

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**

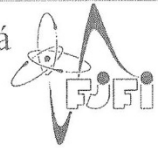
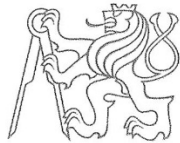
Heat transfer from outer finned surface of cask type CASTOR in
storage conditions

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Michal Škorňa

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

Rok: 2022



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

- Student: **Michal Škorňa**
- Studijní program: Aplikace přírodních věd
- Obor: Jaderné inženýrství
- Název práce česky: **Přestup tepla z vnějšího žebrovaného povrchu obalového souboru typu CASTOR v podmínkách skladování**
- Název práce anglicky: Heat transfer from outer finned surface of cask type CASTOR in storage conditions

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se se základní konstrukcí obalového souboru typu CASTOR a tepelně-technickými podmínkami jeho skladování v meziskladu, které požaduje legislativa České republiky.
2. Prostudujte problematiku přestupu tepla (tj. přirozené konvekce do vzduchu a přenosu tepla sáláním) z válcového žebrovaného povrchu s prstencovými žebry. Popište základní závislosti a jevy, které přenos tepla v tomto případě ovlivňují, a možnosti jeho analytického výpočtu. Proveďte rešerši dostupné literatury na toto téma.
3. Seznamte se s metodami řešení proudění a přenosu tepla používanými v CFD výpočetních kódech a se CFD výpočetními kódy ze skupiny ANSYS Fluids Products. Zaměřte se na problematiku přirozené konvekce a radiace a vyberte vhodný výpočetní kód pro následný výpočet.
4. Ve zvoleném kódu vytvořte zjednodušený model pro výpočet přirozené konvekce a radiace ze žebrovaného povrchu, výpočet proveďte a jeho výsledky vhodným způsobem interpretujte a analyzujte. Proveďte srovnání se zjednodušeným analytickým výpočtem a zdůvodněte případné rozdíly.

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.

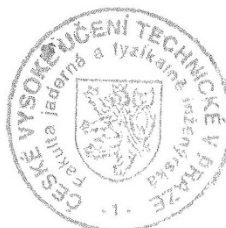


Garant oboru

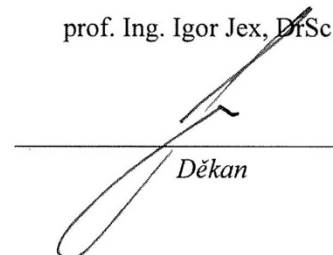
Ing. Jan Rataj, Ph.D.



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 21.12.2021

.....

Michal Škorňa

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Dušanu Kobylkovi, Ph.D. za mnoho cenných rad, trpělivosti a připomínek, za vedení bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Katedře jaderných Reaktorů Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze za poskytnutí výpočetních kapacit.

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

Autor: Michal Škorňa

Obor: Jaderné inženýrství

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Dušan Kobylka, Ph.D.
KJR FJFI ČVUT v Praze

Abstrakt: Práce se zabývá problematikou přestupu tepla z obalového souboru. Nedílnou součástí je úvod do sdílení tepla skrz vertikální povrch se soustavou žeber. V další části práce, je uvedeno výpočtové řešení, které je rozděleno do dvou skupin. První je zjednodušený analytický výpočet na kterou navazují zjednodušená numerický výpočet provedeny v ANSYS fluent.

Klíčová slova: vyhořelé jaderné palivo, CASTOR 440/84M, sdílení tepla na žebrovaném povrchu, ANSYS fluent.

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

Abstract: The work deals with the issue of heat transfer from the package. An integral part is the introduction to heat transfer through a vertical surface with a system of ribs. In the next part of the work, a computational solution is presented, which is divided into two groups. The first is a simplified analytical calculation followed by a simplified numerical calculation performed in ANSYS fluent.

Key words: spent nuclear fuel, CASTOR 440 / 84M, heat sharing on finned surface, ANSYS fluent.

OBSAH

1. ÚVOD.....	1
2. SUCHÉ SKLADOVÁNÍ VJP V KONTEJNERU TYPU CASTOR	3
2.1 SKLADOVÁNÍ VJP	3
2.2 MEZISKLAD VJP	4
2.3 OBALOVÝ SOUBOR.....	5
2.4 OBALOVÝ SOUBOR TYPU CASTOR	8
2.4.1 OS TYPU CASTOR 440/84 resp. 440/84M.....	9
2.4.2 OS TYPU CASTOR 1000/19.....	13
2.5 TEPLTNĚ-TECHNICKÉ PODMÍNKY SKLADOVÁNÍ OS TYPU CASTOR	17
3. PŘESTUP TEPLA NA ŽEBROVANÉM POVRCHU	18
3.1 TEORIE PROBLEMATIKY SDÍLENÍ TEPLA	18
3.1.1 TEORIE PODOBNOSTI	19
3.1.2 PODOBNOSTNÍ ČÍSLA.....	20
3.1.3 RADIACE.....	21
3.2 ŽEBRA	23
3.2.1 VEDENÍ TEPLA V JEDNODUCHÉM IDEÁLNÍM ŽEBRU	23
3.2.2 VEDENÍ TEPLA POLEM ŽEBER	25
3.3 TEORIE PROBLEMATIKY ŽEBER	28
3.3.1 EXPERIMENTÁLNÍ STUDIE PRO STANDARDNÍ OBDÉLNÍKOVÁ ŽEBRA	29
4. VÝPOČETNÍ SYSTÉM CFD	33
4.1 ANSYS.....	34
4.1.1 ANSYS WORKBENCH.....	35
4.1.2 DESIGNMODELER	35
4.1.3 MECHANICAL.....	35
4.1.4 ANSYS MESHING.....	36
4.1.5 ANSYS FLUENT	36
4.1.6 ANSYS CFD POST.....	38
5. MODELOVÝ VÝPOČET	39
5.1 GEOMETRIE MODELU	39
5.2 ZJEDNODUŠENÝ ANALYTICKÝ VÝPOČET.....	41
5.2.1 VÝPOČET TEPLoty POVRCHU.....	41
5.2.2 VÝPOČET RYCHLOSTI PROUDĚNÍ.....	42

5.3 MODEL PRO NUMERICKÝ VÝPOČET	44
5.3.1 GEOMETRIE A VLASTNOSTI VÝPOČTU	45
5.3.2 VÝPOČTOVÁ SÍŤ A HRANIČNÍ PODMÍNKY	46
5.3.3 VÝPOČET A ANALÝZA VÝSLEDKŮ	49
5.3.4 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA.	52
5.3.5 KONVERGENCE	54
5.4 SROVNÁNÍ NUMERICKÉHO VÝPOČTU S ANALYTICKÝM	56
6. ZÁVĚR	57

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
b_D	[m]	Barova délka (název dle autora)
g	[m s ⁻²]	Gravitační zrychlení
Gr	[1]	Grashofovo podobnostní číslo
h_r	[m]	Délka žebra
H	[m]	Výška žebra
k_1	[W m ⁻² K ⁻¹]	Součinitel prostupu tepla povrchu bez žeber
k_2	[W m ⁻² K ⁻¹]	Součinitel prostupu tepla povrchu s žebry
L	[m]	Délka žebra
l	[m]	Charakteristický rozměr
m	[m]	Šířka mezižebního prostoru
n	[1]	Počet žeber
Nu	[1]	Nusseltovo podobnostní číslo
M_e	[W m ⁻²]	Intenzita vyzařování
M_{e0}	[W m ⁻²]	Intenzita vyzařování dokonale černého tělesa
Pr	[1]	Prandtlovo podobnostní číslo
q	[W m ⁻²]	Plošná hustota tepelného toku
q_{in}	[W m ⁻²]	Plošná hustota tepelného toku ve vzdálenosti R_{in}
q_{out}	[W m ⁻²]	Plošná hustota tepelného toku ve vzdálenosti R_{out}
\dot{Q}_{SR}	[W]	Tepelný tok
R_{in}	[m]	Vnitřní poloměr OS

ZNAČKA	JEDNOTKA	VÝZNAM
R_{OUT}	[m]	Vnější poloměr OS
r_3	[m]	Vnější poloměr OS vč. žebrování
S_r	[m ²]	Plocha žeber
S_1	[m ²]	Plocha bez žebra
S_2	[m ²]	Plocha žebrované stěny
S_m	[m ²]	Mezižeburní plocha
S	[m ²]	Plocha 1 žebra
s	[m]	Šířka žebra
T	[K]	Termodynamická teplota
T_p	[K]	Termodynamická teplota stěny
t_1	[°C]	Teplota na vnitřní straně OS
t_{r1}	[°C]	Teplota na konci žebra
$t_{1ž}$	[°C]	Teplota žebra ve vetknutí
t_{sr}	[°C]	Střední hodnota teploty žebra
t_{∞}	[°C]	Teplota okolního vzduchu
u_c	[m s ⁻¹]	Rychlost proudění
x	[m]	Vzdálenost v žeburu od vetknutí
α	[W m ⁻² K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla
α_A	[1]	Absorbance
γ, β	[K ⁻¹]	Objemová roztažnost tekutiny
ϑ_1	[K]	Teplota žebra ve vetknutí
ϑ	[K]	Teplota žebra ve vzdálenosti x od stěny
δ	[m]	Tloušťka stěny OS

ZNAČKA	JEDNOTKA	VÝZNAM
δ_r	[m]	Šířka žebra
η_{sr}	[1]	Účinnost žebrování
λ	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	Koeficient tepelné vodivosti
ν	[m ² s ⁻¹]	Kinematická viskozita tekutiny
δ	[m]	Tloušťka stěny OS
ρ	[kg m ⁻³]	Hustota prostředí
ϕ	[W]	Zářivý tok
ψ	[1]	Součinitel žebrování

