohlížejí na to, zda jsou dodržovány všechny požadavky jaderné bezpečnosti a radiační ochrany. Jednou z možností, jak bezpečně přepravovat a skladovat VJP, je použití obalového souboru (OS), který musí splňovat všechny požadavky národních legislativ.

V České republice jsou požadavky na OS dány zejména vyhláškou Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) č. 379/2016 [2], o typovém schvalování a přepravě, o typovém schvalování obalových souborů pro přepravu, skladování a ukládání jaderných materiálů a radioaktivních látek, o typovém schvalování zdrojů ionizujícího záření a přepravě jaderných materiálů a určených radioaktivních látek [2]. Pro téma této bakalářské práce bude podstatná jedna z hlavních funkcí OS, a tou je odvod zbytkového tepelného výkonu.

Ať je koncepce palivového cyklu jakákoliv, nejvýznamnější roli hraje fáze skladování. Česká republika produkuje VJP z 6 energetických reaktorů, 2 výzkumných a jednoho školního, přičemž byly zahájeny kroky vedoucí k výstavbě nových jaderných zdrojů.

Jelikož jsou skladovací kapacity VJP v kontrolovaných pásmech obou českých jaderných elektráren, tedy jak Jaderné elektrárny Temelín (ETE), tak i Jaderné elektrárny Dukovany (EDU), značně omezené, je výstavba a bezpečný provoz skladů VJP v nich umístěných důležitou podmínkou provozu jaderných elektráren v České republice. Hlubinné úložiště by mělo být uvedeno do provozu až po roce 2065 [3].

Pro účely této práce je podstatný zbytkový výkon, který produkuje VJP. Palivo po vyjmutí z reaktoru není zcela beze zbytku vyhořelé, tzn. že v něm stále ještě probíhají jaderné reakce. Důsledkem těchto reakcí je mimo jiné i vznik tepelné energie, která ohřívá celý palivový článek. Tato energie v čase klesá. Pokud by se článek neochlazoval, zvyšovala by se jeho teplota, a v případě, že by přesáhla konstrukční limity, by došlo k jeho destrukci. Proto je potřeba toto teplo z paliva přes OS odvést ven do okolního prostředí. Znalost zbytkového výkonu je proto důležitá pro bezpečné skladování vyhořelého jaderného paliva. [4]

2. SUCHÉ SKLADOVÁNÍ VJP V KONTEJNERU TYPU CASTOR

2.1 SKLADOVÁNÍ VJP

Umístit radioaktivní odpady ve skladu nebo meziskladu má hned několik výhod. Stále klesající radioaktivita usnadňuje budoucí manipulaci s odpadem. Odpady jsou pod stálou kontrolou a během skladování je dostatek času na rozmyšlení, jak s odpadem naložit, objeví-li se modernější a výhodnější metoda na jeho zpracování nebo opětovné využití v jaderných elektrárnách.

Problém vzniká v okamžiku, kdy je prodloužena provozní licence pro reaktory, neboť kapacita skladů na území jaderné elektrárny (JE) není na prodloužený provoz navržena. V době, kdy se přemýšlelo o brzkém přepracování VJP, byly budovány jen poměrně malé sklady v areálu JE. Velikost těchto skladů byla úměrná době provozu dané JE. Jako příklad je česká EDU, kde byly rozšířeny skladovací kapacity z důvodu prodloužení provozu. V současné době se dělí skladování VJP na dva typy, a to podle prostředí, kde se VJP nachází, a to na suché a mokré skladování.

U suchého skladování se používá speciálních stíněných kontejnerů, které budou podrobněji popsány v následujících kapitolách. Tento způsob skladování je vhodný pro delší intervaly uskladnění VJP a je výrazně ekonomičtější, zejména díky nižším provozním nákladům. Palivo je ukládáno buď do speciálních betonových staveb (sklípků – tzv. modulové skladování), nebo do betonových či kovových kontejnerů, které jsou umístěny do odvětrávaných hal. Suché skladování umožňuje snadnou manipulaci s VJP, které je již umístěno v ochranných OS (obalové soubory – kontejnery), které stíní radioaktivitu. Suché sklady, a to jak v podobě hal či modulových sklípků, nemají po jejich výstavbě téměř žádné provozní náklady, a v případě potřeby lze relativně snadno rozšířit jejich kapacitu. Do suchých skladů se použité palivo dává po několika letech „odpočinku“ v bazénu vyhořelého paliva [7].

Sklady se nejčastěji budují přímo v areálu jaderných elektráren, jako je tomu například u českých jaderných elektráren, a to EDU a ETE. Ve všech jaderných elektrárnách na území České republiky se používá suché skladování ve stíněných kontejnerech typu CASTOR. Mezi výhody suchého skladování patří především: nižší provozní náklady, žádné nebo malé množství provozních odpadů, možnost snadné manipulace s OS a rozšíření skladu. Do suchých skladů se VJP dává po 5–10 letech, kdy bylo chlazeno v bazénu.



Obrázek 1: Suché skladování metodou sklípků VJP [9]

2.2 MEZISKLAD VJP [8]

Mezisklad vyhořelého jaderného paliva (MSVP) je zařízení pro dlouhodobější skladování (cca 10 až 50 let) VJP. Jedná se o skladování po vyjmutí paliva z tzv. bazénu skladování u jaderného reaktoru a před jeho konečným uložením do hlubinného úložiště. VJP je vysoce radioaktivní a navíc uvolňuje určité množství zbytkového tepla. Z toho důvodu je nezbytné skladovat ho tak, aby nepředstavovalo žádné nebezpečí pro životní prostředí. Rovněž je nutné ho chladit. Existují dva základní typy MSVP – mokré mezisklady a suché mezisklady. V obou typech MSVP je vyhořelé palivo bezpečně uloženo ve speciálních skladovacích kontejnerech. V mokřém meziskladu se tyto kontejnery nacházejí ve skladovacích bazénech pod hladinou vody, která zabezpečuje chlazení a ochranu. V

suchém meziskladu jsou skladovací kontejnery uloženy na vzduchu, což je z hlediska chlazení také dostatečné. Suché mezisklady představují novější, jednodušší a spolehlivější technologii meziskladování VJP.

MSVP paliva Dukovany je užíván pro dlouhodobé skladování VJP z reaktorů typu VVER-440 provozovaných v Jaderné elektrárně Dukovany. VJP je zde skladováno v OS typu CASTOR 440/84. Celková kapacita meziskladu je 60 kusů obalových souborů pro 600 t těžkých kovů.

Zkušební provoz MSVP Dukovany proběhl v době od prosince 1995 do ledna 1997, v souladu s rozhodnutím SÚJB č. 245/95. Na něj plynule navázal provoz povolený rozhodnutím SÚJB č. 29/97. V současnosti je MSVP Dukovany provozován v souladu s rozhodnutím SÚJB č.j. SÚJB/ONRV/24217/2020 ze dne 15. 12. 2020. Toto rozhodnutí je vykonatelné od 1. 1. 2021 a navazuje tak na předešlé rozhodnutí SÚJB, u kterého platnost skončila dne 31. 12. 2020. V souladu s § 21 odst. 2 zákona č. 263/2016 Sb., atomový zákon, je povolení vydáno na dobu neurčitou.

Použité obalové soubory CASTOR 440/84 jsou typově schváleny pro přepravu a skladování VJP, přičemž toto rozhodnutí SÚJB je vydáváno na období přibližně 10 let. Rozhodnutím SÚJB č. 10973/2005 ze dne 30. 6. 2005 byl obalový soubor CASTOR 440/84 typově schválen pro železniční přepravy a pro skladování VJP z jaderných reaktorů typu VVER-440. Po desetiletém období platnosti bylo toto rozhodnutí nahrazeno dalším rozhodnutím SÚJB o schválení typu č.j. SÚJB/ONRV/25380/2015 s platností na dalších deset let provozu MSVP Dukovany. [8]



Obrázek 2: mezisklad VJP v Dukovanech [8]

Dne 8. března 2006 byl za přítomnosti zástupců SÚJB, ČEZ, a. s., dodavatele obalových souborů CASTOR 440/84 společnosti GNS mbH ze Spolkové republiky Německo, kraje Vysočina a dalších pozvaných hostů slavnostně zavezen poslední obalový soubor VJP do MSVP Dukovany (viz Obrázek č. 2). VJP bude v souladu se schválenou vládní koncepcí nakládání s radioaktivními odpady a VJP je skladováno ve skladu až do doby výstavby hlubinného úložiště, do kterého bude poté převezeno, přebaleno do úložných obalových souborů a uloženo (tj. trvale umístěno). V areálu jaderné elektrárny Dukovany byl již vybudován koncepčně identický nový sklad VJP, jehož kapacita je dostatečná pro skladování zbylého VJP z EDU, které vzniklo a vznikne po dobu jejího celkového provozu. Obdobná technologie skladování VJP se používá i v ETE.

2.3 OBALOVÝ SOUBOR

K transportu a skladování VJP jsou v českých jaderných elektrárnách používány speciální dvouúčelové (transportní a skladovací) kontejnery. Tyto kontejnery, nazývané také obalové soubory, umožňují, aby v případě potřeby transportu paliva nebylo třeba již VJP ze skladovacích kontejnerů překládat do kontejnerů transportních, ale převést ho bez zbytečných časově i technologicky náročných manipulací. Konstrukce OS se liší dle paliva, které je v něm skladováno. Obecně mají OS válcový tvar, které na povrchu mohou, ale nemusí mít žebra. Mezi základní funkce OS je zajištění stínění, aby nedošlo k úniku radioaktivních produktů do okolí a odvod tepla z OS.

OS je skladován ve skladu ve vertikální poloze a je postaven na mříži, aby byl zaručen odvod tepla přirozenou konvekcí ze všech stran. Soubory jsou od sebe vzdáleny 0,5m [5], aby bylo zajištěno ochlazování přirozenou konvekcí, která je zajištěná rovněž průduchy ve stěnách haly, kde vzniká komínový efekt. OS musí odolat i zasypání, tedy pokud se sklad zhroutí či rozpadne, trosky nesmí zanechat na OS žádné trvalé následky.

Během převozu je OS v horizontální poloze. Během přepravy se na OS instalují deformační zóny, nazývané tlumící jednotky, které jsou jen na konci, tedy na čelních plochách. Kontejnery mohou být vyrobeny z tlustostěnné uhlíkaté nebo nerezavějící oceli, litiny, z mědi nebo z kombinace mědi, oceli a betonu. Existují již i projekty kontejnerů z titanu [33]. Podle projektových výpočtů budou kontejnery hermetické po dobu 60 let. Vyhovět musejí i těm nejtěžším mechanickým, tepelným a vodotěsným zátěžím, jako je např. náraz plně rozjeté lokomotivy nebo pád dopravního letadla.

ZAKLADNÍ BEZPEČNOSTNÍ FUNKCE OS:

Obalový soubor má 5 základních funkcí, aby splňoval bezpečné skladování VJP. Jedná se o fundamentální bezpečnostní principy, které jsou podrobně popsány v atomovém zákonu [43] a v související vyhlášce. Podmínky v atomovém zákoně jsou převzaty z velké míry z kritérií mezinárodní agentury pro atomovou energii – MAAE nebo jiných národních zdrojů např. jaderné regulační komise Spojených států amerických.

ODVOD ZBYTKOVÉHO TEPLA [6]

Odvod zbytkového tepla je zabezpečen kombinací podmínek na zavezení jednotlivých OS palivem s maximálním tepelným výkonem definovaným na základě tepelných výpočtů konstrukce OS a podmínek na maximální počet a rozestupy OS ve skladu. Současně musí být zajištěn přívod a odvod větracího vzduchu ve skladovací hale. Musí být zajištěn tak, aby nebyly překročeny limitní hodnoty maximální povolené teploty stanovené pro daný typ paliva a kontejneru výrobcem a legislativou.

V obou případech, jak při skladování, tak při transportu, je OS chlazen přirozenou konvekcí. Na plášti OS zpravidla bývají vyrobena žebra, jejichž hlavním úkolem je zvýšit vnější plochu OS, a tedy i odvod tepla do okolí. Kromě toho, že musí být dodržena max. teplota povrchu, kterou udává v České republice SÚJB svou vyhláškou, existují i další limity, např. maximální teplota pokrytí palivového souboru (PS) a maximální teplota moderátoru. Limity těchto teplot pro OS typu CASTOR 440/84M jsou uvedeny v kapitole č. 2.4.1.

TĚSNOST

V současnosti je v OS skladováno pouze těsné (bez úniku) VJP z JE. OS je hermeticky uzavřen minimálně dvěma nezávislými hermetickými víky, kde prostor mezi nimi je vyplněn inertním plynem. Díky tomuto nedojde v případě uvolnění štěpných plynů z PS do vnitřního prostoru OS k úniku do okolního prostředí. Může dojít k uvolnění štěpných plynů do meziprostoru. V případě, že ano, pak díky tlakovému gradientu a konstrukci OS není možno, aby se dostaly štěpné plyny do životního prostředí. Těsnost obou dvou vík, jak primárního, tak i sekundárního, je kontrolována snímačem tlaku inertního plynu v kontrolním prostoru mezi víky.

PODKRITIČNOST

Podkritičnost musí být zaručena při všech provozních a havarijních stavech. Je zabezpečená konstrukcí koše OS, geometrickým rozložením PS v OS a způsobem zavážení OS. Při konstrukci OS se při výpočtech efektivního koeficientu násobení neutronů předpokládá, že zavážené palivo má vlastnosti čerstvého paliva. Současně se při výpočtech předpokládají podmínky moderace a přítomnost vody ve vnitřku OS.

STÍNĚNÍ

K radiační ochraně pracovníků, obyvatelstva a životního prostředí přispívá jednak výše zmíněné hermetické uzavření VJP v OS, jednak stínící vlastnosti konstrukce OS (těleso, víka, neutronové stínění) a dekontaminace povrchu. Stínění je zajištěno především tloušťkou ocelové stěny, která pohltí spolehlivě gama záření a neutrony. Ke zpomalování rychlých neutronů se zpravidla dává do OS lehčí materiál jako polyetylén sloužící jako moderátor, který zpomalí neutrony. Ty jsou posléze zachyceny v ocelové stěně. Pomalé neutrony jsou zachyceny v materiálu, kdežto rychlé neutrony by materiálem prošly kvůli jeho nízkému účinnému průřezu pro absorpci.

MANIPULOVATELNOST [3]

Manipulovatelností se rozumí otevíratelnost OS, otáčení a přeprava celého kontejneru. Rozumí se tím manipulovatelnost a přístup nejen k celému souboru, ale i k jednotlivým PS a zavezení PS z důvodu dalšího nakládání s VJP po dobu skladování ve skladu VJP. Jedná se např. o odvoz VJP do hlubinného úložiště nebo na přepracování. Manipulace s VJP je naplněna požadavky na zavezení OS (pouze mechanicky nepoškozené VJP), které jsou uvedené v podmínkách typového schválení OS.