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Suché skladování metodou sklípků VJP	4
Obrázek 2 - mezisklad VJP v Dukovanech	5
Obrázek 3 - Řez OS typu CASTOR 440/84M ve skladovací poloze	10
Obrázek 4 - Obalový Soubor CASTOR 440/84M	12
Obrázek 5 - Detail žebrovaného povrchu OS CASTOR 440/84M	13
Obrázek 6 - OS typu CASTOR 1000/19 ve skladovací poloze	14
Obrázek 7- První temelínský mezisklad zaplněný jedním kontejnerem CASTOR 1000/19.....	15
Obrázek 8 - Rozměry žebra OS typu CASTOR 1000/19	16
Obrázek 9 - Fyzikální model detailu 2 žeber v radiačním krytu (příčný řez)	23
Obrázek 10 - Detail jednoduchého tenkého tyčového žebra	24
Obrázek 11 - Žebrování na trubce	25
Obrázek 13 - Dělení obdélníkových žeber	29
Obrázek 14 - Modely proudění v ANSYS Fluent	36
Obrázek 15 - Detail řezu OS s modelovaným žebrovaným povrchem.....	39
Obrázek 16 - Teplotní a rychlostní profil pro ($Pr = 0,7$).....	43
Obrázek 17 - Model soustavy pěti žeber	45
Obrázek 18 - Detail modelu	46
Obrázek 19 - Hraniční podmínky modelu	47
Obrázek 20 - Detail Sítě.....	49
Obrázek 21 - Detail teploty na simulovaném modelu pěti žeber	50
Obrázek 22 - Vektorové pole proudění vzduchu pro K- ϵ model turbulence	51
Obrázek 23 - Detail zkvalitnění sítě.....	52
Obrázek 24 - Vektorové pole proudění vzduchu pro K-omega model turbulence.....	53
Obrázek 25 - Vektorové pole proudění vzduchu pro Reynolds Stress model turbulence.....	54
Obrázek 26 - Residua pro K- ϵ model turbulence	55

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1 - Základní parametry OS CASTOR 440/84 a CASTOR 440/84M	11
Tabulka 2 - Základní parametry přepravního a skladovacího OS CASTOR 100/19	16
Tabulka 3 - Shrnutí použitých korelací pro vlastní analytický výpočet	32
Tabulka 4 - Základní parametry žebrovaného povrchu dle Obrázku č. 15.....	40
Tabulka 5 - Typy hraničních podmínek	48

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 schválení typu některých výrobků v oblasti mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření a přepravě radioaktivní nebo štěpné látky [2]. Pro téma této bakalářské práce bude podstatná jedna z hlavních funkcí OS, a tou je odvod zbytkového tepelného výkonu.

Česká republika produkuje k 1.1.2022 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.

Pro účely této práce je podstatný zbytkový výkon, který produkuje VJP. Palivo po vyjmutí z reaktoru není zcela beze zbytku vyhořelé. Je tedy nutné odvádět tepelnou energii kterou produkuje palivo a 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 odvodu 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 v OS typu CASTOR. 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

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 mokrém meziskladu se PS nacházejí ve skladovacích bazénech pod hladinou vody, která zabezpečuje chlazení a ochranu okolí před zářením. 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. [8]



Obrázek 2 - mezisklad VJP v Dukovanech [8]

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 převézt 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 prostupu záření do okolí a aby nedošlo k úniku radioaktivních prvků do okolí je potřeba těsnosti OS.

OS je skladován ve skladu ve vertikální poloze a je postaven na mříži, aby byl zaručen odvod tepla přirozenou konvekcí ze všech stran a zároveň 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 minimálně 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 [3] a v související vyhlášce č. 379/2016 [2]. 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

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. [6]

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 proutku a maximální teplota moderátoru.

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. 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 zabezpečena 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

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 [3].

2.4 OBALOVÝ SOUBOR TYPU CASTOR

Tento OS patří mezi kovové kontejnerové typy, tedy těžké OS se 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 [3]. 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 [3], 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.

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

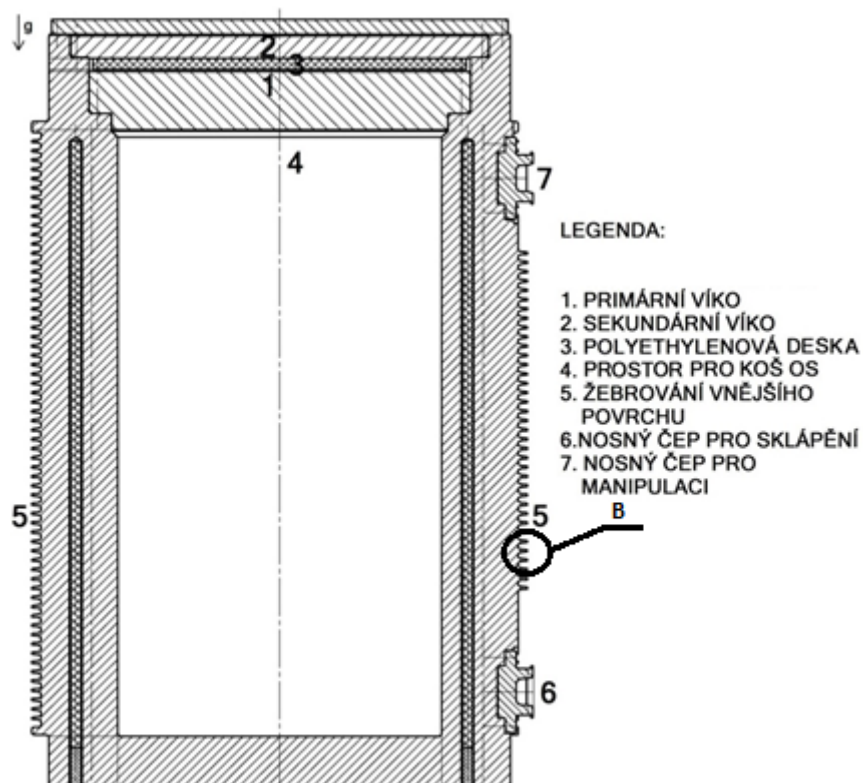
Novějším typem skladovacího a přepravního OS používaným v EDU je OS CASTOR 440/84M, a CASTOR 1000/19 používaný v ETE, jehož základní vlastnosti jsou [3]:

- 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. [3]

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 [3]. Těleso je z litiny s kuličkovým grafitem GGG40 [3] a neutronové stínění zajišťuje polyethylen. Vnitřní prostor kontejneru je vyplněn heliem o nižším tlaku, než je tlak atmosférický. Záruka těsnosti 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 [3]). Jako další parametry se kromě tlaku 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 [3].



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 vyšším vyhoření 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. 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. Materiál koše OS 440/84 je z borované oceli, kde jsou do koše OS vloženy pláty hliníku pro lepší odvod tepla, na rozdíl od 440/84M kde je koš OS vyroben z hliníku, kde se vkládají kvůli pevnosti klíny vyrobeny z borované oceli. [3], [7]

Tabulka 1 - Základní parametry OS CASTOR 440/84 a CASTOR 440/84M [3]

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	< 21 kW	< 24,66 kW
Max. tepelný výkon jednoho palivového souboru	250 W	340 W

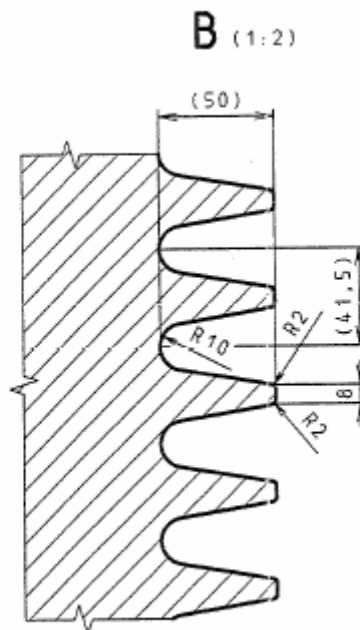
Kontejner má průměr stejný jako Castor 440/84, ale je nepatrně vyšší (viz Tabulka č. 1). Hmotnost prázdného kontejneru je 93,7 tun. Teplota pokrytí povlaku palivového elementu nepřekročí 350 °C.



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

ŽEBROVANÝ POVRCH CASTORU 440/84M

Žebra jsou pro odvod tepla z OS klíčová. Zvětšují významně kontaktní plochu s okolním vzduchem a tedy zvyšuje tepelný tok skrz stěnu OS. Na Obrázku 5 lze vidět detail 5 žeber včetně jednotlivých rozměrů.



Obrázek 5- Detail žebrovaného povrchu OS CASTOR 440/84M [10]

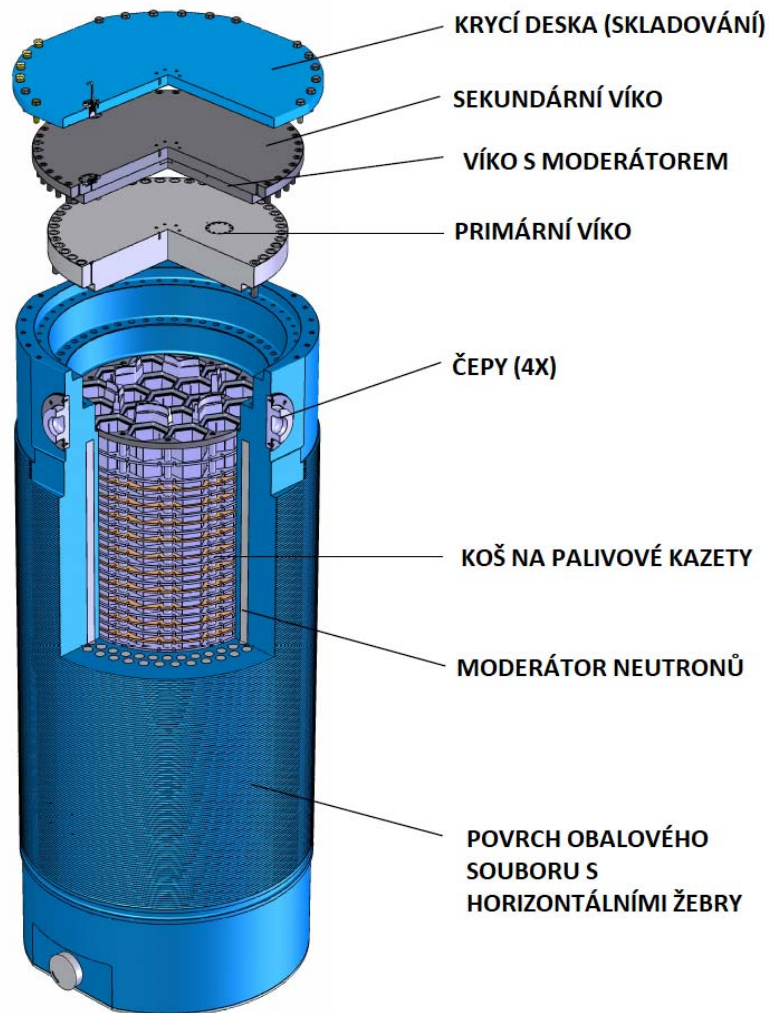
Obalový soubor má celkem 65 horizontálních prstencových žeber podél svého celého obvodu o délce žebra 50 milimetrů, rozteči 41,5 milimetrů a minimální šířce 8 milimetrů. Tvar žeber je zkosený a to zejména z důvodu výroby. Celkový povrch OS a tedy i povrch žeber je natřen lesklou barvou, u OS typu CASTOR 440/84M se jedná o zelenou. Důvodem nátěru je ochrana povrchu zejména pro budoucí dekontaminační práce povrchu OS. [5]

2.4.2 OS TYPU CASTOR 1000/19

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. 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.

OS má vylepšenou 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 6 - 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 [29], uvádí Obrázek 7.



Obrázek 7- První temelínský mezisklad zaplněný jedním kontejnerem CASTOR 1000/19 [12]

Důležitým krokem je zavezení OS palivovými kazetami, které musí být dle technologického postupu. Po našroubování primárního víka se OS vyjme z nádrže, voda se přes ventil odsaje a kontejner se opakovaně vakuově suší. Celý proces je z důvodu opakovaného sušení časově náročný, 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 [3]. Tímto vzniknou dvě nezávislé ochranné bariéry. Hodnota tlaku mezi víky je neustále po dobu skladování kontejneru sledována. 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:

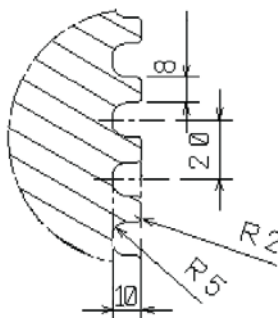
- Monolitické těleso OS vyrobené z tvárné litiny s obrobenými chladičími žebry
- Systém s dvojitým víkem – primární víko a sekundární víko – s kovovými těsněními a prostorem mezi víky, kde je aktivně sledován tlak.
- Čepy pro manipulaci a zvedání OS.
- Koš uvnitř OS pro uložení palivových souborů.

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

ŽEBROVANÝ POVRCH CASTORU 1000/19

OS typu CASTOR 1000/19 má také horizontální prstencové žebra, obdélníkového tvaru. Žebra jsou dlouhá 10 milimetrů, široká 8 milimetrů a jsou na konci zkosená. Rozteč mezi žebry je 20 milimetrů, jak lze vidět z Obrázku 8.



Obrázek 8 - Rozměry žebra OS typu CASTOR 1000/19 [7]

I zde je povrch natřen lesklou barvou v případě OS typu CASTOR 1000/19 se jedná o žlutou barvu, kterou použil výrobce GSN.

2.5 TEPLTNĚ-TECHNICKÉ PODMÍNKY SKLADOVÁNÍ OS TYPU CASTOR

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.

Skladování OS probíhá v meziskladu, kde jsou uspořádány v polích s konstantními roztečemi. Například celková kapacita meziskladu v Dukovanech je 60 kusů obalových souborů pro 600 t těžkých kovů. OS je umístěn v MSVP, kde je chráněn před vnějšími vlivy střechou skladu a nepůsobí na něj sluneční záření, tedy není potřeba počítat s tímto dalším tepelným zdrojem. OS jsou v MSVP od sebe vzdáleny 0,5 metru (odečteno z Obrázku 2). Jelikož teplo z OS vztoupá konvekcí převážně vzhůru, je pro lepší odvodu tepla MSVP vybaven průduchy nahoře a dole podél celé místnosti. Tyto průduchy díky přirozenému proudění zvyšují odvod tepla. Celkový přestup tepla sáláním z celého OS je menší než přestup tepla konvekcí.

3. PŘESTUP TEPLA NA ŽEBROVANÉM POVRCHU

3.1 TEORIE PROBLEMATIKY SDÍLENÍ TEPLA

K přestupu tepla dochází 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] [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.

Kondukcce

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, pokud je jejich makroskopický pohyb zanedbatelný [13].

Konvekce

Uskutečňuje se při proudění tekutiny přemísťováním částic tekutiny z oblasti jedné teploty do oblasti jiné teploty. Je způsobena makroskopickým pohybem tekutiny a 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 povrch se v obecném případě jeho část odrazí, část pohlcuje a část může projít tělesem.

Sálání těles 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.

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

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

3.1.1 TEORIE PODOBNOSTI

K nalezení konkrétního řešení u konvekce se většinou řeší soustava rovnic tvořena 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.

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 slouží 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

Tato čísla jsou odvozována na základě fyzikální teorie z mnoha různých rovnic. Podobnostních čísel existuje celá řada. Jsou bezrozměrná a zde budou uvedena základní, která jsou potřebná pro účely této práce. Hlavní podobnostní čísla jsou následující.

Technický význam **Prandtlova** čísla je funkcí dané látky a „stavu“, ve kterém se nachází. Pro velké hodnoty Prandtlova čísla $Pr \gg 1$ probíhá převážně konvektivní přenos tepla v tekutině a pro malé hodnoty Prandtlova čísla $Pr \ll 1$ probíhá převážně konduktivní přenos tepla v tekutině. 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 vztahové 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 v případech vertikální rovinné stěně ve velkém prostoru 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:

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

Používají se různá Ra a Gr podobnostní čísla za předpokladu že je úloha řízena teplotou jsou použity rovnice č. 2 a č. 3, pokud je řízena tepelným tokem, používají se podobnostní čísla odvozená.

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

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (4)$$

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

Každá korelace byla určena pro určitý charakteristický rozměr a charakteristickou teplotu. Korelace, ze kterých se určuje Nusseltovo podobnostní číslo pro daný typ konvekce a podmínek, jsou nejčastěji tvaru:

$$Nu = f(Re_L, Pr_T) \quad (5)$$

$$\overline{Nu} = f(Re_T, Pr_T) \quad (6)$$

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

Vztah (5) je používán k určení lokálního koeficientu přestupu tepla α , vztah (6) pak pro určení středního $\bar{\alpha}$ na povrchu určené charakteristickým rozměrem. Charakteristický rozměr je rozměr který ovlivňuje růst 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. V následujících podkapitolách jsou uváděny pouze korelace potřebné pro výpočty přestupu tepla na žebrovaném povrchu.

3.1.3 RADIACE

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

Při popisu zákonů vyzařování mezi tělesy, se budou využívat následující veličiny:

Zářivá energie, je energie vyzářená, přijatá nebo přenesená prostřednictvím elektromagnetického záření. [13].

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

$$dM_e = \frac{d\Phi}{dS} \quad (7)$$

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

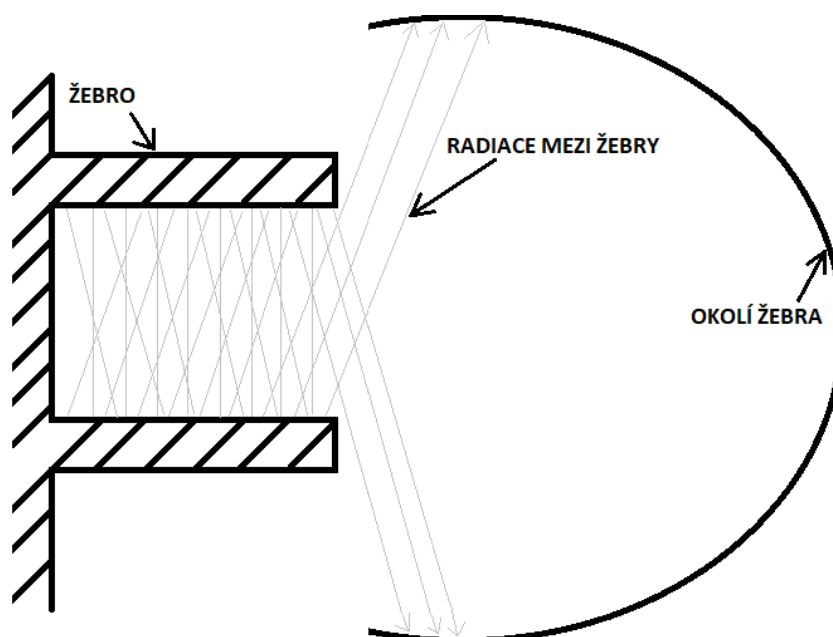
$$M_e = \alpha_A \cdot M_{e0} \quad (8)$$

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

$$M_{e0} = \sigma \cdot T^4 \quad (9)$$

Výše uvedený vztah (8) je nazýván tzv. Stefanův-Boltzmannův zákon fyzikální významem definuje vyzařování ven z povrchu do okolí. Konstanta σ je rovna $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$.