2.4 OBALOVÝ SOUBOR TYPU CASTOR

Tento OS patří mezi kovové kontejnerové typy, tedy těžké OS s žebrováním na povrchu, které usnadňuje odvod tepla. Dále se během přepravy instalují dočasné deformační zóny schopné pohltit energii v případě mechanického nárazu. OS je masivní válec o hmotnosti 50–130 tun, který pojme 1–5 tun paliva. Jsou vyrobeny z lité oceli nebo litiny, přičemž účinného stínění gama záření a neutronů je dosaženo dalšími vrstvami materiálů, k nimž se přidávají prvky obsahující vodík, polyetylén nebo parafín, kde OS je při uzavírání plněn inertním plynem kvůli odvodu tepla a vytvoření podmínek pro dlouhodobé skladování.

OS nejen typu CASTOR mají vnitřní povrch pokrytý niklovými slitinami [5], který povrch chrání před korozí. Vnitřní prostor je naplněn heliem, které odvádí zbytkové teplo, a navíc brání oxidaci palivového pokrytí, která by mohla nastat, pokud by byl OS naplněn jen vzduchem.

Héliem je vyplněn i malý prostor mezi primárním a sekundárním víkem, kde je však vyšší tlak. Teplo, které OS generuje, prostupuje zevnitř na vnější povrch ven a je odváděno přirozeným prouděním vzduchu. Tento vzduch se do skladovací haly dostává průduchy ve stěnách poté, co mu je předáno teplo z prostoru kolem OS. Proto stoupá vzhůru a sklad opustí otvory podél stropu.

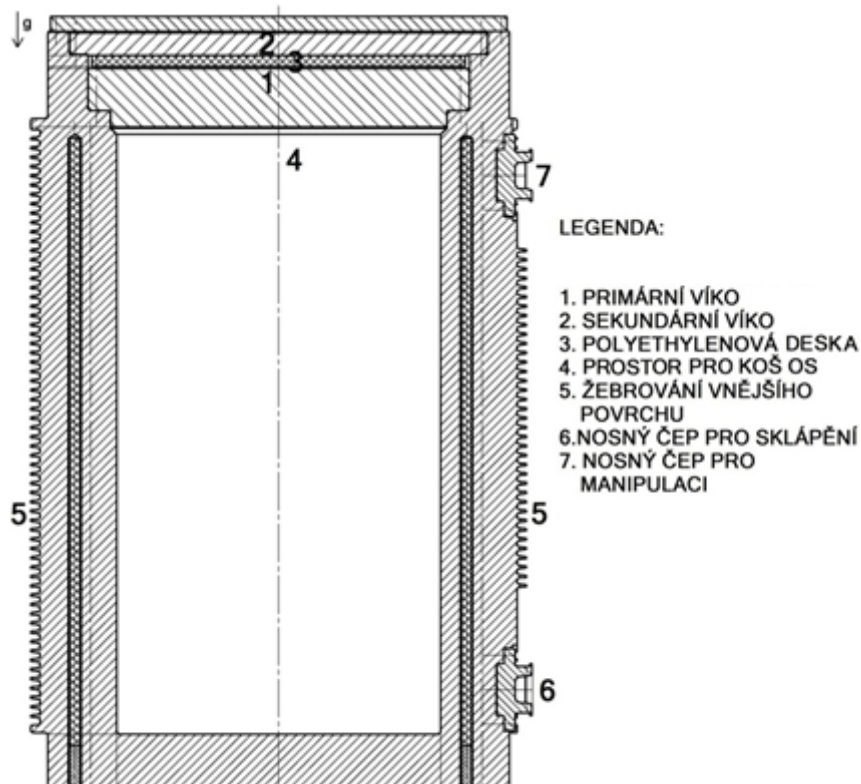
Novějším typem (starší byl OS CASTOR 440/84) skladovacího a přepravního OS používaným v EDU je OS CASTOR 440/84M, a CASTOR 1000/19 používaný v ETE, jehož základní vlastnosti jsou [3] :

- komplexní využití OS jak pro přepravu, tak i pro skladování,
- umístění PS z reaktoru typu VVER,
- OS zajišťuje dvojitý víkový systém sestávající z primárního a sekundárního víka, která jsou připevněna válcovými svorníky k tělesu OS a těsněna kovovými těsněními,
- pro přepravu OS a pro omezení mechanického zatížení OS při haváriích se jako bezpečnostní prvek přidávají tlumiče rázu,
- radiální žebra na vnějším povrchu pláště tělesa OS zvětšují přestupnou plochu,
- OS je naplněn heliem, aby nedocházelo k degradaci konstrukčních materiálů, ale také je díky heliu zaručen lepší přestup tepla,
- maximální teplota pokrytí palivových tyčí je 350 °C a maximální teplota moderátorových prvků v OS je 105 °C.

2.4.1 OS TYPU CASTOR 440/84 resp. 440/84M

Kontejner CASTOR 440/84, který dodávalo německé konsorcium GNS, má kapacitu 84 palivových kazet a životnost minimálně 60 let. Těleso je z litiny s kuličkovým grafitem GGG40 [3], koš je z borovaného hliníku, neutronové stínění zajišťuje polyethylen. Vnitřní prostor kontejneru je vyplněn heliem o nižším tlaku, než je tlak atmosférický. Bezpečnost uložení VJP v OS je mimo jiné garantována dvěma víky, z nichž každé má kovové těsnění. V meziprostoru mezi těmito víky se měří tlak helia (helium v prostoru mezi víky má oproti atmosféře přetlak 0,6 MPa). Třetí víko slouží jako ochrana před vnějšími vlivy. Jako další parametry se kromě tlaku aktivně sleduje teplota povrchu

obalového souboru, která nesmí překročit 85 °C, a také hodnota radiace v meziskladu. Tento obalový soubor je typově schválen pro transport a skladování VJP[15].



Obrázek 3: Řez OS typu CASTOR 440/84M ve skladovací poloze [6]

Provedení kontejneru Castor 440/84M je téměř shodné s kontejnerem Castor 440/84. Drobné rozdíly jsou v konstrukci z důvodu použití kontejnerů na VJP o větším obohacení a tedy s většími tepelnými a radiačními účinky. Kontejner Castor 440/84M má oproti svému předchůdci zesílené biologické stínění (tj. materiál polyetylén), konstrukčně a materiálově upravené provedení vnitřního koše kontejneru (borovaný hliník). Zlepšená je zde těsnost kontejneru, kde je navíc kromě kovového těsnění pod každé víko přidáno ještě elastomerové těsnění. Rozdíly v konstrukci mezi oběma OS jsou patrné z následující tabulky:

Tabulka 1: Základní parametry přepravního a skladovacího kontejneru CASTOR 440/84 [3] resp. CASTOR 440/84M

VELIČINA	OS CASTOR 440/84	OS CASTOR 440/84M
Skladovací hmotnost	116 110 kg	118 340 kg
Přepravní hmotnost	131 380 kg	138 160 kg
Max. aktivita	$2,7 \cdot 10^{17}$ Bq	$2,6 \cdot 10^{17}$ Bq
Počet uskladněných kazet VVER 440	84 ks	84 ks
Materiál	Litina s grafitem	Litina s grafitem
Výška OS	4 170 mm	4 080 mm
Průměr OS včetně žebrování	2 660 mm	2 660 mm
Max. počáteční obohacení U^{235}	4,38 hm. %	Nedohledáno ze spol. zdroje
Max. dávkový příkon na povrchu	< 2 mSv/h	< 2 mSv/h
Max. dávkový příkon ve vzdálenosti 2 m	< 0,1 mSv/h	< 0,1 mSv/h
Minimální životnost OS	60 let	60 let
Tloušťka stěny	370 mm	410 mm
Max. teplota povrchu	85 °C	85 °C
Max. přípustný výkon	< 21kW	< 24,66kW
Max. tepelný výkon jednoho palivového souboru	250 W	340 W

Kontejner má průměr stejný jako Castor 440/84, ale je nepatrně vyšší (viz Tabulka č. 1). Hmotnost prázdného kontejneru je 93,7 tun. Teplota pokrytí povlaku palivového elementu nepřekročí 350 °C.



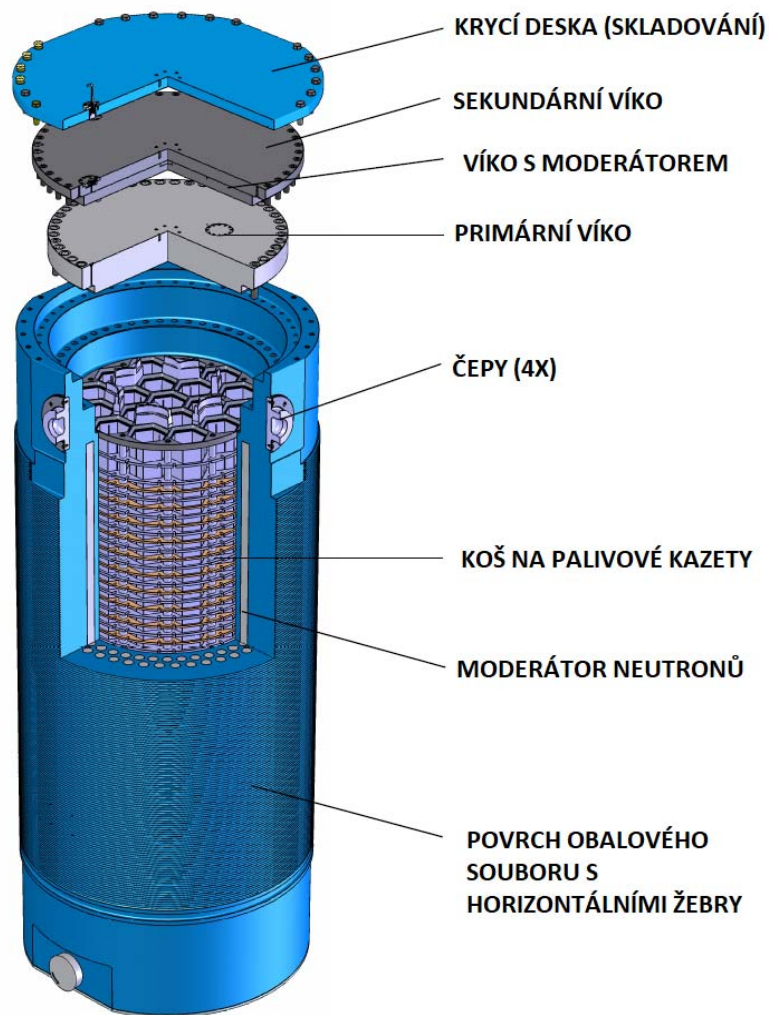
Obrázek 4: Obalový Soubor CASTOR 440/84M [10]

2.4.2 OS TYPU CASTOR 1000/19

Z důvodu použití jiného paliva je použit i jiný typ OS, v tomto případě je to CASTOR®1000/19. Principiálně se jedná o příbuzný typ obalového souboru používaného v EDU. Na první pohled zaujme závěsným systémem čtyř čepů v jeho horní části. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu obtížné manipulace s kontejnerem při transportu z reaktorového sálu. CASTOR ® 1000/19 je určen pro přepravu a skladování PS typu VVER 1000. Tento typ OS je používán na ETE, kdy byl v roce 2010 v areálu JE dokončen suchý mezisklad VJP.

Jedná se o novou konstrukci koše, která již není tvořena pouze prizmatickými profily, nýbrž obsahuje po výšce prostřídáné distanční mříže ze dvou různých materiálů. Ocelové

plechy plní požadavek na mechanickou odolnost, zatímco ty hliníkové spolehlivě odvádí teplo ze středu do stěn. 19 šestihranných trubek tvořících otvory pro PS je vyrobeno z nerezové oceli s příměsí bóru, který plní funkci absorbátoru neutronů. Ve stěnách OS jsou po celé jejich výšce vyvrtány svislé dutiny ve dvou soustředných kružnicích vyplněné polyetylénem, který moderuje neutrony.



Obrázek 5: OS typu CASTOR 1000/19 ve skladovací poloze [11]

Pohled na první kontejner umístěný v moderní skladovací hale, která je speciálně navržena, aby odolala případnému zemětřesení či pádu velkého dopravního letadla, uvádí Obrázek č. 6



Obrázek 6: První temelínský mezisklad zaplněný jedním kontejnerem CASTOR 1000/19 [12]

OS se plní palivem obdobně jako u staršího typu na EDU. Po našroubování primárního víka se vyjme z nádrže, voda se přes ventil odsaje a kontejner se opakovaně vakuově suší. Poté se napustí heliem o absolutním tlaku nižším, než je atmosférický, našroubuje se sekundární víko a prostor mezi nimi se taktéž plní heliem o absolutním tlaku 0,6 MPa. Tímto vzniknou dvě nezávislé ochranné bariéry. Hodnota tlaku mezi víky je neustále po dobu životnosti kontejneru sledována. Celý proces je z důvodu opakovaného sušení časově náročný. Po jeho dokončení je nutné počkat na ustálení teplot, které jsou měřeny a srovnávány s předpokládanými hodnotami. Současně je také sledována hodnota záření.

Os se skládá z těchto částí:

- Monolitické těleso OS vyrobené z tvárné litiny s obrobenými chladicími žebry
- Systém s dvojitým víkem – primární víko a sekundární víko – s kovovými těsněními, jak přišroubovanými, tak i prostorem mezi víky, který je sledován únikem.
- Čepy pro manipulaci a zvedání OS.
- Koš uvnitř OS pro uložení palivových souborů.

Tabulka 2: Základní parametry přepravního a skladovacího kontejneru CASTOR 100/19 [3,12]

VELIČINA	OS CASTOR 1000/19
Skladovací hmotnost	116 000 kg
Počet uskladněných kazet VVER 1000	19
Výška OS	5 500 mm
Průměr OS včetně žebrování	2 330 mm
Max. počáteční obohacení U ²³⁵	5,0 %
Minimální životnost OS	60 let
Max. přípustný výkon	< 17 kW

2.5 TEPLOTNĚ-TECHNICKÉ PODMÍNKY SKLADOVÁNÍ OS TYPU CASTOR

Sklady vyhořelého paliva jsou považovány za jaderné zařízení (JZ), a proto se na jejich stavbu, provoz i konečnou likvidaci vztahují přísné podmínky a dozor SÚJB. Na počátku je to schválení vhodného výběru lokality, dále přes souhlas příslušných úřadů uvedení do provozu, až po schválení způsobu odstranění tohoto jaderného zařízení. I přes různosti požadavků jednotlivých zemí může být konstatováno, že sklad VJP nebude nikdy ohrožovat bezpečnost obyvatel a nebude mít žádný negativní vliv na životní prostředí [2].

V České republice musí být dle zákona studie vlivu JZ na životní prostředí zpracována osobou nezávislou a autorizovanou Ministerstvem životního prostředí [2].

Pokud jde o zajištění jaderné bezpečnosti skladů VJP, žadatel o povolení výstavby a provozu takového zařízení je povinen předložit kompletní bezpečnostní zprávu o JZ úřadům. V té se musí podrobně prokázat jaderná bezpečnost projektovaného JZ jak za podmínek běžného provozu, tak i při havarijní situaci. Stejně jako u jaderných elektráren platí i zde základní princip ochrany do hloubky, který lze pro případ skladování VJP chápat jako vytváření vícenásobných bariér zaručujících stínění a izolaci vedoucí k naplnění základních požadavků zajištění JB.