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



Obrázek 9 - Fyzikální model detailu 2 žebrování v radiačním krytu (příčný řez)

Na Obrázku 9, lze vidět, jak na sebe působí stěny vzájemným osálením. Sálání do okolí je tedy z tohoto povrchu relativně malé. Radiační tepelný tok působící navzájem z jednoho žebra na druhé je stejný. Na základě výše uvedené geometrie je vidět, že sálání z žebrovaného povrchu do okolí v případě, že OS je zcela obklopen dalšími OS je minimální. 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.

V případě plného zaplnění skladu jsou v okolí OS jen další OS které díky osálení působí na sebe vzájemně, maximální sálání bude směřovat ke stropu místnosti.

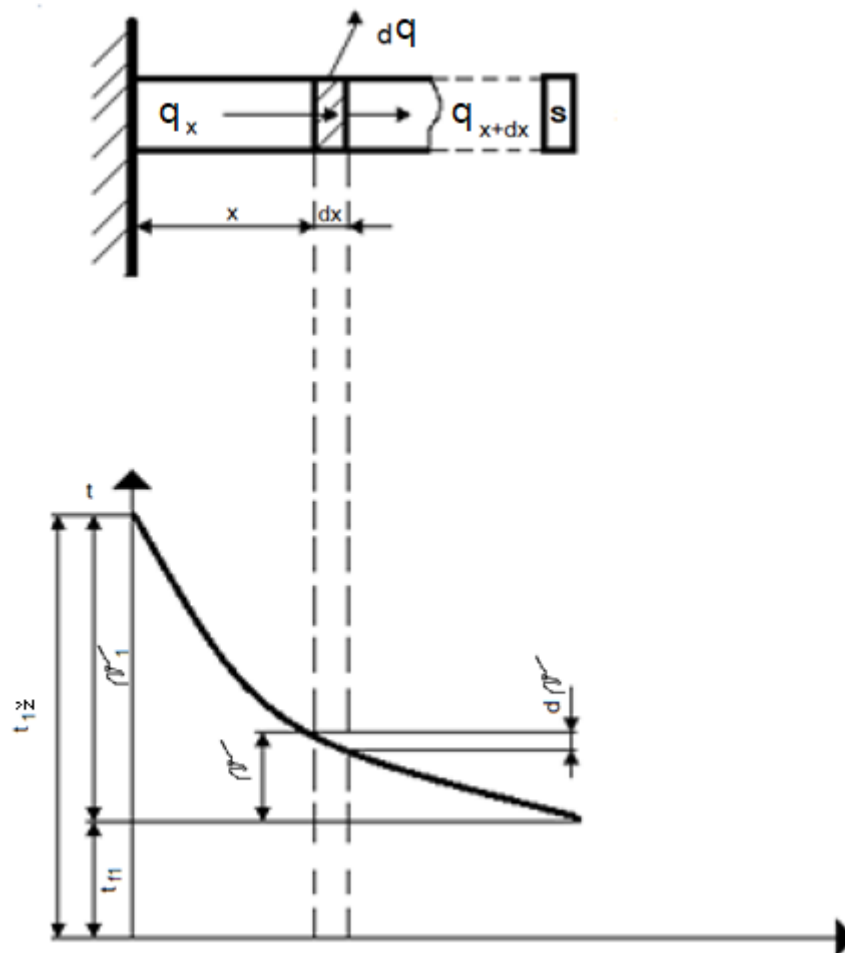
Pro případ této práce bude podstatná hlavně konvekce, radiace působí minoritně při přirozeném ochlazení obalového souboru.

3.2 ŽEBRA

3.2.1 VEDENÍ TEPLA V JEDNODUCHÉM IDEÁLNÍM ŽEBRU

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. Mění se jen ve vzdálenosti x od stěny, jak naznačuje Obrázek 10, ze kterého je patrný průběh teploty po délce. Jako exponenciální funkce jen závisí, zda se odvádí nebo přivádí teplo žebrem, hraničních podmínkách, součinitele přestupu tepla a geometrii. [13]



Obrázek 10 - Detail jednoduchého tenkého tyčového žebra, obdélníkového průřezu, přivařené na levé straně ke stěně, jejíž povrch má zvětšit [13]

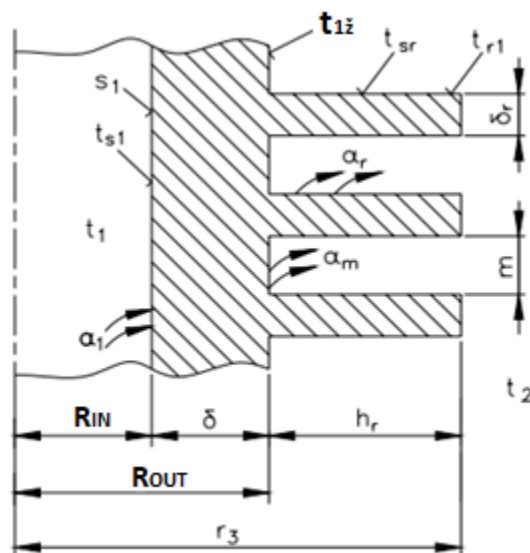
Pro výpočet se může s výhodou používat rozdíl teplot žebra a okolní tekutiny mající teplotu $t_f = konst.$ Tedy rozdíl teploty ve vetknutí žebra se označí $\vartheta_1 = t_1 - t_f$ a v dané vzdálenosti x od stěny $\vartheta = t - t_f$

3.2.2 VEDENÍ TEPLA POLEM ŽEBER

Vedení tepla polem žeber může být řešeno dvěma způsoby. Prvním způsobem je přes účinnost soustavy žeber dle této kapitoly 3.2 nebo pomoci korelačních vztahů v kapitole 3.3.

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.[18]

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 11 - Žebrování na trubce [21]

ÚČINNOST SOUSTAVY ŽEBER

Je-li žebrovaná válcová či rovinná stěna, přes kterou prochází tepelný tok, teplota žeber je největší ve vetknutí a klesá se vzdáleností od stěny. Části žeber blíže ke stěně tak odvádějí více tepla do okolí než konec žeber, za předpokladu konstantní teploty tekutiny a konstantního přestupu tepla. Poměr tepelného toku \dot{Q}_{sr} , který skutečně přestupuje ze 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 [18]:

$$\eta_{sr} = \frac{\dot{Q}_{sr}}{\dot{Q}_{sr MAX}} = \frac{\alpha_r \cdot S_r (t_{sr} - t_2)}{\alpha_r \cdot S_r (t_{1ž} - t_2)} = \frac{t_{sr} - t_2}{t_{r2} - t_2} \quad (10)$$

Celková plocha žebrované stěny 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:

$$\dot{Q}_{sr} = \alpha_2 \cdot S_2 (t_{1ž} - t_2) \quad (11)$$

Ekvivalentní součinitel přestupu tepla α_2 je dán ze vztahu:

$$\alpha_2 = \alpha_m \cdot \eta_{sr} \quad (12)$$

Kde η_{sr} je účinnost žebrování:

$$\eta_{sr} = 1 - \frac{S_r}{S_2} \left(1 - \eta_r \cdot \frac{\alpha_r}{\alpha_m} \right) \quad (13)$$

Kde α_m je součinitel přestupu tepla povrchu mezer

EFEKTIVITA SOUSTAVY ŽEBER

Prostup tepla rovinnou žebrovanou stěnou lze vyjádřit těmito rovnicemi:

$$\dot{Q}_{sr} = k_1 \cdot S_1 (t_1 - t_2) = q_1 \cdot S_1 \quad [W] \quad (14)$$

$$\dot{Q}_{sr} = k_2 \cdot S_1 (t_1 - t_2) = q_2 \cdot S_2 \quad [W] \quad (15)$$

Součinitel prostupu tepla vztahující se k povrchu, bez žebor S_1 a se žebry S_2

$$k_1 = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot \psi} \right)^{-1} \quad (16)$$

$$k_2 = \left(\frac{\psi}{\alpha_1} + \frac{\delta \cdot \psi}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \quad (17)$$

Kde ψ je součinitel žebrování předepsán vztahem

$$\psi = \frac{S_2}{S_1} \quad (18)$$

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 $1/\alpha_1$ [18].

3.3 TEORIE PROBLEMATIKY ŽEBER

Důvod a výhoda aplikace žebra byla zmíněná výše. Nepoužívá se v průmyslových aplikacích jen jedno žebro ale soustava žeber, díky které se znásobí tyto výhody.

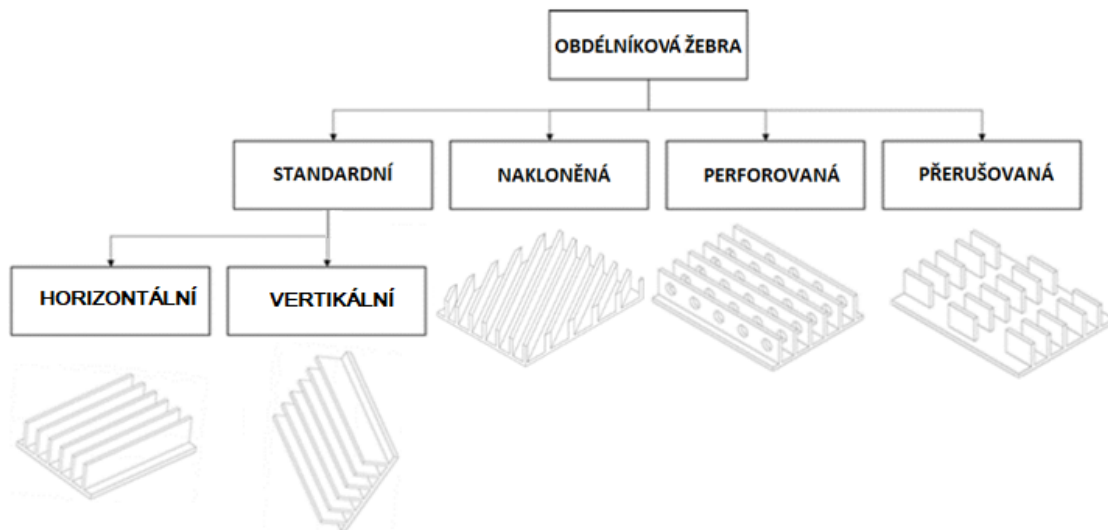
Vyřešit odvod tepla je možné aktivní či pasivní metodou. **Aktivní metody:** Zde je nutný vstupní výkon, a zajistit externími prostředky promíchávání tekutiny. **Pasivní metody:** Geometrické nebo povrchové úpravy se většinou provádějí jako rozšířené povrchy, což je případ aplikace žeber a zdrsňení povrchů. Široce se upřednostňují pasivní řešení, protože se ukázala jako, nehlukná a účinná [4], [7].

Zvýšení plochy pro odvod tepla je jedna z pasivních metod, která je široce používána v technických oborech. Správnou instalací soustavy žeber se zvyšuje součinitel přestupu tepla, u špatně navržené soustavy žeber může docházet i ke snížení tohoto součinitele. Soustava žeber se osvědčila například ve výměnících tepla, chlazení elektronických zařízení a další oblasti použití, které vyžadují vysoký odvod tepla [18].

Existuje mnoho typů geometrií žeber, jako jsou obdélníková, válcová, prstencová a čtvercová. Obdélníková žebra jsou nejvíce využívaným typem žeber vzhledem k jejich nízkým nákladům na výrobu. Na Obrázku 13 jsou typy obdélníkových žeber, která se používají ke zvýšení přenosu tepla. Obdélníková žebra standardního typu jsou často zmiňována v mnoha odborných publikacích. V souladu se zvýšením přenosu tepla musí být optimalizovány parametry, jako je počet žeber, tvar žeber, výška žeber, šířka žebra a rozteč mezi žebry.

V odborných publikacích se zmiňují nejen pevná obdélníková žebra, ale také pravoúhlá nakloněná žebra, perforovaná a přerušovaná, jak je patrné z Obrázku 13. Pro zvýšení odvodu tepla by měla být optimalizovány parametry, jako je počet žeber, tvar žeber, výška žeber, šířka žebra a rozteč mezi žebry. V procesu optimalizace těchto klíčových vlastností, je potřeba mít již rozsáhlé zkušenosti s problematikou přirozené konvekce. Nevhodný, návrhem místo zvyšování odvodu tepla mohou povrchy žeber blokovat přichozí proud vzduchu, což ovlivní přenos tepla v negativním slova smyslu.

Žebrované povrchy se dle uspořádání mohou rozlišovat na horizontální a vertikální.



Obrázek 12 - Dělení obdélníkových žebor [19]

Z výše uvedeného Obrázku 13 vyplývá, že u standardních žebor s vertikální základnou mohou být žebra instalována jak horizontálně, tak i vertikálně, což ve výsledku ovlivní přestup tepla ze žebor do okolního prostředí.

3.3.1 EXPERIMENTÁLNÍ STUDIE PRO STANDARDNÍ OBDÉLNÍKOVÁ ŽEBRA

Elenbaas provedl ve svém článku problém přirozené konvekce na paralelních deskách s vertikální základnou, a to jak numericky, také i experimentálně [19]. Popsal zde experimentální studie s horizontálními žebry obdélníkového tvaru. Počet žebor v poli byl v intervalu od čtrnácti do sedmnácti v závislosti s měnící se šířkou žebor a mezerou mezi žebry. Z tohoto článku vyplývá, že rozteč a šířka žebor má přímý vliv na přestup tepla ze žebra do okolního prostředí a také nevhodná konfigurace žebra na povrchu může způsobit nižší koeficient přestupu tepla. V závěru bylo zjištěno, že k maximálnímu koeficientu přestupu tepla bylo dosaženo díky úzkému rozestupu žebor mezi sebou, za předpokladu vertikálních žebor. Na druhou stranu u horizontálně uspořádaných žebor na vertikální stěně, tato teorie nebyla potvrzena.

Se soustavu čtyř horizontálních žebor obdélníkového typu na svislé základně a předpokladu přirozené konvekce, prováděli experiment Welling a Wooldridge [19]. Úzce rozmístěná žebra mají menší teplotní rozdíl mezi teplotou mezní vrstvy a teplotou okolí ve

srovnání s široce rozmístěnými žebry. Harahap a McManus ve své experimentální studii [19], zjišťovali vliv roztečí žeber, šířky žebra a počet žeber u přirozené konvekce z povrchu do vzduchu, kde především sledovali, jak jsou delší žebra schopna odevzdat větší množství tepla. Prandtlovo podobnostní číslo se bere pro termo-fyzikální vlastnosti při teplotě v nekonečnu. Korelace je navržena v rovnici (19):

$$(Nu)_{L,1} = C_1 \cdot \left[(Gr)_L \cdot (Pr) \left(\frac{n \cdot H}{S} \right) \right]^a \cdot \left(\frac{L}{H} \right)^b \cdot \left(\frac{L}{S} \right)^c \quad (19)$$

Pro parametry:

$$10^6 < \left[(Gr)_L \cdot (Pr) \left(\frac{n \cdot H}{S} \right) \right] \leq 2,5 \cdot 10^7 \quad (20)$$

Platí:

$$C_1 = 5,22 \cdot 10^{-8}, a = 0,57; b = 0,412; c = 0,656 \quad (21)$$

Pro parametry:

$$2,5 \cdot 10^7 < \left[(Gr)_L \cdot (Pr) \left(\frac{n \cdot H}{S} \right) \right] \leq 1,5 \cdot 10^8 \quad (22)$$

Platí:

$$C_1 = 2,787 \cdot 10^{-8}, a = 0,745; b = 0,412; c = 0,656 \quad (23)$$

Leung a kol. studovali součinitel přestupu tepla u vertikálního i horizontálního uspořádání pole žeber [19]. V experimentálním zkušebním zařízení používali různé vzdálenosti žeber, a to: 10 mm, 20 mm a 40 mm. Pro všechny rozteče byla naměřena vyšší teplota v mezižebním prostoru u horizontálních žeber než za předpokladu použití stejné geometrie u vertikálního uspořádání geometrie. V jiném výzkumu Leung a kol. studoval prodloužení délky žebra vzhledem k přenosu tepla [19]. Leung a Probert provedli experiment k měření účinku změny tloušťky žebra na přestup tepla u přirozené konvekce. Aby byla plocha žebra stejná, při zmenšení tloušťky všech žeber je počet žeber zvýšen, takže je rovněž zvýšena plocha přenosu tepla. Na druhé straně u tenčího žebra dochází k poklesu teploty po délce rychleji. Kvůli tomuto faktu autoři definovali kritickou tloušťku žebra, která odpovídá maximálnímu tepelnému přenosu.

Pro vertikální stěnu s horizontálními žebry a v závislosti Prandtlova čísla na teplotu v nekonečnu definovali Bar & Cohen vztah [19]:

$$(Nu)_{L,2} = 0,116 \cdot [(Gr)_L' \cdot (Pr_\infty)]^{0,5} \text{ platí pro } (Gr)_L' Pr \leq 500 \quad (24)$$

$$(Nu)_{L,2} = 0,457 \cdot [(Gr)_L' \cdot (Pr_\infty)]^{1/3} \text{ platí pro } 500 \leq (Gr)_L' Pr \leq 10^6 \quad (25)$$

Kde upravené číslo Grashofovo (Gr') je definováno jako [19]:

$$(Gr)_L' = Gr \cdot \left(\exp \left(-\frac{b_D}{S} \right) \left(\frac{L}{(H \cdot b_D)^{0,5}} \right) \right) \quad (26)$$

Kde experiment pro definici upraveného Grashofova podobnostního čísla, byl prováděn jako zkoumání vlivu materiálu žebra za předpokladu přirozené konvekce do okolí a to pro materiály dural s tepelnou vodivostí 160 W / mK a nerezová ocel s 14 W / mK. Výsledky naznačují, že nerezová ocelová soustava žeber ma o něco nižší přenos tepla než duralová soustava žeber s podobnou geometrií [19].