Teplotně-technické podmínky při nakládání s vyhořelým jaderným palivem musí být splněny i při abnormálních událostech a nehodách. Je nezbytné je zajišťovat systematicky redundantními nezávislými prvky. Dodržením zásad se v daných případech řídí dle dokumentace (např. vyhlášky SÚJB, normy, doporučení mezinárodních organizací apod.). Základní přístup k legislativní úpravě podmínek využívání jaderné energie a s tím spojené problematice VJP dlouhodobě vychází z požadavků na zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany, fyzické ochrany a havarijní připravenosti [3]. V atomovém zákoně je rovněž zahrnuto i nakládání s radioaktivními odpady, tedy kdy stát za podmínek stanovených zákonem ručí za bezpečné ukládání všech radioaktivních odpadů včetně monitorování a kontroly úložišť.

OS je umístěn ve skladu, kde je chráněn před atmosférickými podmínky střechou skladu. Nepůsobí na něj sluneční záření, tedy není potřeba počítat s přestupem tepla sáláním při skladování [5]. OS jsou umístěny s rozestupy, působí zde přirozená konvekce. Proudění je navíc zintenzivněno komínovým efektem, jelikož chladný vzduch vstupuje otvory ve spod haly a vystupuje ochlazený otvory pod střechou. Tento zintenzivněný proud bude při standardní analýze zanedbán.

Za předpokladu plného naplnění skladu v okolí OS jsou myšleny další OS, které mají podobné teploty, a tedy i okolí žebrovaných povrchů má přibližně stejné teploty. Maximální přestup tepla sálání bude směřovat ke stropu, a tedy vzhledem k minimálnímu působení ho lze v následujících kapitolách zanedbat [5].

3. PŘESTUP TEPLA NA ŽEBROVANÉM POVRCHU

3.1 TEORIE PROBLEMATIKY SDÍLENÍ TEPLA [16]

Přenos nebo také sdílení tepla je komplexní děj. Pro jeho popis a pochopení se zavádí řada zjednodušení, která následně umožní tvorbu zjednodušeného modelu pro matematicko-fyzikální popis sledovaného děje. Dochází k přestupu tepla mezi dvěma místy v prostoru s různou teplotou. Sdílení tepla se dělí na: přestup tepla prouděním (konvekcí), tepelná výměna vedením (kondukcí) a tepelná výměna sáláním (radiací, zářením) [13].

Vedení tepla

Při vedení tepla částice látky v oblasti s vyšší tepelnou energií předávají část své střední energie prostřednictvím vzájemných interakcí (srážky, vazby v krystalických mřížkách) částicím v místech s nižší teplotou, tj. nižší střední energii [14]. Nejčastěji dochází k vedení tepla v pevných látkách. Teplo se šíří vedením také v kapalinách a plynech [13], pokud je jejich mikroskopický pohyb zanedbatelný.

Proudění tepla

Uskutečňuje se při proudění tekutiny přemístováním částic tekutiny z oblasti jedné teploty do oblasti jiné teploty. Je způsobeno pohybujícími se makroskopickými částicemi. Konvekce je bezprostředně spojena s přenosem hmoty.

Intenzita sdílení tepla konvekcí závisí na typu proudění tekutiny. Existuje tzv. nucené proudění, které vzniká vyvozením vnějších sil jako např. čerpadlem, a přirozené (volné) proudění, které vzniká rozdílem hustot ohřáté tekutiny a vztakovými silami v poli vnějšího zrychlení.

Současně s konvekcí je v tekutině i kondukcce, která se vyskytuje vždy, stýkají-li se částice o různé teplotě. Je důležité si povšimnout, že konvekční složka v naprosté většině případů převládá nad kondukční, která bývá velmi malá.

Sálání

Tepelné sálání (záření) je druhem přenosu tepla pomocí elektromagnetických vln. Tyto vlny se šíří ve vakuu rychlostí světla.

Tepelná energie tělesa se mění v záření, jelikož každá pohybující se elektricky nabitá částice vysílá elektromagnetické záření, které se šíří prostorem a absorpcí do jiného materiálu se opětovně přemění na tepelnou energii. Při dopadu záření na těleso se v obecném případě jeho část odrazí, část pohlcuje a část může projít tělesem.

Sálání těles velmi závisí na čtvrté mocnině termodynamické teploty. Je-li teplota tělesa vyšší, je vyšší i vyzařovaná energie sáláním. S rostoucí teplotou se mění též spektrální složení záření.

Každá pohybující se nabitá částice vyzařuje elektromagnetické záření, a protože každá látka se skládá z takovýchto částic a má-li teplotu vyšší než 0 K a její částice se mohou pohybovat, tak tato látka vyzařuje elektromagnetické vlnění. Každé těleso vyzařuje záření o vlnových délkách od velmi malých až do nekonečna. Tělesa vyzařují obecně všechny vlnové délky [14]. S rostoucí teplotou roste také celkové množství tělesem vyzařené energie a záření se přesouvá do oboru kratších vlnových délek.

Mohou se uplatňovat společně všechny tři základní způsoby sdílení tepla často však některé výrazně převýší zbylé složky a není zapotřebí je tedy uvažovat. Při nízkých teplotách hraje významnou roli konvekce a kondukce, kdežto při vysokých teplotách se projevuje výrazně sálání.

Pro případ této práce bude podstatná jen konvekce, konkrétně přirozená, a samozřejmě radiace, které se při přirozeném ochlazení obalového souboru projevují. [13],

3.1.1 TEORIE PODOBNOSTI

K nalezení konkrétního řešení je třeba řešit soustavu rovnic tvořenou rovnicí kontinuity, Navier-Stokesovými rovnicemi, Energetickou rovnicí vyjadřující zákon zachování energie (ZZE) a stavovou rovnicí. K těmto rovnicím také přísluší dané hraniční podmínky. Tato soustava rovnic má analytické řešení pouze ve speciálních případech a při analýze reálných problémů přichází v úvahu pouze numerické řešení. Kvůli složitosti

analytického popisu vznikla teorie podobnosti. Pro výpočet této práce bude sloužit jako doplněk k numerickým výpočtům.

Pokud je několik různých systémů navzájem podobných, stačí umět popsat (není důležité, zdali teoreticky nebo experimentálně) jeden z nich, a k popisu ostatních stačí použít jednoduchých operací, jak určit, zdali jsou systémy podobné, částečně podobné nebo zcela nepodobné. Na základě srovnání tzv. kritérií podobnosti. Kritéria podobnosti jsou bezrozměrné fyzikální veličiny určené na základě jejich vhodných definic [13].

Teorie podobnosti spočívá v přenosu experimentálně zjištěných poznatků z modelu na dílo. Aby pro dílo platily stejné vztahy jako pro model, musí mezi nimi existovat podobnost (geometrická, časová, polí různých fyz. veličin).

Existují tři základní věty této teorie, které určují, jaké jevy jsou navzájem podobné a pomáhají stanovit podobnostní čísla. Jejich znění lze nalézt např. v [13].

3.1.2 PODOBNOSTNÍ ČÍSLA [28]

Tato čísla jsou odvozována ze základních rovnic popisující proudící tekutinu. Podobnostních čísel existuje celá řada. Jsou bezrozměrná a zde budou uvedena základní, která jsou potřebná pro účely této práce. Hlavní podobnostní čísla jsou následující.

Reynoldsovo podobnostní číslo charakterizuje nucené proudění a dává do poměru setrvačné a vazké síly.

Fyzikální význam **Prandtlova** čísla závisí tedy pouze na dané látce a „stavu“, ve kterém se nachází. Pro velké hodnoty Prandtlova čísla $Pr \gg 1$ probíhá převážně konvektivní přenos tepla v kapalině a pro malé hodnoty Prandtlova čísla $Pr \ll 1$ probíhá převážně konduktivní přenos tepla v kapalině. Prandtlovo podobnostní číslo vyjadřuje termo-fyzikální vlastnosti proudící tekutiny, při řešení sdílení tepla je závislé na fyzikálních vlastnostech:

$$Pr = \frac{\nu \rho c_p}{\lambda} \quad (1)$$

Grashofovo podobnostní číslo je náhrada Reynoldsova při přirozené konvekci. Udává poměr vztlakové a viskózní síly působící na medium [17]:

$$Gr = \frac{\gamma \Delta t g l^3}{\nu^2} \quad (2)$$

Konstantou $\Delta t = |t_p - t_f|$ se ve většině případů rozumí velikost rozdílu teploty povrchu omývaného tělesa a teploty neovlivněné tekutiny, l je charakteristický rozměr.

Rayleighovo podobnostní číslo definované součinem Gr a Pr se často využívá v experimentálních vztazích:

$$Ra = Gr Pr \quad (3)$$

Nusseltovo číslo, které se obvykle používá k určení koeficientu přestupu tepla dosazovaného do Newtonova vztahu pro výpočet hledané hustoty tepelného toku, je definováno:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (3)$$

Mimo jiné je Nusseltovo číslo, resp. součinitel přestupu tepla, je funkcí polohy. Proto je potřeba definovat střední hodnotu, neboť samotné Nusseltovo číslo se lokálně mění.

Korelace, ze kterých se určuje součinitel přestupu tepla pro daný typ konvekce a podmíněk, jsou nejčastěji tvaru:

$$Nu = f(Re_x, Pr_x) \quad (4)$$

$$\overline{Nu} = f(Re_L, Pr_L) \quad (5)$$

přičemž Nu a \overline{Nu} může záviset i na jiných podobnostních číslech.

Vztah (4) je používán k určení lokálního koeficientu přestupu tepla α , vztah (5) pak pro určení středního $\bar{\alpha}$ na povrchu určené charakteristickým rozměrem. Charakteristický rozměr je rozměr ve směru růstu mezní vrstvy. Ve vztazích jsou k podobnostním číslům

přiřazovány dolní indexy. První index značí, zdali se podobnostní čísla počítají při teplotě kapaliny (f), při teplotě stěny (p) nebo při teplotě v mezní vrstvě (m). Každý vztah má přiřazené konkrétní indexy. Každá korelace byla určena pro určitý charakteristický rozměr a charakteristickou teplotu. V následujících podkapitolách jsou uváděny pouze korelace potřebné pro výpočty přestupu tepla na žebrovaném povrchu.

V závěru této kapitoly, v souvislosti s vědeckými články, bude také zmíněno Richardsonovo podobnostní číslo, které definuje poměr vztlaku ku smyku. Jelikož nikde nevystupuje číselně, není potřeba ho v rámci této práce definovat vztahem.

3.1.3 RADIACE [13]

V úvodu 3. kapitoly byla již definována metoda šíření tepla sáláním. Dále budou vyjasněny zákonitosti, na kterých radiace závisí a co všechno ji ovlivňuje.

Při popisu zákonů vyzařování těles se budou využívat následující veličiny:

Zářivá energie E je energie vyzářená, přijatá nebo přenesená prostřednictvím elektromagnetického záření.

Vyzařování v daném bodě plošného zdroje záření je podílem zářivého toku, který vychází z elementární plochy dS :

$$dM_e = \frac{d\Phi}{dS} \quad (6)$$

Dá se vypočítat z vyzařování dokonale černého tělesa M_{e0} :

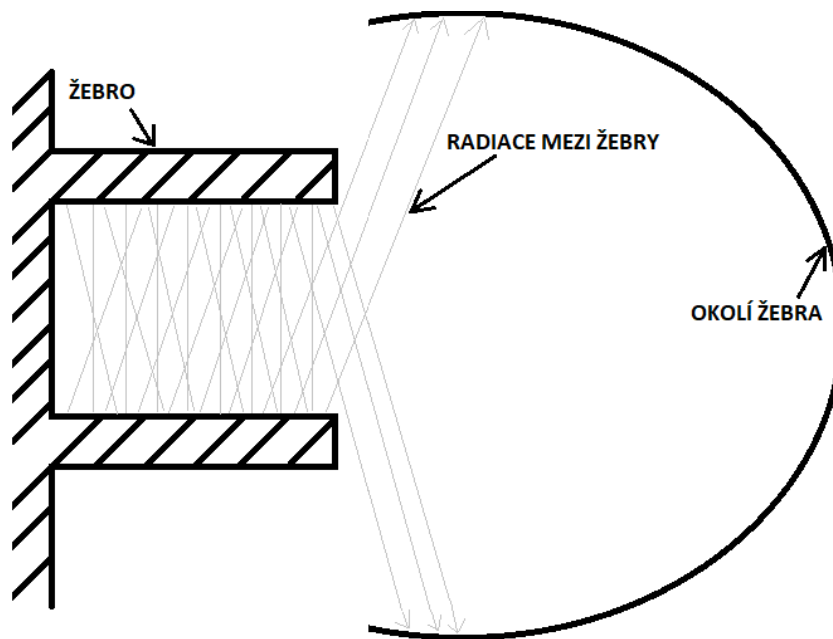
$$M_e = \alpha \cdot M_{e0} \quad (7)$$

Vyzařování dokonale černého tělesa M_{e0} závisí na jeho termodynamické teplotě T vztahem:

$$M_{e0} = \sigma \cdot T^4 \quad (8)$$

Výše uvedený vztah je nazýván tzv. Stefanův-Boltzmannův zákon fyzikální významem definuje vyzařování ven z tělesa.

Přenos tepla u detailu žebra probíhá mezi bočními povrchy žeber, koncem žebra a mezi-žebním prostorem. [5]



Obrázek 7: Fyzikální model detailu 2 žeber v radiačním krytu (příčný řez)

Na Obrázku 7, lze vidět, jak na sebe působí stěny vzájemným osáláním. Sálání do okolí je tedy z tohoto povrchu relativně malé. Radiační tepelný tok působící navzájem z jednoho žebra na druhé je stejný. Jak již bylo výše uvedeno, radiace závisí na rozdílu čtvrtých mocnin termodynamických teplot dvou povrchů, které na sebe působí. Toto působení je dáno součinitelem osálení. Osálení do okolí na stěny ve skladu je malé a žebra téměř sálají samy na sebe. Za předpokladu, že po délce žebra je teplota podobná, je radiační sdílení do okolí poměrně malé. Z hlediska sálání není podstatné, zda se jedná o vertikální nebo horizontální žebrovaný povrch [5].

Jak již bylo napsáno v kapitole skladování, když je zaplněný sklad, okolím jsou myšleny další CASTORY, které mají podobné teploty, a tedy i okolí žebrovaných, čímž jsou myšleny další povrchy OS, které mají přibližně stejné teploty, maximální sálání bude směřovat ke stropu místnosti, a tedy vzhledem k minimálnímu působení ho lze v následujících kapitolách zanedbat. [5]

Jak už bylo uvedeno, pro případ této práce bude podstatná hlavně konvekce, a samozřejmě radiace, která se při přirozeném ochlazování obalového souboru projevuje. Zde je tedy nutné radiaci zmínit.

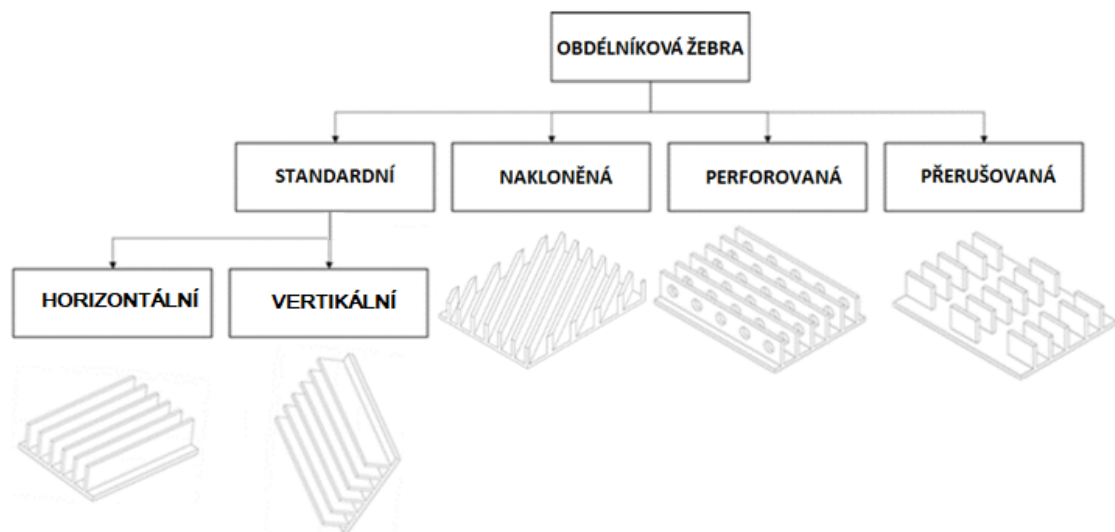
3.2 TEORIE PROBLEMATIKY ŽEBER

V této kapitole se zmiňují nejen pevná obdélníkové žebra, ale také pravoúhlá nakloněná žebra, perforovaného a přerušovaná, jak je patrné z Obrázku č. 8. Pro zvýšení odvodu tepla a při výpočtu Nusseltova čísla by konstruktér měl optimalizovat parametry, jako je počet žeber, tvar žeber, výška žeber, šířka žebra a rozteč mezi žebry. V procesu optimalizace těchto klíčových vlastností, by konstruktér měl mít zkušenosti s postupem navrhování žeber. Bez potřebných zkušeností a znalostí místo zvyšování odvodu tepla mohou povrchy žeber blokovat přichodící proud vzduchu, což ovlivní přenos tepla v negativním slova smyslu.

Pro mnoho průmyslových aplikací, kde existuje vnitřní zdroj tepla, který může způsobit problémy s přehřátím, což může mít za následek selhání systému, krátkou životnost stroje, potřebu údržby a nízkou spolehlivost systému. Zvládnout problémy s přehřátím, jak aktivní či pasivní metodou, je nezbytné. **Aktivní metody:** Zde je nutný výstupní výkon, jako je promíchávání tekutiny, vibrace, použití trysek. **Pasivní metody:** Geometrické nebo povrchové úpravy se většinou provádějí ve stávajících materiálech nebo jako jsou rozšířené povrchy, což je případ aplikace žeber a zdrsňené povrchy. Široce se upřednostňují pasivní řešení, protože se ukázala jako nákladově efektivní, nehlukná a bezproblémová řešení [1, 2]. Zvýšení plochy pro odvod tepla je jedna z pasivních metod, která je široce používaná v technických oborech zabývajících se energetickými přechody

vyžadujícími přestup tepla. Instalací žebra se zvyšuje koeficient konvekčního přenosu tepla nebo se zvyšuje oblast přenosu tepla povrchu, ochrana spolehlivosti a životnosti zařízení. Tak jako jsou snadno vyrobitelné, levné a osvědčily se efektivní žebrová pole, která se běžně používají ve výměnících tepla, lopatek plynových turbín, chlazení elektronických zařízení a další oblasti použití, které vyžadují vysoké rychlosti odstraňování tepelného toku [18].

Existuje mnoho typů geometrií žeber, jako jsou obdélníková, válcová, prstencová a čtvercová za účelem zvýšení přestupu tepla. Obdélníková žebra jsou nejvíce využívaným typem žeber vzhledem k jejich nízkým nákladům a snadné výrobě. Na obrázku č. 4 jsou typy obdélníkových žeber, která se používají ke zvýšení přenosu tepla v textu níže. Obdélníková žebra standardního typu jsou dobře zmapována v mnoha odborných publikacích. Nakloněná, perforovaná a střídavá obdélníková žebra jsou způsoby pro odvod tepla a byla uvedena v této práci jen okrajově. V souladu se zvýšením přenosu tepla musí být optimalizovány parametry, jako je počet žeber, tvar žeber, výška žeber, šířka žebra a rozteč mezi žebry. Tyto parametry již byli výše definovány.



Obrázek 8: Dělení obdélníkových žeber [19]

Z výše uvedeného Obrázku č. 8. vyplývá že u standardních žeber s vertikální základnou mohou být žebra instalována jak horizontálně, tak i vertikálně, což ve výsledku ovlivní přestup tepla z žeber do okolního prostředí.

3.2.1 EXPERIMENTÁLNÍ STUDIE PRO STANDARDNÍ OBDÉLNÍKOVÁ ŽEBRA [19]

Elenbaas představil první problém přirozené konvekce na paralelních deskách s vertikální základnou, a to jak numericky, také i experimentálně.

Byla zde provedena experimentální studie s žebry obdélníkového tvaru. Počet žeber v poli byl v intervalu od čtrnácti do sedmnácti v závislosti s měnící se šířkou žeber a mezerou mezi žebry. Z tohoto článku vyplývá, že rozteč a šířka žeber má přímý vliv na přestup tepla z žebra do okolního prostředí, a také nevhodná konfigurace žebra na povrchu může způsobit nižší koeficient přestupu tepla, oproti srovnání s případy bez žebra. V závěru bylo zjištěno, že k dosažení maximálního koeficientu přestupu tepla bylo docíleno díky úzkému rozestupu žeber mezi sebou, za předpokladu vertikálních žeber. Na rozdíl od horizontálně uspořádaných žeber na vertikální základně tato teorie nebyla potvrzena. Pro soustavu čtyř horizontálních žeber obdélníkového typu na svislé základně a působení přirozené konvekce prováděli experiment Welling a Wooldridge. Úzce rozmístěná žebra mají menší teplotní rozdíl v mezní vrstvě ve srovnání s široce rozmístěnými žebry. Zde tedy Welling and Wooldridge vyvodili stejný výsledek výzkumu Starnera a McManuse Harahap a McManus provedli experimentální studii, aby zjistili vliv roztečí žeber, šířky žebra a počet žeber za působení přirozené konvekce z povrchu do vzduchu, kde především sledovali, jak jsou široká žebra schopna odevzdat větší množství tepla. Korelace je navržena tak, jako je uvedena v rovnici (5) pro dostupná data z výzkumu:

$$(Nu)_{L,1} = C_1 \cdot \left[(Gr)_L \cdot (Pr) \left(\frac{n \cdot H}{S} \right) \right]^a \cdot \left(\frac{H}{L} \right)^b \cdot \left(\frac{S}{L} \right)^c \quad (9)$$

Pro parametry:

$$10^6 < \left[(Gr)_L \cdot (Pr) \left(\frac{n \cdot H}{S} \right) \right] \leq 2,5 \cdot 10^7 \quad (10)$$

Platí:

$$C_1 = 5,22 \cdot 10^{-8}, a = 0,57; b = 0,412; c = 0,656 \quad (11)$$

Pro parametry:

$$2,5 \cdot 10^7 < \left[(Gr)_L \cdot (Pr) \left(\frac{n \cdot H}{S} \right) \right] \leq 1,5 \cdot 10^8 \quad (12)$$

Platí:

$$C_1 = 2,787 \cdot 10^{-8}, a = 0,745; b = 0,412; c = 0,656 \quad (13)$$

Jones a Smith představili experimentální výsledky k optimalizaci uspořádání obdélníkových žeber pro přestup tepla přirozenou konvekcí. Leung a kol. porovnávali součinitel přestupu tepla s vertikálním i horizontálním uspořádáním pole žeber. Do experimentálního zkušebního zařízení zavedli rozměry pro různé vzdálenosti žeber, a to: 10 mm, 20 mm a 40 mm. Pro všechny rozteče žeber se drželo v mezižebním prostoru u horizontálních žeber více tepla než za předpokladu použití stejné geometrie u vertikálního uspořádání geometrie. V jiném výzkumu Leung et al. studoval experimentální prodloužení délky žebra vzhledem k tepelným ztrátám. V malých vzdálenostech oddělování žeber se zvětšuje celková plocha žeber. Také korelace publikovaná Harahapem a McManusem , kteří potvrdili tuto tézi ve své publikaci. Leung a Probert provedli experiment k měření účinku změny tloušťky žebra přestupu tepla u přirozené konvekce. Aby byla základní plocha stejná, při zmenšení tloušťky žeber je počet žeber zvýšen, takže je rovněž zvýšena oblast přenosu tepla. Na druhé straně u tenčího žebra dochází k poklesu teploty rychle, což způsobuje nižší lokální intenzitu tepelných ztrát. Kvůli této situaci autoři definovali tzv. kritickou tloušťku žebra, která odpovídá maximálnímu tepelnému přenosu.

Pro vertikální stěnu s horizontálními žebry [19]:

$$(Nu)_{L,2} = 0,116 \cdot [(Gr)_L' \cdot (Pr)]^{0,5} \text{ platí } (Gr)_L' Pr \leq 500 \quad (14)$$

$$(Nu)_{L,2} = 0,457 \cdot [(Gr)_L' \cdot (Pr)]^{1/3} \text{ platí } 500 \leq (Gr)_L' Pr \leq 10^6 \quad (15)$$

Kde upravené číslo Grashof (Gr') je definováno jako [12]:

$$(Gr)_L' = Gr \cdot \left(\exp \left(-\frac{k \cdot b}{k_f \cdot \delta} \right) \left(\frac{L}{(S \cdot b)^{0,5}} \right) \right) \quad (16)$$

Experiment pro definici upraveného Grashofova čísla, byl prováděn jako zkoumání vlivu materiálu žebra za předpokladu přirozené konvekce do okolí. Pro materiály dural s tepelnou vodivostí 160 W / mK a nerezová ocel s tepelnou je dána vodivost 14 W / mK. Výsledky naznačují, že nerezová ocelová pole žebor mají o něco nižší přenos tepla než duralová pole žebor s podobnou geometrií. Vzdálenost mezi žebry je téměř nezávislá na materiálu žebra. Experimentálním výzkumem Babus'Haget zjistil, že tepelná vodivost materiálu žebor má na rychlost přestupu tepla jen minimální vliv. Rovněž potvrdil, že materiál žebra nemá na rozestup žebor žádný vliv. Harahap a Setio zkoumali korelaci, ke které dospěli metaanalýzou na základě dosažené korelace:

$$=$$

$$(Nu)_{L,3} = C_2 \cdot \left[(Gr)_L \cdot (Pr) \left(\frac{n \cdot H}{S} \right) \right]^a \cdot \left(\frac{H}{L} \right)^b \cdot \left(\frac{S}{L} \right)^c \cdot \left(\frac{S}{w} \right)^d \quad (17)$$

Pro parametry:

$$2 \cdot 10^6 < \left[(Gr)_L \cdot (Pr) \left(\frac{n \cdot H}{S} \right) \right] \leq 2 \cdot 10^7 \quad (18)$$

Platí:

$$C_2 = 1,86 \cdot 10^{-4}, a = 0,576; b = 1,812; c = 0,656; d = 0,755 \quad (19)$$

Pro parametry:

$$2 \cdot 10^7 < \left[(Gr)_L \cdot (Pr) \left(\frac{n \cdot H}{S} \right) \right] \leq 2 \cdot 10^8 \quad (20)$$

Platí:

$$C_2 = 1,15 \cdot 10^{-3}, a = 0,875; b = 0,812; c = 0,656; d = 0,755 \quad (21)$$

Dogan a Sivrioglu navrhli experimentální sestavu pro sledování vlivu rozestupu žeber, výšky žeber a velikost tepelného toku při přestupu tepla za předpokladu dominance přirozené konvekce. Z výzkumu Dogan a Sivrioglu bylo Reynoldsovo číslo 250 a Richardsonovo číslo mezi 600 a 15 000, díky čemuž zjistili, že se zvýšením výšky žebra dojde ke zvýšení rychlosti přenosu tepla. Vědci Dogan a Sivrioglu proto definují optimální prostor jako tzv. mezižeburní interval. Za předpokladu snížení vzdálenosti mezi žebry pod optimální hodnotu žebra se rozvinuté hraniční vrstvy na žebrovaném povrchu prolínají, a tento průnik blokuje vstup studeného vzduchu do mezižeburního prostoru. Ve své druhé studii Dogan a Sivrioglu upřesnili, když je Reynoldsovo číslo kolem 1500 a Richardsonovo číslo je mezi 0,4 a 5, tak to odpovídá smíšenému režimu proudění konvekce. V této studii je Nusseltovo číslo definováno korelací, která je funkcí Re , Gr a geometrickými parametry žebra. Hong a Chung provedli numerickou a experimentální analýzu přirozené konvekce na žebrované desce. Byly stanoveny tři různé vzdálenosti žeber od sebe, aby se sledovala efektivnost žebra. Bylo zjištěno, že existuje optimální rozsah roztečí žeber pod sebe, kde je přestup nejvyšší, a mimo tento rozsah je přenos tepla vždy nižší. Ayli a kol. sledovali přenos tepla z podélných žeber ve čtvercovém horizontálním kanálu, a to experimentálně a numericky pro turbulentní plně vyvinutý tok. Korelace je vyvinuta a porovnána s experimentálními výsledky v jejich článku.

ZÁVĚR KAPITOLY

Soustavou obdélníkových žeber až do kritického rozestupu hodnota koeficientu přestupu tepla stoupá, poté se zvětšujícím se rozestupem žeber klesá. Při rozteči žebra, sníženého pod optimální hodnotu, se vytvořené mezní vrstvy na žebrech protínají, a tento prostor blokuje vstup vzduchu mezi žebry, což je negativní vliv, jelikož je potřeba dosáhnout maximálního odvodu tepla.

Z vědeckých článků bylo zjištěno, že tato kritická hodnota je funkcí Rayleighova čísla a geometrických parametrů žebra.

Důležité parametry, které ovlivňují přenos tepla, jsou geometrie žeber, délka žeber, šířka žeber a počet žeber.