ZÁVĚR KAPITOLY

Soustavou obdélníkových žeber až do kritického rozestupu hodnota koeficientu přestupu tepla stoupá, poté se zvětšujícím se rozstupem žeber klesá. Při rozteči žebra, sníženého pod optimální hodnotu, nedochází v mezižebním prostoru k proudění vzduchu, což je negativní vliv, jelikož je potřeba dosáhnout maximálního odvodu tepla.

Z literatury [19] jsou převzaty korelace a empirické rovnice, které byly stanoveny pro přirozenou konvekci a přenos tepla z vertikální desky. V tabulce č. 3 jsou zdůrazněny korelace z výše uvedeného textu, se kterými se bude počítat v analytickém výpočtu pro srovnání výsledků měření.

Tabulka 3 - Shrnutí použitých korelací pro vlastní analytický výpočet

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

4. VÝPOČETNÍ SYSTÉM CFD

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

Kromě výše uvedeného, výpočetní metoda 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 [23]. 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 dalšími fyzikálními a chemickými jevy.

Aktuální rozvoj CFD je pevně spjat s rozvojem hardwarových technologií a neustálým zvyšováním výpočetních kapacit. Proto by CFD mělo být schopné dostatečně přesně a rychle počítat konvekci na povrchu OS. 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, kde výpočetní kódy jsou stále inovovány a vychází nové a nové verze. Výpočetní kódy umožňují modelovat 2D a komplexnější 3D geometrii a je jen na uživateli, pro které se rozhodne. Poprvé byly hromadně využívány v leteckém průmyslu a výpočtu družic.[5]

Všechny výpočetní CFD kódy jsou založeny na metodách převodu diferenciálních rovnic na diferenční 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 nejenom matematickými i fyzikálními modely.

Postup při tvorbě CFD modelu se skládá z těchto základních fází:

PŘÍPRAVA (Preprocessing)

Uživatel zde vytváří geometrii modelu přímo v programu, 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 preprocesingu je vygenerování sítě, zadání hraničních, počátečních podmínek a definování materiálových vlastností včetně fyzikálních modelů.

ŘEŠENÍ (Solving)

Při spuštění řešení, je možno nastavit matematické podmínky výpočtu a 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. Úlohu je třeba validovat s analytickým výpočtem nebo dalším numerickým výpočtem v kódu, který je založen na jiném matematickém principu nebo s jiným nastavením fyzikálních modelů. Ke zjištění přesnosti je důležitá citlivostní analýza zaměřená na volitelné parametry. Avšak nejlepší je srovnání s naměřenými daty v provozu nebo experimentálními daty.

4.1 ANSYS

Společnost ANSYS vyvíjí rozsáhlé množství simulačních kódů. Používají se především k predikci chování modelu. Balíček podprogramů, který obsahuje ANSYS řeší spousty úloh od termodynamiky, elektromagnetických polí až po chemické reakce. Jedním z mnoha produktů této společnosti je výpočetní kód Fluent. Obsahuje široké možnosti modelování, dynamiku proudění tekutin, přenosu tepla aj. Problematika přenosu tepla v prostředí ANSYS Fluent je řešena rovnicí zákona zachování energie, rovnice zákona zachování hmotnosti, hybnosti, a také vztahy pro počítání případných chemických reakcí. Speciální případ zákona zachování hybnosti, je řešení Navierovy-Stokesových rovnic, kde

výpočet probíhá metodou konečných objemů, řešení je prováděno adaptivní multigradní metodou. Při nastavení přenosu tepla a počítání energetické rovnice je možno nastavit až 5 hraničních podmínek a to: tepelný tok, teplota, proudění (součinitel přestupu tepla a referenční teplotu), záření a kombinaci proudění a radiace s okrajovými podmínkami. Ve výpočtech lze zahrnout vliv šíření tepla vedením, prouděním a radiací. Nezbytné je definování termo-fyzikálních vlastností: tepelné kapacity, hustoty, emisivity a tepelné vodivosti v závislosti na teplotě. [24]

Následující kapitoly stručně popisují jednotlivé podprogramy které byly použity při řešení úlohy:

4.1.1 ANSYS WORKBENCH

Základním programem je Ansys Workbench. Ten slouží jako prostředí umožňující spouštění dalších jednotlivých programů, vytváření vazeb mezi programy a vytváření struktury simulací.

4.1.2 DESIGNMODELER

Prvním krokem při vytváření jakékoliv simulace je vytvoření modelu. Způsob tvorby je podobný jako u CAD programů.

Jedná se o podprogram pro tvorbu geometrie modelu. Zde je možné importovat model ze široké škály 3D CAD softwarů. Tento program má 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 CAD systému a do DesignModeleru nahrát již model, který je potřeba minimálně upravovat. Nahráný soubor nesmí mít přesahy objemů. 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.

4.1.3 MECHANICAL

Slouží pro tvorbu sítě v modelu, která je po připojení DesignModeleru importována do prostředí. V tomto programu, se můžou potlačit prvky, které v úloze není potřeba řešit.

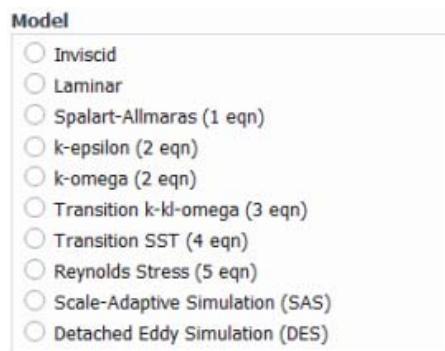
Dále se vybere v postranním okénku ikona Mesh a v jejím detailu se vybere řešený problém, jemnost sítě a její vyhlazování. Další možností je nastavení velikosti elementu na zvolený povrch či objem pomocí funkce sizing. Spuštění tvorby sítě je příkazem generate mesh.

4.1.4 ANSYS MESHING

Jedním z nejdůležitějších kroků pro získání správných výsledků počítačové simulace proudění je tvorba výpočetní sítě. Ansys Meshing je podprogram, který pomáhá vytvářet síť a model rozdělit na konečný počet nepřekrývajících se buněk. Toto rozdělení se nazývá síťování. Pro síťování modelu pomocí čtyřstěnu jsou k dispozici v Ansys Meshing dva rozdílné algoritmy patch conforming a patch independent. Hlavním rozdílem těchto algoritmů je způsob vytváření sítě. Algoritmus patch conforming začíná vytvářet síť od hran a stěn a následně vyplňuje objem modelu. Tímto postupem je zaručeno respektování všech hran síťovaného modelu. Algoritmus patch independent vytváří síť od středu modelu směrem ke stěnám.

4.1.5 ANSYS FLUENT

Program Ansys Fluent je určen k výpočtům rovnic popisujících proudění. Před řešením úlohy proudění se v něm nastavuje model proudění, materiálové vlastnosti, okrajové podmínky, inicializační podmínky a parametry simulace. Na Obrázku 14 lze vidět, jaké modely turbulence lze zvolit v Ansys Fluent.



Obrázek 13 - Modely proudění v ANSYS Fluent

Pro další potřeby této práce budou zmíněny jen tři modely turbulence s kterými se v závěru počítá.

MODEL K-EPSILON

K-epsilon je dvourovnicový model, který určuje turbulentní viskozitu dvěma transportními rovnicemi pro k a ϵ , kde k je turbulentní kinetická energie a ϵ je disipace turbulentní kinetické energie. Tento model je vhodný pro proudění, s plně vyvinutou turbulencí a s velkým Reynoldsovým číslem. U stěn dosahuje horší přesnosti, ve větších vzdálenostech od stěny jsou výsledky přesnější. Není vhodný pro řešení úloh obtékání křivočarých těles, pro úlohy s velkým zakřivením proudu a pohyb tekutiny s rotací, kdy vznikají velké nepřesnosti. Nedostatky tohoto modelu řeší jeho modifikace RNG k-epsilon a Realizable k-epsilon. Rozdíly těchto modelů jsou v určení turbulentní viskozity. [23]

Z rešerše literatury plyne, že model k-epsilon je v technické praxi nejvíce využíván pro svoji robustnost, malou časovou náročnost na výpočet a dostatečnou přesnost pro široké spektrum případů turbulentního proudění. Na uvedeného textu, bylo při simulacích v dalších kapitolách použit model k-epsilon.

MODEL K-OMEGA

Model k-omega je stejně jako model k-epsilon dvourovnicový. Jedna transportní rovnice řeší rychlostní měřítko turbulence pomocí turbulentní kinetické energie k a druhá délkové měřítko turbulence pomocí specifické disipace turbulentní kinetické energie ω (nazývané také jako vířivost). Tento model je vhodný pro proudění s nižšími Reynoldsovými čísly a pro přechodný režim proudění. Nevýhodou tohoto modelu je nižší přesnost ve větší vzdálenosti od stěny. Za účelem odstranění nevýhod vznikly modifikované modely založené na modelu k-omega, a to modely BSL k-omega a SST k-omega. Model BSL k-omega je kombinací modelů k-epsilon a k-omega. Model SST k-omega jinak určuje specifickou disipaci (vířivost).

REYNOLDS STRESS

Model Reynolds Stress je založen na RANS metodě jako všechny předešlé modely a Reynoldsových napětí. Řeší přímo šest nezávislých diferenciálních rovnic pro Reynoldsova napětí, tři Navier- Stokesovy středované rovnice a rovnici kontinuity. Tento model je ze všech modelů založených na metodě RANS nejsložitější a nejnáročnější na výpočetní techniku. Je o něco málo přesnější než modely s turbulentní viskozitou, ale za cenu

několikanásobně delšího času řešení simulace. To je důvod proč se tento model využívá převážně pouze pro prostorově složité proudění.