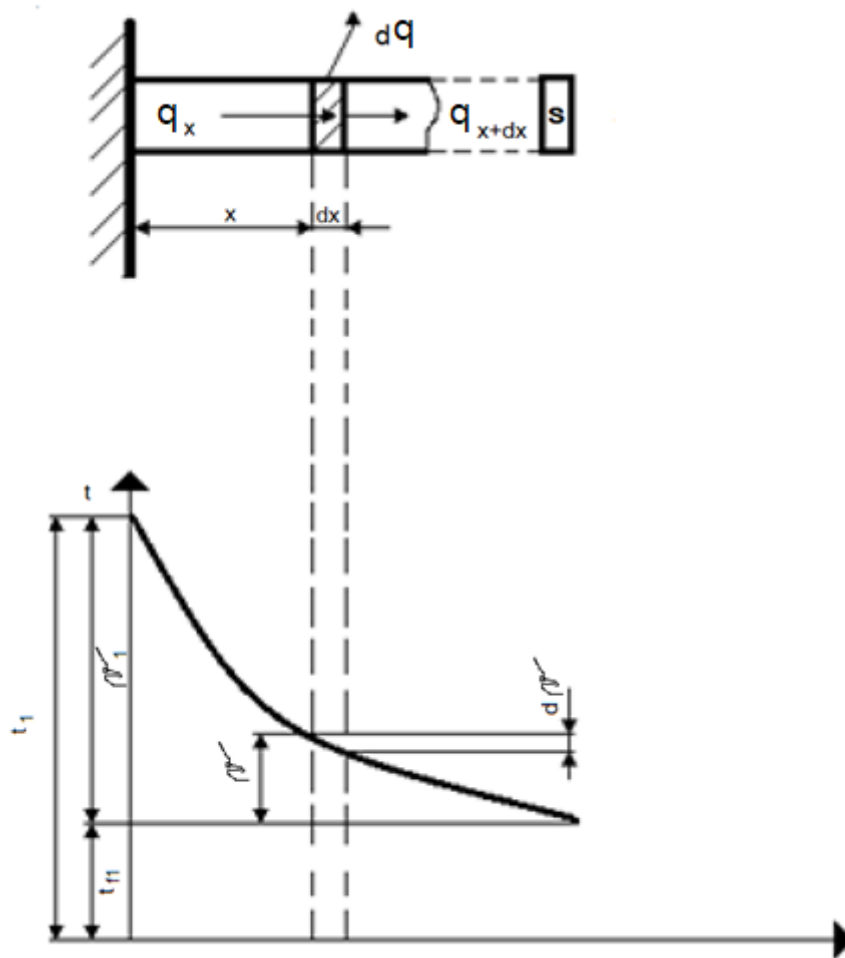
Z literatury [19] jsou převzaty korelace a empirické rovnice, které byly vyvinuty k reprezentaci pro přirozenou konvekci a přenos tepla z horizontální desky. V tabulce č. 4 jsou zdůrazněny korelace z výše uvedeného textu, se kterými budeme počítat v analytickém výpočtu pro srovnání výsledků měření.

Tabulka 4: Shrnutí použitých korelací pro vlastní analytický výpočet

Korelace:	Vztah:
Harahap & McManus	$(Nu)_{L,1} = C_1 \cdot \left[(Gr)_L \cdot (Pr) \left(\frac{n \cdot H}{S} \right) \right]^a \cdot \left(\frac{H}{L} \right)^b \cdot \left(\frac{S}{L} \right)^c$
Bar & Cohen	$(Nu)_{L,2} = 0,116 \cdot [(Gr)_L' \cdot (Pr)]^{0,5} \text{ platí } (Gr)_L' Pr \leq 500$ $(Nu)_{L,2} = 0,457 \cdot [(Gr)_L' \cdot (Pr)]^{1/3} \text{ platí } 500 \leq (Gr)_L' Pr \leq 10^6$
Harahap & Setio	$(Nu)_{L,3} = C_2 \cdot \left[(Gr)_L \cdot (Pr) \left(\frac{n \cdot H}{S} \right) \right]^a \cdot \left(\frac{H}{L} \right)^b \cdot \left(\frac{S}{L} \right)^c \cdot \left(\frac{S}{w} \right)^d$

3.2.2. VEDENÍ TEPLA V JEDNODUCHÉM IDEÁLNÍM ŽEBRU [13]

Žebro je ochlazováno rovnoměrně ze všech stran proudícím médiem, které má teplotu $t_f = konst.$ Rovněž součinitel přestupu tepla po celém povrchu žebra se uvažuje $\alpha = konst.$ Pro případ s jedním žebrem, jelikož se jedná o ideálně tenké žebro, se může říci, že teplota žebra se po jeho průřezu nemění. Je tedy konstantní. Mění se jen ve vzdálenosti X od stěny, jak naznačuje Obrázek č. 9, ze kterého je patrný průběh teploty po délce. Jako exponenciální funkce jen závisí, zda odvádíme nebo přivádíme teplo žebrem. [13]



Obrázek 9: Detail jednoduchého tenkého tyčového žebra, obdélníkového průřezu, přivařené na levé straně ke stěně, jejíž povrch má zvětšit [13]

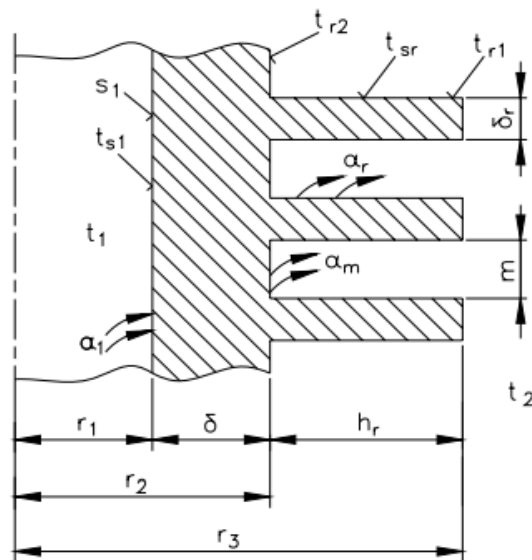
Pro výpočet se může s výhodou používat rozdílu teplot žebra a okolní tekutiny mající teplotu $t_f = konst.$ Tedy rozdíl teploty u kořene žebra se označí $t_1 - t_f = \vartheta_1$ a v dané vzdálenosti x od stěny $t - t_f = \vartheta$

3.2.3 VEDENÍ TEPLA POLEM ŽEBER []

V případech, kdy je třeba sdílet teplo z média s vysokým součinitelem přestupu tepla do média s nízkým součinitelem přestupu tepla, je velikost aparátu určena nižším z obou součinitelů. Pokud by zařízení bylo vybudováno z hladkých teplosměnných ploch, bylo by neúměrně velké. Tento problém se řeší tak, že se zvětšuje teplosměnný povrch pouze na straně s větším tepelným odporem, tedy menším součinitelem přestupu tepla. Nejsnáze lze zvětšit povrch tím, že se příslušná strana opatří žebry.

V případě, že při přestupu tepla na obou stranách stěny řadově liší součinitele přestupu tepla, závisí součinitel prostupu tepla stěnou vždy na menší z obou hodnot přestupu tepla a celkový přenos tepla je tak málo účinný.

Jednou možností, jak tuto účinnost zvýšit, je zvětšení kontaktního povrchu stěny s médiem na straně s malým součinitelem přestupu tepla. To lze dosáhnout žebrováním povrchu stěny.



Obrázek 10: Žebrování na trubce [21]

3.2.4 ÚČINNOST SOUSTAVY ŽEBER [18]

Je-li žebrovaná válcová či rovinná stěna, přes kterou prochází tepelný tok, teplota žeber je největší u jejich paty a klesá se vzdáleností od stěny. Části žeber blíže ke stěně tak odvádějí více tepla do okolí než konec žeber, za předpokladu konstantní teploty a konstantního přestupu tepla. Poměr tepelného toku \dot{Q}_{sr} , který skutečně přestupuje z žeber do tekutiny, a toku $\dot{Q}_{sr MAX}$, který by přestupoval, kdyby teplota žeber byla na celém jejich povrchu stejná, se nazývá účinnost žebrování:

$$\eta_r = \frac{\dot{Q}_{sr}}{\dot{Q}_{sr MAX}} = \frac{\alpha_r \cdot S_r (t_{sr} - t_2)}{\alpha_r \cdot S_r (t_{r2} - t_2)} = \frac{t_{sr} - t_2}{t_{r2} - t_2} \quad (22)$$

Celková plocha stěny s žebrováním S_2 , kterou dochází k přenosu tepla, se skládá z plochy žeber S_r , a plochy mezer mezi nimi S_m . Pokud součinitelé přestupu tepla jsou $\alpha_1 \gg \alpha_2$, tepelný tok přestupující z žebrovaného povrchu je:

$$\dot{Q}_{sr} = \alpha_2 \cdot S_2 (t_{r2} - t_2) \quad [W] \quad (23)$$

Ekvivalentní součinitel přestupu tepla α_2 je dán ze vztahu:

$$\alpha_2 = \alpha_m \cdot \eta_{sr} \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (24)$$

Kde η_{sr} je účinnost žebrování, určovaná rovnicí

$$\eta_{sr} = 1 - \frac{S_r}{S_2} \left(1 - \eta_r \cdot \frac{\alpha_r}{\alpha_m} \right) \quad (25)$$

Kde α_m je součinitel přestupu tepla povrchu mezer $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

3.2.5 EFEKTIVITA SOUSTAVY ŽEBER [18]

Prostup tepla rovinnou žebrovanou stěnou lze vyjádřit těmito rovnicemi:

$$\dot{Q}_{sr} = k_1 \cdot S_1 (t_1 - t_2) = q_1 \cdot S_1 [W] \quad (26)$$

$$\dot{Q}_{sr} = k_2 \cdot S_1 (t_1 - t_2) = q_2 \cdot S_2 [W] \quad (27)$$

Součinitel prostupu tepla vztahující se k povrchů, bez žeborů S_1 a se žebry S_2

$$k_1 = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot \psi} \right)^{-1} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (28)$$

$$k_2 = \left(\frac{\psi}{\alpha_1} + \frac{\delta \cdot \psi}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (29)$$

Kde ψ je součinitel žebrování předepsán vztahem

$$\psi = \frac{S_2}{S_1} [1] \quad (30)$$

Odtud je vidět, že odpor proti přestupu tepla $1/\alpha_2$ se žebrováním povrchu zmenší na hodnotu $1/(\alpha_2 \cdot \psi)$, tedy ψ krát. Omezující podmínkou hodnoty ψ však je, že tepelný odpor $1/(\alpha_2 \cdot \psi)$, nesmí být menší než tepelný odpor $1/\alpha_1$

4. VÝPOČETNÍ SYSTÉM CFD

CFD (Computational Fluid Dynamics) je výpočetní metoda, která umožňuje modelovat dynamiku proudění kapalin a plynů [22], [23]. CFD se používají pro proudění a přenos tepla.

Kromě toho však dokáže počítat s přestupem tepla či hmoty a další fyzikální a chemické jevy. Některé kódy mohou počítat i s chemickými reakcemi, fázovými změnami, mechanickým pohybem a napětím i deformací pevných materiálů [5]. Záleží na konkrétních případech kódů. Výhodou CFD analýz je vytvoření virtuálního modelu, který lze posléze analyzovat. Výsledkem výpočtu pro daný model je zjištění teplotního, tlakového a rychlostního pole, ale i další termo-fyzikální vlastnosti.

Vznik CFD, aktuální rozvoj a patrné budoucí využití je pevně spjato s rozvojem hardwarových technologií a neustálým zvyšováním výpočetních kapacit. Proto by CFD mělo v budoucnu být schopné dostatečně přesně a rychle počítat konvekci v reaktorech, OS, a tím přispět ke zvýšení jaderné bezpečnosti. Rozsáhlé využívání těchto kódů se uplatňuje např. ve stavebnictví, automobilovém průmyslu, ale také k návrhu potrubních a armaturních systémů. K analýze proudění se různé numerické výpočetní kódy začaly využívat již v 60. letech 20. století, nejdříve jako 2D, později v 80. letech se vyvinuly do dnešní podoby. Výpočetní kódy umožňují 2D a komplexnější 3D geometrii a je jen na uživateli, pro které se rozhodne. Poprvé byly hromadně využívány v leteckém průmyslu.

Všechny výpočetní kódy jsou založeny na metodě převodu diferenciálních rovnic na diferenciální rovnice. Tyto metody mohou být např. metoda konečných prvků, metoda konečných objemů, metoda konečných sítí a další. Obecně se dá konstatovat, že většina CFD kódů využívá pro řešení úlohy metodu konečných objemů. Liší se matematickými i fyzikálními modely.

Postup při tvorbě CFD modelu:

PŘÍPRAVA (Preprocessing)

Uživatel zde vytváří geometrii modelu s využitím CAD (Computer aided design), nebo může vložit již předpřipravenou geometrii z CADového editoru. Mnohdy je nutné zjednodušit skutečnou geometrii modelů proto, aby nedocházelo ke zvyšování nároků na výpočetní techniku. Další fází preprocessingu je vygenerování sítě, stanovení hraničních podmínek a definování materiálových vlastností

ŘEŠENÍ (Solving)

Jsou nastaveny matematické podmínky výpočtu, výběr z různých matematických modelů. Je zde možné nastavit matematické modely, konvergenční kritéria a jiné vlastnosti. Závěrem pak probíhá samostatný výpočet.

VYHODNOCENÍ (Postprocessing)

V posledním kroku se jedná o vhodnou analýzu výsledků.

Při numerickém modelování mohou vzniknout modelovací chyby. Ke zjištění přesnosti je dobré je doplnit analytickým výpočtem nebo dalším numerickým výpočtem v kódu, který je založen na jiném matematickém principu. Ke zjištění přesnosti je důležitá citlivostní analýza zaměřená na volitelné parametry. Avšak nejlepší je srovnání s aktuálními daty nebo již naměřenými hodnotami konkrétního modelu. Analytickým výpočtem řešené geometrie se zabývá kap. 5.

4.1 ANSYS [24]

Společnost ANSYS vyvíjí rozsáhlé množství simulačních softwarů. Používají se především k předvídání chování produktů v reálném prostředí a k jejich samotnému návrhu. Jedním z mnoha produktů této společnosti je simulační software Fluent. Obsahuje široké možnosti modelování, dynamiku proudění tekutin, přenosu tepla aj. Problematika přenosu tepla v prostředí ANSYS Fluent je řešena dle rovnice přenosu energie, rovnice pro zachování hmotnosti, hybnosti, a také rovnice pro počítání chemických reakcí. Řešení Navierovy-Stokesových rovnic probíhá metodou konečných objemů, řešení je prováděno adaptivní multigradní metodou. V modelu přenosu tepla lze detailně nastavit 5 hraničních

podmínek, tepelný tok, teplotu, proudění, záření a kombinaci proudění a radiace s okrajovými podmínkami. Ve výpočtech lze zahrnout vliv šíření tepla vedením, prouděním a radiací. Důležitým prvkem tohoto nástroje je definování tepelné kapacity, hustoty, emisivity a vodivosti v závislosti na teplotě.

Nové uživatelské prostředí ANSYS Workbench je pro uživatele velmi přívětivé a snadno ovladatelné. Starší verze je ovládána pomocí skriptů a pro laika je velice nepřehledná.

Balíček podprogramů, který obsahuje ANSYS řeší spousty úloh od termodynamiky, elektromagnetických polí až po chemické reakce. Zde jsou uvedeny úlohy jednotlivých podprogramů spojené s řešeným problémem.

4.1.1. DESIGNMODELER

Jedná se o podprogram pro tvoření geometrie modelu. Pro osobu pracujícího 3D a 2D CAD softwaru jako SolidWorks, Catia, ProE se může zdát DesignModeler dosti nepřehledný a nevhodný pro složitost ovládání. Zde je možné importovat model ze široké škály 3D CAD softwarů. Tento program má nepřehledné zobrazení ve stromu osnovy, kde nelze měnit umístění prvků, těles ani pojmenovaných oblastí, i přesto, že na sobě nejsou závislé. Je proto vhodné provést veškeré úpravy geometrie v původním softwaru a do DesignModeleru nahrát již model, který je potřeba minimálně upravovat, například uzavřít model, nebo sečíst tělesa. Při modelování je také důležité mít pojmenované oblasti. To je z důvodu přehlednosti lepší provést až v Mechanical APDL. Nahraný soubor nesmí mít přesahy materiálů. DesignModeler je exportuje do dalšího podprogramu, kde již budou při výpočtech vznikat chyby.

Při tvorbě modelu je základem stanovení soustavy jednotek, se kterými se bude pracovat. Dále uživatel zvolí rovinu a v záložce sketching se vybírají geometrické útvary pro vytvoření skici. Skica se vytvoří pomocí 4 základních způsobů vysunutí do prostoru, které jsou uvedeny v záložce create.

4.1.2. MECHANICAL

Slouží pro tvorbu sítě v modelu, která je po připojení DesignModeleru importována do prostředí. V tomto programu se můžou potlačit prvky, které nechceme v úloze řešit. Dále se vybere v postranním okénku ikona Mesh a v jejím detailu se vybere řešený problém, jemnost sítě a její vyhlazování. Další možností je nastavení velikosti elementu na zvolený povrch či objem pomocí funkce sizing. Spuštění tvorby sítě je příkazem generate mesh.

4.1.3. CFX

V tomto podprogramu se řeší proudění kapalin a plynů. Při spuštění buňky setup se spustí soubor CFX-Pre, kde se importuje mesh z Mechanical. Zde je potřeba stanovit typ úlohy (statická, přechodová) v záložce Analysis Type. Poté je vhodné vymazat automaticky vygenerované domény (to lze přenastavit) a vytvořit pro každé těleso s odlišným materiálem novou doménu.

V doméně vzduchu a kapaliny se nastaví okrajové podmínky wall, inlet, outlet a open. Zde je možné nastavit vstupní, výstupní parametry prostředí (tlak, rychlost aj.). Je-li povrch označen jako wall, je pevný a neprochází jím žádné proudící médium, což znamená, že je to překážka. Záložka interface nastavuje přechody mezi prostředími ze vzduchu do pevného tělesa aj.

V ikoně Solver Control se nastaví přesnost iterace a počet kroků iterace při výpočtu. První dosažená hodnota (počet, přesnost) vypne iterační proces. CFX-Pre je nyní možné vypnout a spustit buňku Solution.

V Solution se zobrazí list s místem uložení výstupní složky a s volbou počtu aktivních procesorů během výpočtu v záložce Run Mode. Po spuštění výpočtu je možné sledovat křivky přesnosti výpočtu turbulencí, tepelných přenosů a případně i přenosů hmoty, což není náš případ.

Po dokončení výpočtu se aktivuje buňka Result, kde se v horní liště vybere způsob zobrazení počítané veličiny. Pro plošné zobrazení je vhodná volba Contour a pro zobrazení proudnic se vybere Streamline nebo Vector.

4.1.4. THERMAL ANALYSIS

Je tvořena ve stejném prostředí jako mesh, tj. Mechanical, a slouží pro řešení statického a tranzientního přestupu tepla v tělese. Materiály je potřeba nadefinovat v buňce Engineering Data, kde se materiály vyberou z knihovny, nebo se definují z tabulek Microsoft Excel pro případ nelineárních charakteristik. Dále se importuje geometrie a spustí se Mechanical.

V záložce Geometry se vybere potřebný materiál nadefinovaný v Engineering Data a vytvoří se síť v záložce Mesh. Ve složce Steady-state / Transient Thermal Analysis se vybere způsob zadání zdroje tepla (teplotou, teplem, výkonem) a importuje se informace z CFX, tedy: teplota, koeficient přestupu tepla aj. To musí být připojeno. Těmto přeneseným informacím jsou přiřazeny plochy, na které se zátěž přenese.

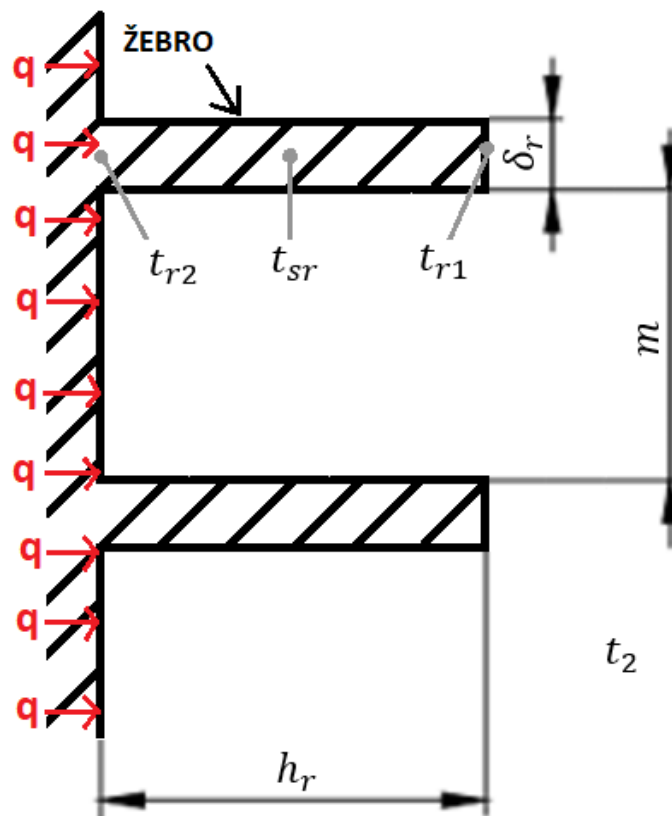
V poslední záložce Solution se vybere hledaný parametr (teplota, tepelný tok) a spustí se řešení analýzy.

5. MODELOVÝ VÝPOČET

Jako modelový případ dle [5] bude standardní soustava žeber na vertikální stěně, s konstantním tepelným tokem jak lze vidět na Obrázku . 11.

5.1 GEOMETRIE MODELU

V této kapitole je potřeba si definovat zjednodušenou geometrii žebrovaného povrchu potřebnou pro výpočet v Kapitole 5.2 [6], kde jsou rozměry a další veličiny zřejmé z Obrázku 11.



Obrázek 11: Rozměry a další veličiny modelovaného žebrovaného povrchu

Na výše uvedeném obrázku z levé strany působí generovaný tepelný tok, který je celou plochou žebra a mezi-žebním prostorem odváděn do okolí. Geometrie žebra je pro tyto případy aproximovaná do jednoduchého obdélníkového žebra o dané délce žebra, o šířce žebra, ale také vzdáleností mezi žebry a tloušťkou stěny. Ze simulace bude patrná maximální teplota na žebrovaném povrchu, kterou je pro nás teplota v mezi-žebním prostoru,

střední teplota žebra, a v závěru teplota žebra, na konci které bude zároveň teplota také minimální.

V níže uvedené tabulce jsou uvedeny přesné hodnoty pro zjednodušený analytický výpočet, které jsou převzaty z [3] a jsou opraveny či doplněny dle [5].

Tabulka 3: Základní parametry žebrovaného povrchu dle Obrázku č. 11

VELIČINA	VÝZNAM	VELIKOST
δ	TLOUŠŤKA STĚNY OS	415 mm
h_r	DÉLKA ŽEBRA	30 mm
δ_r	ŠÍŘKA ŽEBRA	7,5 mm
m	VZDÁLENOST MEZI ŽEBRY	7,5 mm
λ	SOUČINITEL TEPELNÉ VODIVOSTI LITINY	36 W/mK
t_2	TEPLOTA OKOLNÍHO VZDUCHU	25°C
q	PLOŠNÁ HUSTOTA TEPELNÉHO TOKU OS	1000 W/m ²

5.2 ZJEDNODUŠENÝ ANALYTICKÝ VÝPOČET

Analytickým výpočtem v této kapitole bude srovnání s výsledky numerického výpočtu v kapitole 5.3. Celá tato kapitola vychází z korelací kap. 3.2.1. OS TYPU Castor 440/84M je dle výrobce konstruován na maximální přípustný výkon <30 kW. Výpočet je pro proudící médium vzduch o teplotě 25 °C. Všechny korelace počítají Nusseltovo číslo, kde je díky teplotám na povrchu a v okolí možno vypočítat součinitel přestupu tepla a díky Newtonovu vztahu poté dopočítat tepelný tok. Ten byl měl vzhledem ke zjednodušení, které zde bylo aplikováno, korespondovat řádově se zadaným tepelným tokem. Tedy analytický výpočet by měl s určitou přesností odpovídat numerickému. Teplota povrchu stěny pro výpočet byla použita 115°C, další iterace již nebyly aplikovány. [5]

U první korelace tedy rovnice č. 31 vychází z charakteristických rozměrů žebra a korelačních konstant. Jelikož je splněna podmínka, tak použití vztahu udávané autory a může

být spočítáno Nusseltovo číslo (Nu), součinitel přestupu tepla (α_1) a následně tepelný tok (q_1).

$$(Nu)_{L,1} = C_1 \cdot \left[(Gr)_L \cdot (Pr) \left(\frac{n \cdot H}{S} \right) \right]^a \cdot \left(\frac{H}{L} \right)^b \cdot \left(\frac{S}{L} \right)^c \quad (31)$$

$$(Gr)_L = \frac{\frac{1}{T} (T_p - T_\infty) \cdot g \cdot L^3}{\nu^2} = 2,36 \cdot 10^5 \quad (32)$$

$$(Gr) \cdot (Pr) \cdot \left(\frac{n \cdot H}{S} \right) = 1,16 \cdot 10^8 \quad (33)$$

$$(Nu)_{L,1} = 5,25 \quad (34)$$

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda}{L} = 4,45 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (35)$$

$$q_1 = \alpha (T_p - T_\infty) \quad (36)$$

$$q_1 = 400,05 \text{ W/m}^2 \quad (37)$$

U druhé korelace Bar & Cohen [19] je definováno Modifikované Grasshoffovo podobnostní číslo, které se přepočítává na základě charakteristických rozměru a konstant z článku [19]. Jelikož je splněna také podmínka $500 \leq (Gr)_L' Pr \leq 10^6$, může být spočítáno Nusseltovo číslo, součinitel přestupu tepla a následně může být ověřena plošná hustota tepelného toku.

$$(Nu)_{L,2} = 0,457 \cdot [(Gr)_L' \cdot (Pr)]^{1/3} \quad (38)$$

$$(Gr)_L' = Gr \cdot \left(\exp \left(-\frac{k \cdot b}{k_f \cdot \delta} \right) \left(\frac{L}{(S \cdot b)^{0,5}} \right) \right) = 2,34 \cdot 10^3 \quad (39)$$

$$(Nu)_{L,2} = 5,41 \quad (40)$$

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda}{L} = 4,58 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (41)$$

$$q_2 = 412,5 \text{ W/m}^2 \quad (42)$$

Třetí korelace vychází také ze stejného Grasshoffova podobnostního čísla. Je splněna podmínka pro použití vztahu Nusseltova podobnostního čísla. Díky Rayleighovu podobnostnímu číslu je hodnota Nusseltova podobnostního čísla vysoká a z toho vycházející vysoká plošná hustota tepelného toku.

$$(Nu)_{L,3} = C_2 \cdot \left[(Gr)_L \cdot (Pr) \left(\frac{n \cdot H}{S} \right) \right]^a \cdot \left(\frac{H}{L} \right)^b \cdot \left(\frac{S}{L} \right)^c \cdot \left(\frac{S}{w} \right)^d \quad (43)$$

$$(Nu)_{L,3} = 206 \quad (44)$$

$$\alpha_3 = \frac{Nu_3 \cdot \lambda}{L} = 174,4 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (45)$$

$$q_3 = 15\,697 \text{ W/m}^2 \quad (46)$$

Takto vysoká plošná hustota tepelného toku resp. Nusseltova čísla může být zapříčiněna velikostí aparátu. Jak uvádí sám autor [19], je vhodná pro velká žebra. Dle Tabulky č. 3 počítáme s žebry OS která jsou poměrně malá. Jako další parametr, který ovlivňuje Nusseltovo číslo je počet žeber, počítáme zde jen s 5, každopádně ve skutečnosti jich je podstatně více.

Závěrem této kapitoly o vlastním analytickém výpočtu je potřeba zmínit, že je potřeba definovat, na základě jaké plochy se vychází s plošnou hustotou tepelného toku. Jak bylo již uvedeno výše, vychází se zde z přípustného výkonu 30 kW. Pro potřeby této práce byl plášť OS s žebry aproximován do desky se soustavou žeber. Tepelný tok je uveden v numerickém výpočtu a je vztažen pouze na plášť OS. Za předpokladu využití rozměrů OS, tj. výšky 4,170 m a poloměru 1.33 m, je celková plocha OS včetně pláště, resp. obou podstav, 34,83 m², resp. 11,11 m², v součtu tedy 45,94 m². Zde by bylo možné ještě vztáhnout celkovou plochu pro odvod zbytkového tepla na celou plochu OS, tedy 45,94 m², což odpovídá plošné hustotě tepelného toku 653 W/m². Použitá korelace číslo 1 a 2 se tomuto výsledku blíží alespoň řádově, kde nám vyšly plošné hustoty tepelných toků 400 W/m² a 412 W/m². Je tomu tak na rozdíl od korelace číslo 3, kde již vyšlo velké Nusseltovo číslo a tedy tepelný tok, který se neshoduje ani řádově s výsledným tepelným tokem, který jde skrz stěnu OS, jak je uvedeno ve zdroji [7]- Autor spočítal z analytického výpočtu tepelný tok skrz stěnu OS na 608,5 W/m².

5.3 MODEL PRO NUMERICKÝ VÝPOČET

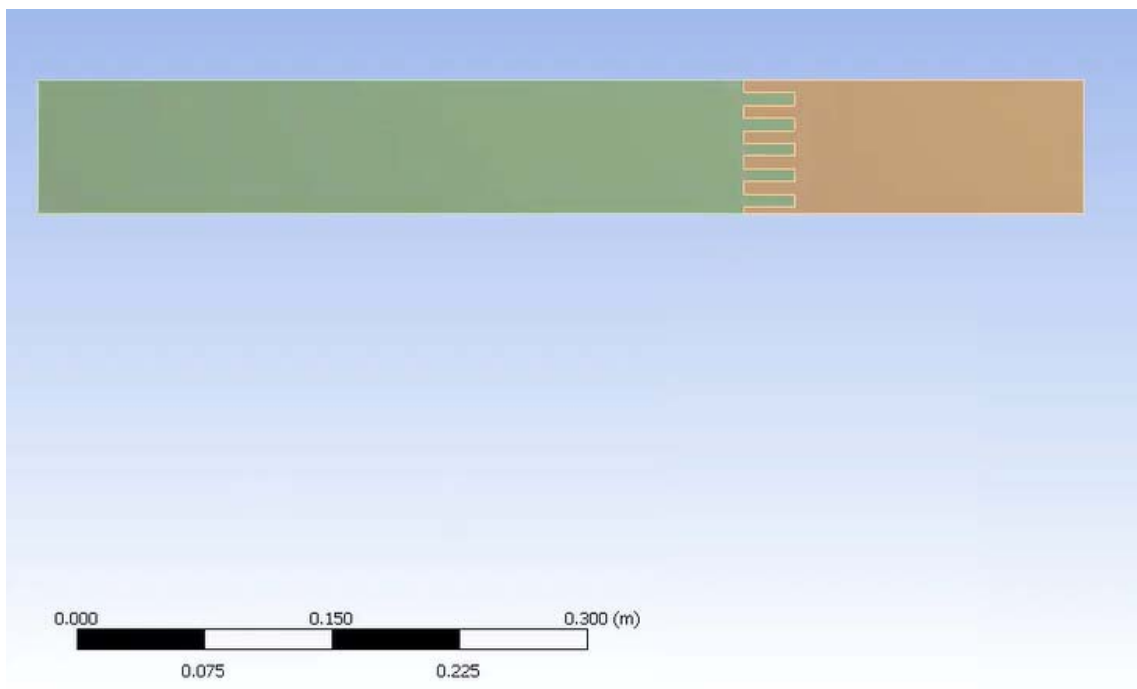
Konvekce v OS má prostorový charakter a nachází se v neizotropním prostředí, které je tvořeno soustavou diametrálně jiných materiálů s různými termo-fyzikálními vlastnostmi. Dodržet tyto podmínky není v rámci tohoto řešení možné. Bude proto přistoupeno k formulaci zjednodušujících předpokladů, jejichž účelem je umožnit analytické řešení teplotního pole ve stěně kontejneru. Výsledné teplotní pole se však bude odchylovat od skutečného. Lze však na druhou stranu odhadnout, jak bude výsledek ovlivněn.