4.1.6 ANSYS CFD POST

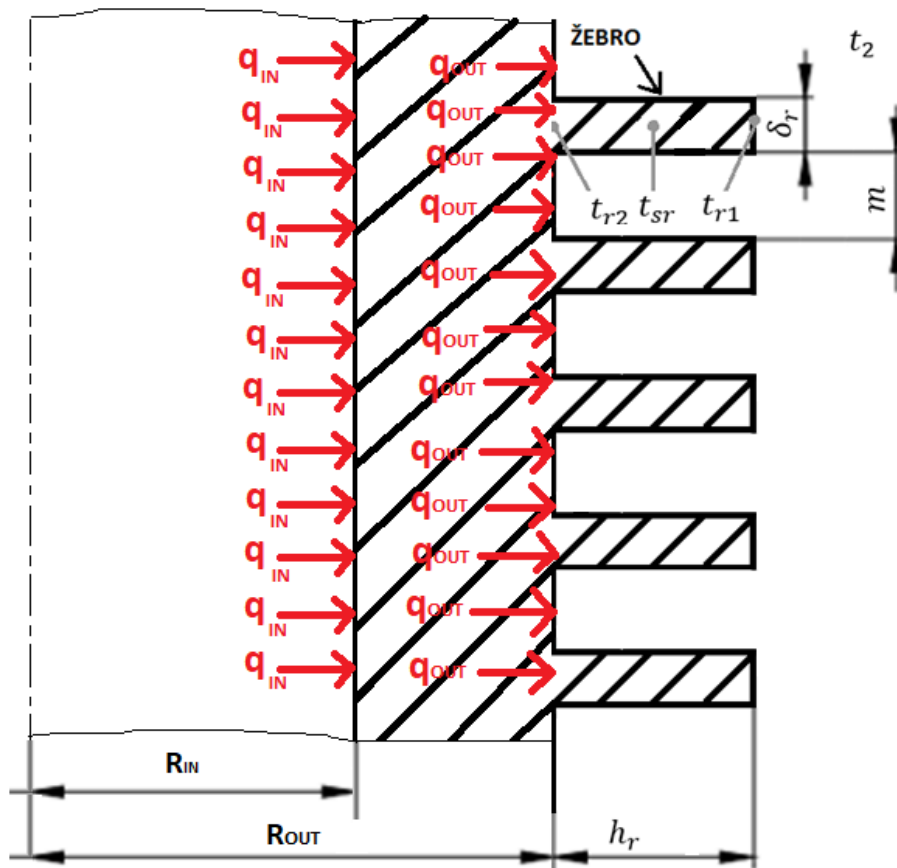
Další důležitou součástí počítačové simulace je vyhodnocení její výsledků. K vyhodnocení a grafickému zobrazení slouží program Ansys CFD post. Zde je možné vytvářet konturované obrázky počítaných veličin, vektorového zobrazení veličin, vytvářet grafy a dopočítávat další veličiny odvozené z veličin počítaných

5. MODELOVÝ VÝPOČET

Model je tvořen žebry na vertikální stěně s konstantním tepelným tokem, jak lze vidět na Obrázku 15. Geometrie 5-ti žeber byla zvolena pro zjednodušení. V Praxi kvůli výrobě je každé z těchto žeber šikmé, v této práci bylo také aplikováno další zjednodušení, a to že vychází z modelu kde tato žebra jsou pravoúhlá.

5.1 GEOMETRIE MODELU

V této kapitole je potřeba popsat zjednodušenou geometrii žebrovaného povrchu potřebnou pro výpočet v Kapitole 5.2 a 5.3, kde jsou rozměry a další veličiny zřejmé z Obrázku 15.



Obrázek 14 - Detail řezu OS s modelovaným žebrovaným povrchem pro

Na výše uvedeném Obrázku 15 z levé strany je zadáván tepelný tok, který je přes tento povrch odváděn do okolí. Geometrie žebra je pro tyto případy zjednodušena do jednoduchého obdélníkového žebra o dané délce žebra, šířce žebra, ale také vzdáleností mezi žebry a šířka mezižebního prostoru. Maximální teplota je na vnitřním povrchu OS.

Pro numerický výpočet je potřeba stanovit tepelný tok na vnitřní stěně OS. Minimální teplota je na konci žebra. Maximální přípustný výkon plně naloženého OS typu CASTOR 440/84M je 24 660 W. Bude-li se předpokládat, že žádné teplo nepřestupuje přes vrchní a spodní podstavu OS pro zjednodušení, tak pokud od vnějšího průměru OS se odečte tloušťka stěny dostane se výsledný poloměr vnitřní stěny OS, která je 0,93 m. Přes tuto válcovou plochu o velikosti 24 m² přestupuje teplo. Tepelný tok na této ploše je 1000 W/m². Na druhou stranu pro analytický výpočet bude potřeba definovat plošnou hustotu tepelného toku na vnější ploše OS, tedy ve vzdálenosti 1,33 m. Plocha přes kterou přestupuje teplo je 34,1 m² a s tím spjata plošná hustota tepelného toku 720 W/m².

V níže uvedené tabulce jsou uvedeny přesné hodnoty pro zjednodušený analytický výpočet soustavy 5 žeber. [3]

Tabulka 4-Základní parametry žebrovaného povrchu dle Obrázku č. 15

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	SOUČINITEĽ TEPELNÉ VODIVOSTI LITINY	36 W/mK
t_2	TEPLOTA OKOLNÍHO VZDUCHU	38 °C
q_{IN}	PLOŠNÁ HUSTOTA TEPELNÉHO TOKU, VZTAŽENA K VNITŘNÍMU POVRCHU OS	1000 W/m ²
q_{OUT}	PLOŠNÁ HUSTOTA TEPELNÉHO TOKU, VZTAŽENA K VNĚJŠÍMU POVRCHU OS	720 W/m ²

5.2 ZJEDNODUŠENÝ ANALYTICKÝ VÝPOČET

Analytickým výpočtem v této kapitole bude vypočítán dle korelací rovnic (19) a (24). Všechny vlastnosti vzduchu, se kterými se počítá byly převzaty ze zdroje [28].

5.2.1 VÝPOČET TEPLoty POVRCHU

Účelem kapitoly je provést analytický výpočet a tím zjistit teplotu povrchu na stěně OS a rychlost proudění vzduchu na vertikální stěně. Referenční teplotou je u analytického výpočtu teplota okolního vzduchu 38 °C. Pomocí Nusseltova čísla a součinitele přestupu tepla se vypočítá teplota povrchu.

Ta by měla vzhledem ke zjednodušení, které zde bylo aplikováno, korespondovat řádově s teplotou povrchu v numerickém výpočtu. Tedy analytický výpočet by měl s určitou přesností odpovídat numerickému.

Vztah č. (19) vychází z charakteristických rozměrů žebra a korelačních konstant. Výpočet v této kapitole musí být proveden interačně z prvotního odhadu teploty povrchu 85 °C. Jelikož je splněna nutná podmínka pro použití rovnice, budou se brát konstanty v tomto pořadí: $C_1 = 2,787 \cdot 10^{-8}$, $a = 0,745$; $b = 0,412$; $c = 0,656$, tak použití vztahu udávané autory a může být spočítáno Nusseltovo číslo (Nu), součinitel přestupu tepla (α_1) a následně teplota povrchu (T_p):

$$(Gr)_L = \frac{1}{T} (T_p - T_\infty) \cdot g \cdot L^3 = 2,36 \cdot 10^5 \quad (27)$$

$$(Gr) \cdot (Pr) \cdot \left(\frac{n \cdot H}{s} \right) = 3,57 \cdot 10^7 \quad (28)$$

$$(Nu)_{L,1} = 0,0464 \quad (29)$$

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda}{L} = 5,57 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (30)$$

$$q_1 = \alpha (T_p - T_\infty) \quad (31)$$

$$T_p = 51,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad (32)$$

U druhé korelace Bar & Cohen [19] je definováno modifikované Grashoffovo podobnostní číslo, které se přepočítává na základě charakteristického rozměru a konstant z článku [19]. Jelikož je splněna také podmínka $500 \leq (Gr)_L' Pr \leq 10^6$, může být spočítáno Nusseltovo číslo dle rovnice č (24), součinitel přestupu tepla a následně může být spočítána teplota povrchu:

$$(Gr)_L' = Gr \cdot \left(\exp \left(-\frac{b_D}{s} \right) \left(\frac{L}{(H \cdot b_D)^{0,5}} \right) \right) = 1,96 \cdot 10^2 \quad (33)$$

$$(Nu)_{L,2} = 2,12 \quad (34)$$

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda}{L} = 2,10 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (35)$$