Praktickou částí této práce je CFD výpočet soustavy žeber. Model žeber byl tedy volen s ohledem na výše popsanou kapitolu číslo 4 a na množství údajů k nim dostupných,

zejména tak, aby se dalo dosáhnout porovnání analytického výpočtu s výsledky tohoto numerického výpočtu. Numerický výpočet byl zjednodušen na 2D geometrii a aproximován rovinnou stěnou, oproti skutečnosti, kde se jedná o 3D geometrii a válcovou stěnu.

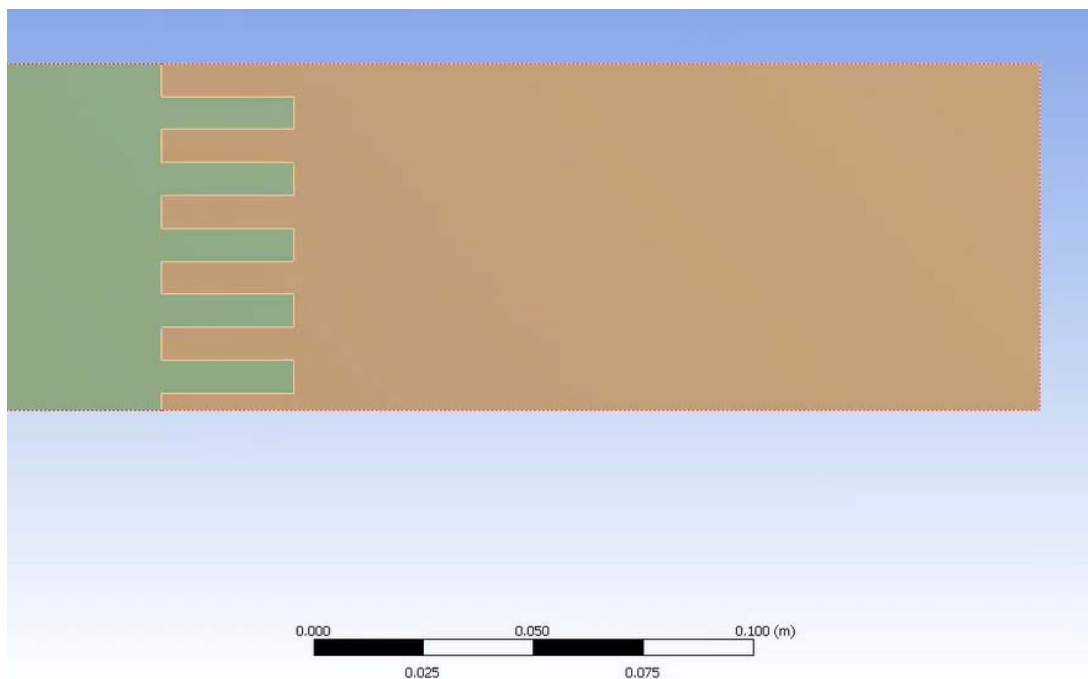
GEOMETRIE A VLASTNOSTI VÝPOČTU

Jak lze vidět na Obrázku č. 12, jedná se o 2D (Simulace vychází jen z 2dimenzionálního zobrazení oproti reálnému 3dimenzionálnímu) rovinnou geometrii, jelikož skutečný povrch by byl na model příliš velký. Složitými výpočty dle zadání jde jen poukázat na model srovnatelný s analytickým výpočtem. Je potřeba podotknout, že se jedná o velice zjednodušenou geometrii oproti skutečnosti. Geometrie nepředstavuje model OS, představuje jen model povrchu. Proto byla pro jednoduchost výpočtu použita jen soustava 5 žeber. Na Obrázku 12 lze vidět zelenou barvou znázorněný OS.



Obrázek 12: Geometrie soustavy pěti žeber

Levou vertikální stěnou je dána plošná hustota tepelného toku, což je hraniční podmínka. Plošná hustota tepelného toku prochází stěnou OS, odkud přes materiál OS prostupuje až na povrch. Zdev tomto případě o soustavě pěti žeber. Hnědou barvou je reprezentován vzduch, do kterého přestupuje teplo z žeber přirozenou konvekcí. Rozměry žeber jsou zadány dle Tabulky č. 3. Z rozměru je patrné, že i u žeber došlo ke zjednodušení a při výpočtu se počítá s obdélníkovými žebry, jak lze vidět z Obr, č. 13. Je to rozdíl proti skutečnosti, kde jsou žebra zkosená, a to jak z důvodu výroby, tak i z důvodu efektivnějšího odvodu tepla.



Obrázek 13: Detail geometrie soustavy pěti žeber

Úloha je zadána plošnou hustotou tepelného toku, na základě které je vypočítáno teplotní pole at' už ve vlastní stěně, žebrou, nebo ve vzduchu. Hraniční podmínka teploty okolního prostředí je 25 °C jakožto střední hodnota teploty ve vyhlášece [15], a to 38 °C a -40 °C.

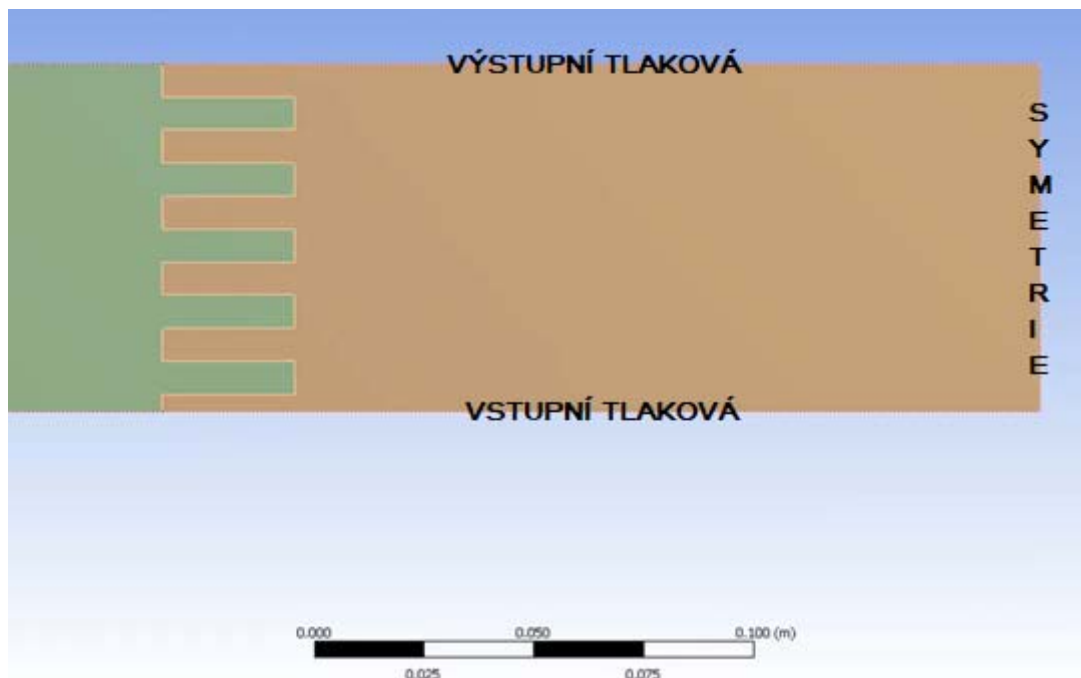
Zde je definována pouze problematika přirozené konvekce bez dalších vlivů jako radiace nebo dalších konvekcí, které reálně vznikají díky průvanu v meziskladě, kde je OS skladován. Termofyzikální vlastností dominujícího prvku v OS je litina, a vlastnosti vycházející jsou v Obrázku č. 14. Přesné vlastnosti litiny, vzhledem k tomu, že jde o stacionární výpočet, nejsou třeba. Proto jsou zvoleny průměrné vlastnosti litiny.

Common Material Properties	
Density	7150 kg/m ³
Young's Modulus	7e+08 Pa
Thermal Conductivity	36 W/m·°C
Specific Heat	430 J/kg·°C
Tensile Yield Strength	7.8886e-31 Pa
Tensile Ultimate Strength	2.76e+08 Pa
Nonlinear Behavior	False
Full Details	Click To View Full Details
Statistics	
Assigned Bodies	1

Obrázek 14: Zvolené vlastnosti litiny

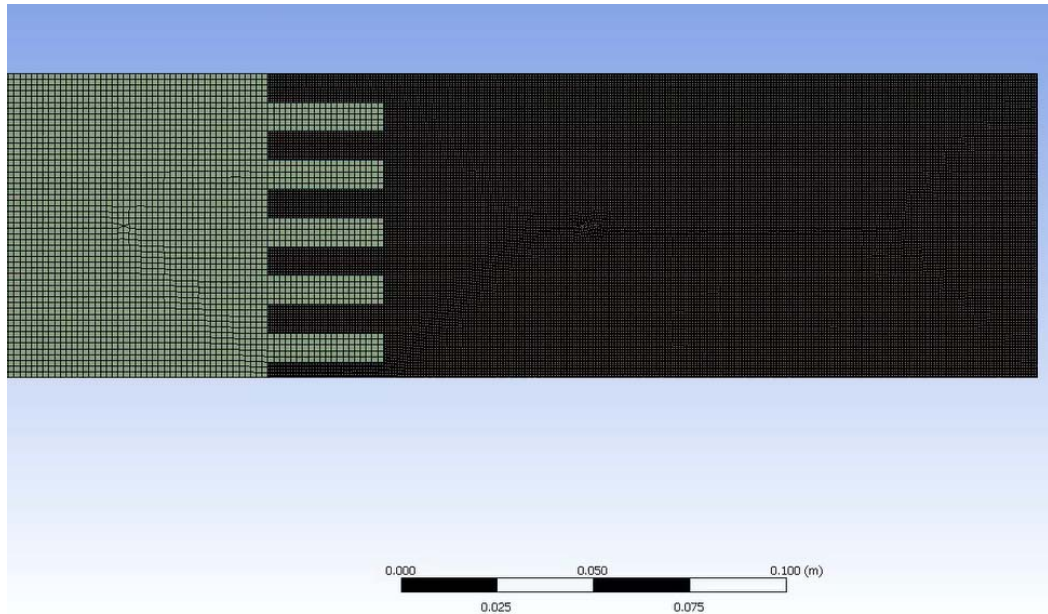
VÝPOČTOVÁ SÍŤ

S použitím 2D zobrazení a geometrie byla zvolena převážně čtvercová síť. Pro tvorbu výpočtové sítě byl zvolen další software ANSYS – Meshing. Výše popsaná geometrie byla rozdělena u vzduchu na menší části tak, aby kvalita sítě dle pozorovaných parametrů dosahovala vyšší kvality, a zároveň aby byla zachována její konformnost i na rozhraní solid/fluid. Celá síť byla rozdělena na pevné těleso OS a vzduch. Síť pevného tělesa počítá teplotní podmínky na povrchu žebra na základě tepelného toku ze stěny OS. Síť v objemu, který zaujímá vzduch, je definována hraniční podmínkou, a to teplotou vzduchu na výstupu 25 °C, což odpovídá běžné teplotě ve skladu. Vlastnosti vzduchu jsou brány jako zjednodušené. Změna hustoty s teplotou, která je potřebná pro výpočet přirozené konvekce, je dána na základě zákona ideálního plynu. Součinitel tepelné vodivosti je brán jako konstantní 0,025 W/mK, tj. atmosférické podmínky ve skladu. Hraniční podmínky jsou nastaveny na základě tlakového vstupu a výstupu.



Obrázek 15: Hraniční podmínky vzduchu

Dále se počítá s gravitací. Tepelný tok skrz stěnu byl nastaven na základě analýzy pro plně zavezený CASTOR 440/84, který odpovídal 30kW [5,3]. Po přepočítání na vnější válcovou plochu OS bez žeber se zanedbáním horní a dolní podstavy je tepelný tok prostupující přes stěnu OS cca 1000 W/m².



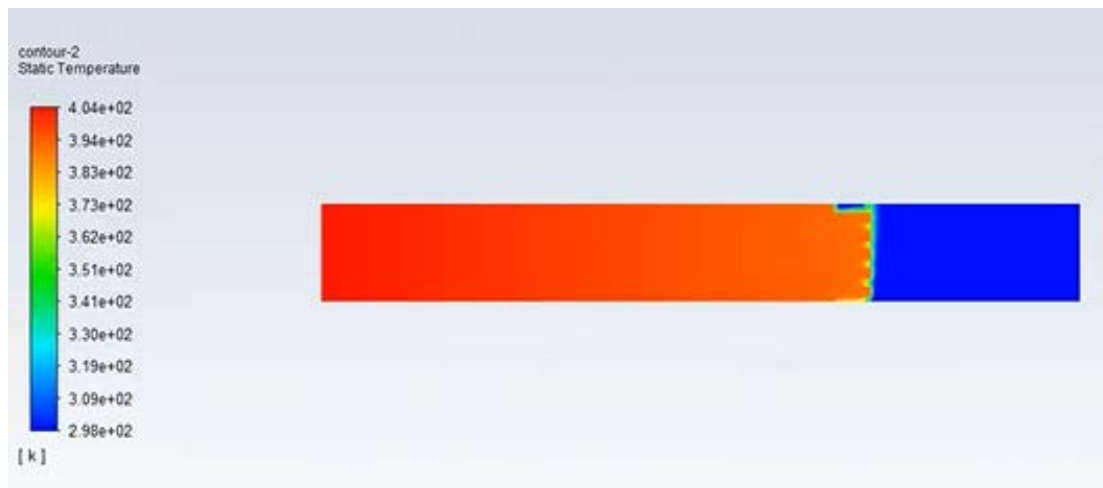
Obrázek 16: Detail sítě

VÝPOČET A ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Následujícím krokem je vložení a nadefinování fyzikálních jevů, které je nutné v dané oblasti řešit. V této práci byl jako řešič využit další program z balíčku – ANSYS Fluent ve verzi 2020 R1. Tento program je napsán v programovacím jazyce C, kdy jeho nejnovější verze obsahují rozsáhlé uživatelské rozhraní, které slouží pro zadání vstupních parametrů a nastavení řešiče.

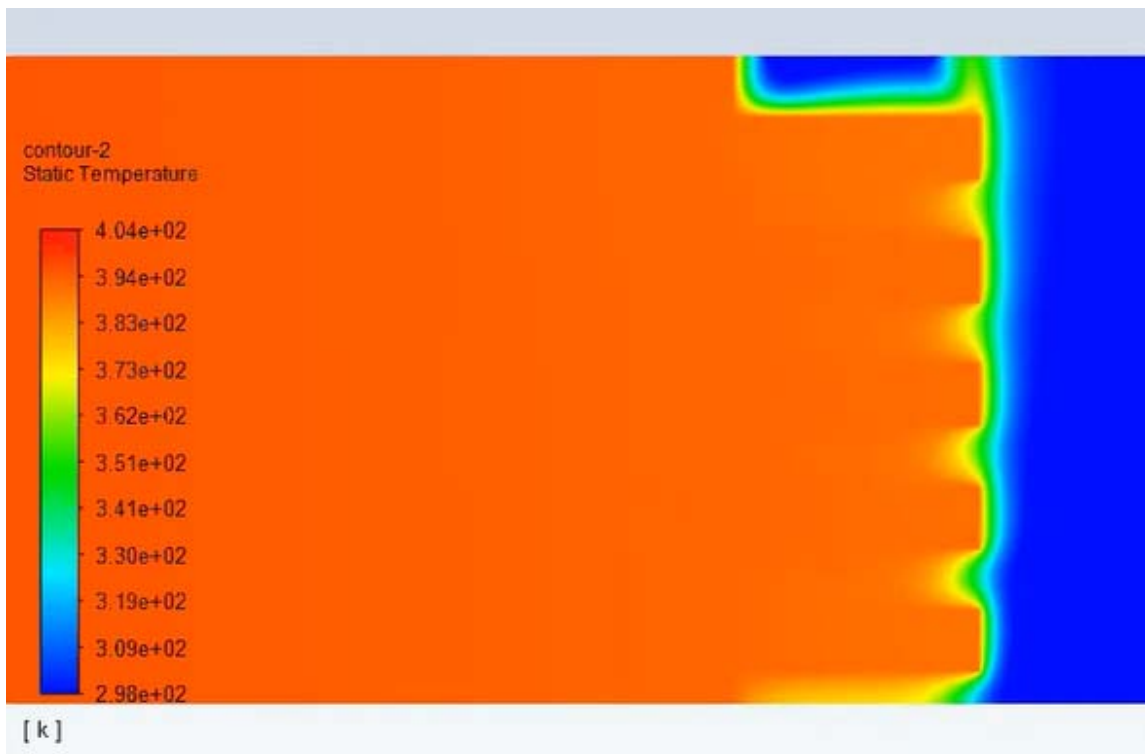
Jak lze vidět z Obrázku č. 17, maximální teplota je na vnitřním povrchu OS, který díky tepelnému toku dosahuje kolem 131 °C. Vedením tepla kondukcí litinou se teplota postupně snižuje až na povrch žebra OS, kde je již průměrná teplota 115 °C a vlivem přirozené konvekce bez přítomnosti radiace a nucené konvekce je teplo předáno do okolí. Model je řešen psauodo-sacionárně, resp. kvazitascionárně.

Model turbulence byl zvolen dle doporučení na základě článku o numerickém řešení přestupu tepla na žebrovaném povrchu [5]. Dále se pro potřeby této práce již neřešily citlivostní analýzy, ale srovnávaly se výsledky s analytickým výpočtem.



Obrázek 17: Teploty na simulovaném modelu pěti žeber a OS

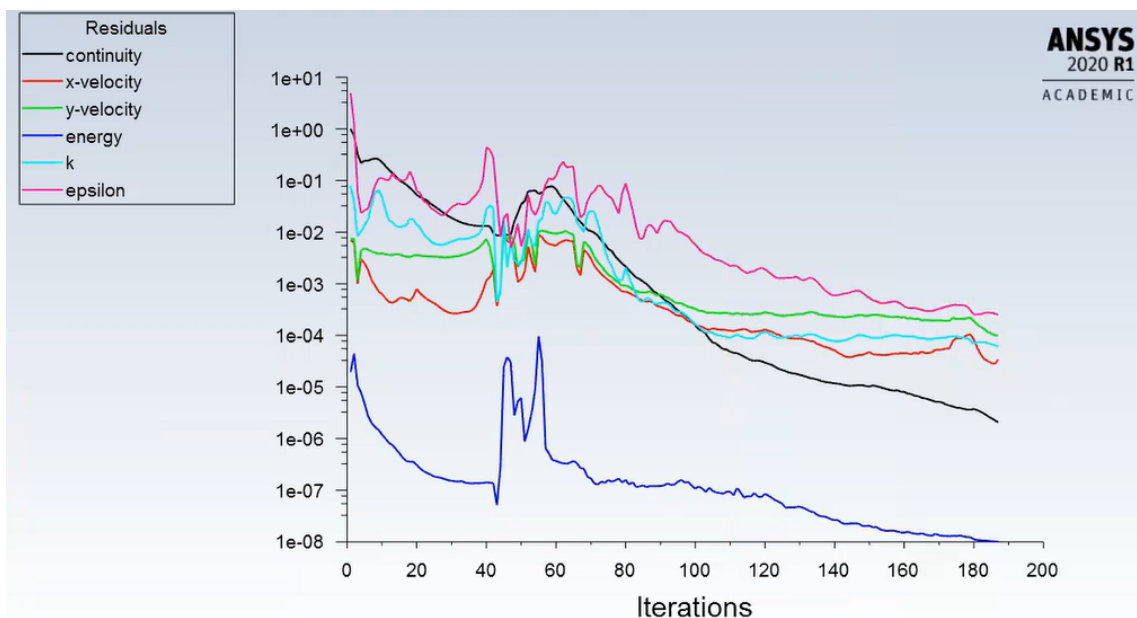
Z Obrázku č. 18 lze vidět, že detail žebér a pokles teploty na povrchu. V modelovaném případě velikost mezi-žeberní mezery není dostatečně velká a nedochází tedy k dostatečnému odvodu tepla. Ohřátý vzduch zde neproudí, v mezi-žeberním prostoru tedy není žádná konvekce a odchází přirozeně k směrem nahoru. Rovněž lze vidět teplotu vzduchu modrou barvou ve výšce 25 °C, což koresponduje s výše uvedenou hraniční podmínkou. Obrázek 18: Detail teploty na simulovaném modelu pěti žebér



Obrázek 18: Detail teploty na simulovaném modelu pěti žebér

KONVERGENCE

K tomu, aby mohlo být numerické řešení programu ANSYS Fluent považováno za dokončené, je důležité získat tzv. konvergentní řešení vč. fyzikální správnosti. O konvergenci vypovídají residua, která představují maximum rozdílu dvou odpovídajících si veličin ve stejném bodě sítě, ve dvou po sobě následujících iteracích [23]. V každém kroku iterace, pro každou počítanou veličinu, jsou residua zaznamenávána a vyhodnocována. Pokud hodnoty residuí klesnou pod 10^{-3} u všech sledovaných veličin, kromě energie, kde hodnota musí klesnout pod 10^{-6} a zároveň je jejich průběh ustálený (průběh neroste ani nejsou pozorovány fluktuace), lze prohlásit dle doporučení [23, 5] řešení za konvergentní.



Obrázek 19: Rozměry modelovaného žebra

Další vhodnou kontrolou pro ukončení simulace je ověření platnosti fyzikálních zákonů a fyzikální chování (průběhy vybraných veličin). Pro CFD analýzy je vhodné provést kontrolu rovnice kontinuity a zákona zachování energie. Pro kontrolu zákona zachování energie je nutné bilancovat všechny vnější průřezy modelu, ve kterých je přiváděno nebo odváděno teplo. V případě tohoto modelu to tedy jsou průřezy pro vstup a výstup vzduchu a plocha, ze které vchází tepelný tok do modelu. Jak lze vidět na Obrázku č. 23, dle výše

uvedeného neexistují žádné numerický chyby, které by nevedly ke konvergenci. Aby se přesnost výpočtu řádně potvrdila bez chyb, bylo by za potřebí udělat detailní kontrolu Zákona zachování energie a Zákona zachování hmotnosti.

6. ZÁVĚR

Stěžejní část této práce byla zaměřena na zařízení soustavy žeber, které slouží ke zvýšení přestupu tepla a tím k lepšímu odvodu tepla z tepelně namáhaných OS. Toto zařízení se ukazuje jako daleko účinnější při odvodu tepla ze součástí namáhaných tepelným tokem než ostatní metody využívající většinou jednofázové proudění.

V úvodu této práce byly stručně popsány základní principy skladování VJP, seznámení s OS a využití těchto jaderných zařízení.

Následující kapitoly již byly zaměřeny na sdílení tepla, rešerši ohledně prostupu tepla přes pole žeber a samostatný CFD výpočet pro vybraný a vytvořený model soustavy pěti žeber. Provedený CFD výpočet ukázal, že teploty na povrchu jsou reálně možné.

Z dosažených výsledků je patrné, že vypočtené teploty povrchu na stěně žebra se takřka shodují s analytickým výpočtem, avšak v numerickém výpočtu této práce dochází pouze k přenosu tepla přirozenou konvekcí.

Provedený CFD výpočet ukázal teploty na povrchu, kde má geometrie soustavy žeber značné nedostatky vzhledem k zadanému tepelnému toku. Takto žebrovaný povrch není optimální z hlediska proudění, jelikož nedochází k dostatečnému proudění vzduchu v mezi-žeberním prostoru. Zde se tedy vzduch prohřeje na teplotu stejnou jako žebro.

Výše popsané výsledky CFD výpočtů ukazují na to, jak je žebrovaný povrch z pohledu termo-hydraulických dějů složitou a specifickou problematikou. Vzhledem k tomu, že nejsou dostupné podklady pro přesné ověření experimentu s provedenými výpočty, lze výsledky porovnat a ověřit pouze s analytickým výpočtem.

LITERATURA

- [1] ČEZ a.s. [online] [cit. 8.8.2021]
<<https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/mezisklad.html>>
- [2] ZÁKON č. 263/2016 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon),
- [3] ŠEVEČEK, M. *Simulace chování vyhořelého jaderného paliva v průběhu dlouhodobého suchého skladování v obalových souborech typu CASTOR= [Spent nuclear fuel behavior simulation during dry long-term storage in the storage and transportation casks CASTOR]: diplomová práce*, Praha, 2014. Diplomová práce (ČVUT, FJFI, Katedra jaderných reaktorů, Praha. Vedoucí práce Mojmír Valach.
- [4] BARTOŇ S. TANUŠKA P. *Stanovené zbytkového výkonu jaderného paliva* [online] [cit. 8.8.2021]<https://www.mtf.stuba.sk/buxus/docs/internetovy_casopis/2008/8/bart-ton.pdf>
- [5] KOBYLKA, D. Osobní konzultace na KJR v Holešovičkách (Říjen 2020- Srpen 2021)
- [6] ŠKORŇA, M. *Chlazení obalového souboru CASTOR 440/84M: bakalářská práce*. Praha, 2017. Bakalářská práce (Bc.). České vysoké učení technické v Praze. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, katedra jaderných reaktorů. Vedoucí práce Dušan Kobylka
- [7] ČEKAN P. *Návrh koše kontejneru typu Castor pro palivo reaktoru typu VVER 1000; diplomová práce* Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Strojní, Plzeň, 2013, Vedoucí práce Jan Zdebor
- [8] STÁTNÍHO ÚŘADU PRO JADERNOU BEZPEČNOST [online] [[cit. 8.8.2021]
<<http://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/jaderna-zarizeni/sklady-vyhoreleho-jaderneho-paliva/mezisklad-vyhoreleho-paliva-dukovany>>
- [9] NELSON, Alisa. Missouri net [online] [[cit. 8.8.2021]
<<http://www.missourinet.com/2015/08/30/ameren-begins-moving-nuclear-waste-to-central-missouri-site>>
- [10] SÚJB [online] [cit. 18.4.2021] Dostupné na : <<https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/jaderna-zarizeni/sklady-vyhoreleho-jaderneho-paliva/zkusebni-provoz-skladu-vyhoreleho-paliva-dukovany>>
- [11] GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH [online] [cit. 18.2.2021] Dostupné na : <<https://www.gns.de/language=en/21549/castor-1000-19>>

- [12] ATOMinfo.cz mbH [online] [cit. 10.5.2021] Dostupné na :
<https://atominfo.cz/2014/04/nemecka-gns-vyrobila-pro-elektrarnu-temelin-dalsich-18-kontejneru/>
- [13] HEJZLAR, R. *Sdílení tepla*. Vyd. 4. Praha: ČVUT, 2004. 186 s. ISBN 80-01-02974-3.
- [14] ZICH, O. *Thermal Hydraulics of Small Power Reactors – Termohydraulika reaktorů nízkého výkonu: bechelor's digree project*. Praha 2015. Bakalářská Práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, katedra jaderných reaktorů. Vedoucí práce Tomáš Bílý
- [15] VYHLÁŠKA SÚJB č. 317/2002 Sb., o typovém schvalování obalových souborů pro přepravu, skladování a ukládání jaderných materiálů a radioaktivních látek, o typovém schvalování zdrojů ionizujícího záření a o přepravě jaderných materiálů a určených radioaktivních látek (o typovém schvalování a přepravě)
- [16] ŠORIN, S. N. *Sdílení tepla*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968. 398 s.
- [17] KOBYLKA, D. *Termohydraulický návrh jaderných zařízení 2,3*. FJFI ČVUT v Praze 2015.
- [18] BULÍŘ P. *Výkonové charakteristiky vytápěcí jednotky SAHARA*, Liberec 2010, Bakalářská práce, Technická univerzita v Liberci, Fakulta Strojní. Vedoucí práce Tomáš Vít
- [19] AYLI E., INCE E. Review of enhancement of heat transfer from rectangular fin arrays, Publikováno: Mugla Journal of Science and Technology, 12.2018 [online] [[cit. 8.8.2021]<https://www.researchgate.net/publication/329569734_REVIEW_OF_ENHANCEMENT_OF_HEAT_TRANSFER_FROM_RECTANGULAR_FIN_ARRAYS>
- [20] ŠVAŘÍČEK T. *Analýza teplotního pole kontejneru pro použité palivo*. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, . Brno 2009. Vysoké učení technické v Brně – Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí Práce. Hugo Šen
- [21] HLADKÝ, P. *Studium tepelných a fyzikálních vlastností skladovacích kontejnerů pro použité jaderné palivo: diplomová práce*. Brno 2011. Vysoké učení technické v Brně – Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí Práce. Hugo Šen
- [22] POVOLNÝ, A. *Modelování proudění chladiva v aktivní zóně reaktoru pomocí CFD= CFD modelling of coolant flow in nuclear reactor cores: bakalářská práce*. Praha, 2012. Bakalářská práce (Bc.). České vysoké učení technické v Praze. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, katedra jaderných reaktorů. Vedoucí práce Dušan Kobylka.
- [23] ANSYS: Elektronická dokumentace a manuály systému ANSYS 19.2, [online] ANSYS Inc. dostupné na:
https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/main_page.html?lang=en&v=19.1

- [24] TOUFAR J. *Model chlazení asynchronního motoru s využitím MK*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Plzeň 2015, Vedoucí Práce Roman Pechánek,