$$T_p = 73,8 \text{ }^\circ\text{C} \quad (36)$$

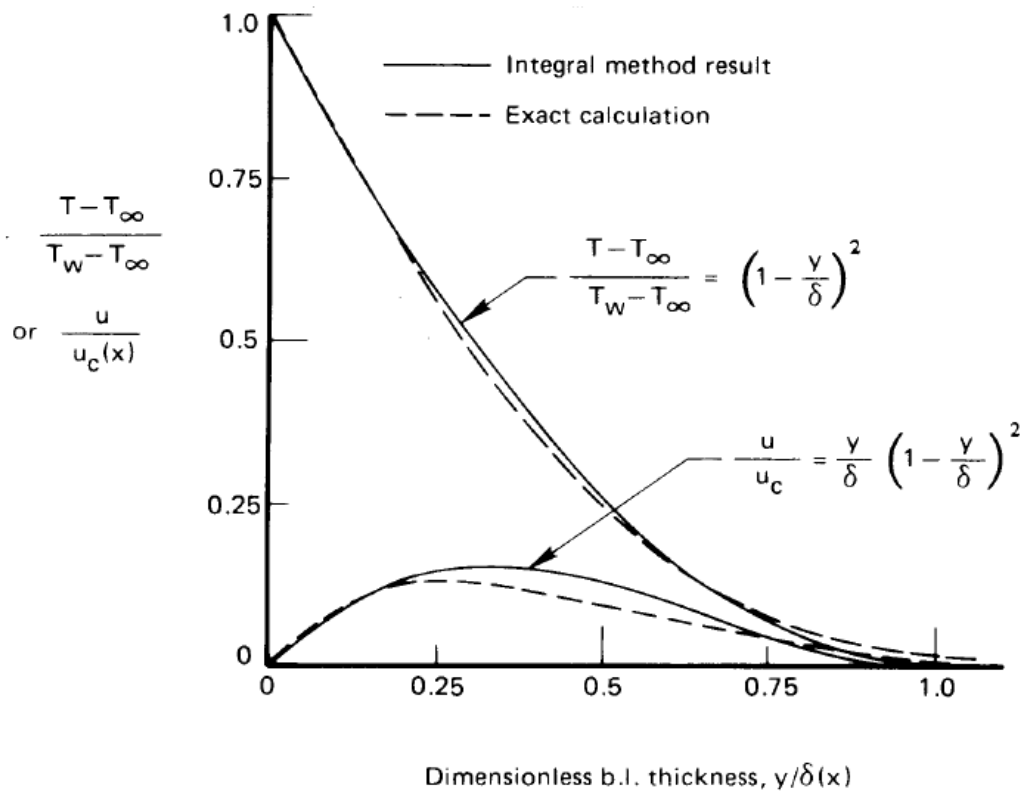
Nepřesnost výpočtu teploty povrchu může být zapříčiněna mnoha faktory. Jak uvádí sám autor [19], je vhodná pro dlouhá žebra. Jako další parametr, který ovlivňuje Nusseltovo číslo je počet žebor, u analytického výpočtu se počítá se všemi 65 žebry, na druhou stranu u numerického je počítáno jen 5 kvůli zjednodušení výpočtu. Další rozdíly mohly vzniknout rozdílným přístupem k tvorbě korelace kde se v jedné se počítá s počtem žebor v druhé nikoliv

Všechny parametry vzduchu byly z prvotního odhadu 85 °C přepočítány dle výsledku na 51,5°C pro první korelaci a 73,8°C v případě druhé, aby se předešlo hrubým chybám.

5.2.2 VÝPOČET RYCHLOSTI PROUDĚNÍ

Rychlostní profil při laminární přirození konvekci na hladké vertikální stěně lze vidět na Obrázku 16. Kde na ose x je definována bezrozměrná vzdálenost a na ose y

bezrozměrná rychlost. Bezrozměrná vzdálenost je podíl skutečné vzdálenosti a mezní vrstvy. Bezrozměrná rychlost je podíl maximální rychlosti a rychlosti ve vzdálenosti x od vertikální stěny.



Obrázek 15 - Teplotní a rychlostní profil pro $(Pr = 0,7)$ a předpokladu laminárního proudění [25]

Rychlost proudění vzduchu se spočítá na základě korelací dle literatury [25], lze spočítat dle vztahu:

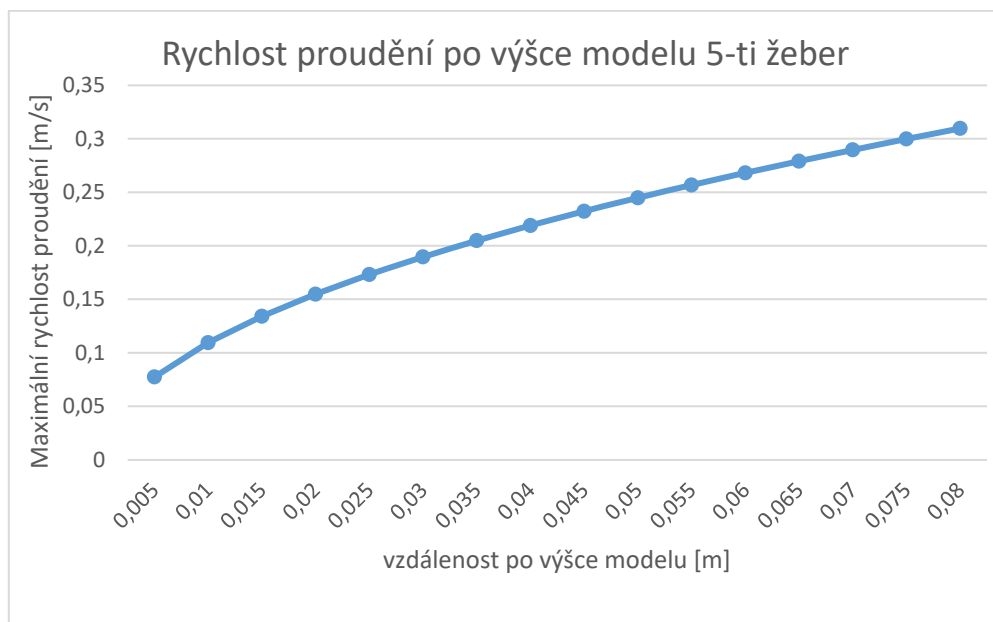
$$u_c(x) = C_1 \cdot \frac{\beta \cdot |T_p - T_\infty|}{\nu} \cdot \delta_c^2(x) \quad (37)$$

Kde konstanta C_1 a δ_c se spočítá:

$$C_1 = \frac{\text{Pr}}{3 \left(\frac{20}{21} + \text{Pr} \right)} \quad (38)$$

$$\delta_c = \sqrt[4]{\frac{240 \left(\frac{20}{21} + \text{Pr} \right)}{\text{Pr}^2 \cdot \frac{g \cdot \beta \cdot |T_p - T_\infty|}{v^2}}} \cdot x \quad (39)$$

Při aplikaci rovnice (37) a vzdálenosti 0,08 což odpovídá výšce 5-tého žebra dle Obrázku 15. Rychlost u stěny v této vzdálenosti je rovna 0,31 m/s.



Graf 1- Rychlost proudění po výšce modelu 5-ti žeber

Graf 1 ukazuje rychlost proudění vzduchu po výšce stěny. Na počátku kde je rychlost téměř nulová až po maximální rychlost ve výšce 0,08m od prvního žebra modelu.

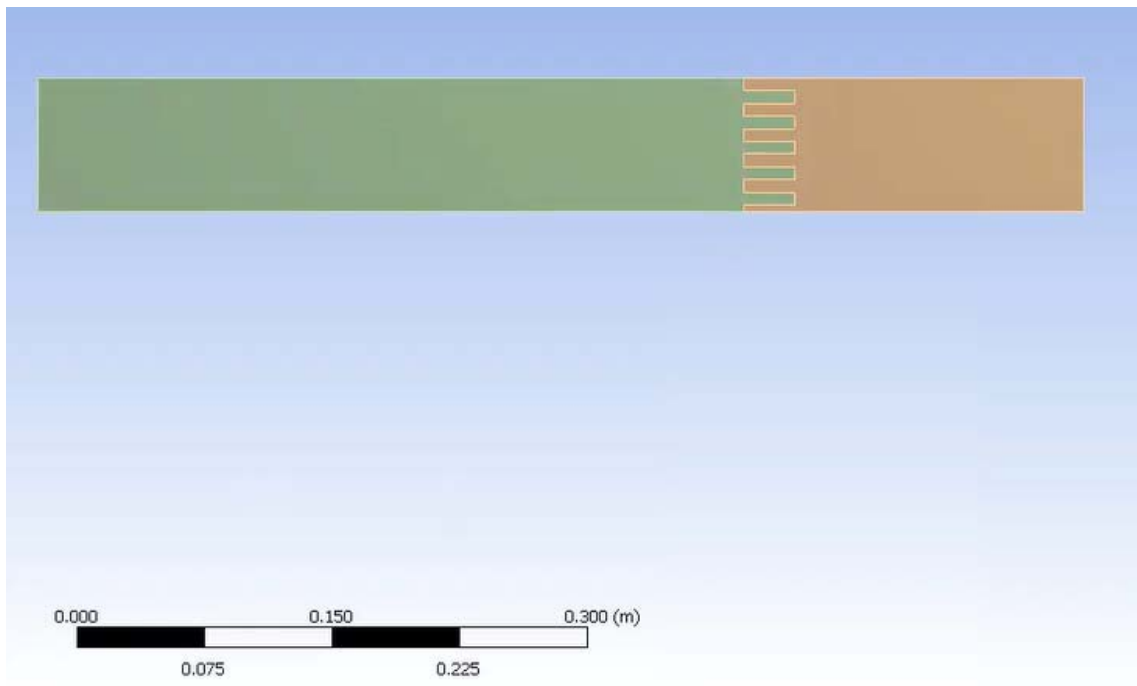
5.3 MODEL PRO NUMERICKÝ VÝPOČET

Numerickým výpočtem provedeným v rámci bakalářské práce je výpočet konvekce ze soustavy žeber. Model žeber byl tedy volen s ohledem na kapitolu 5.1 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.

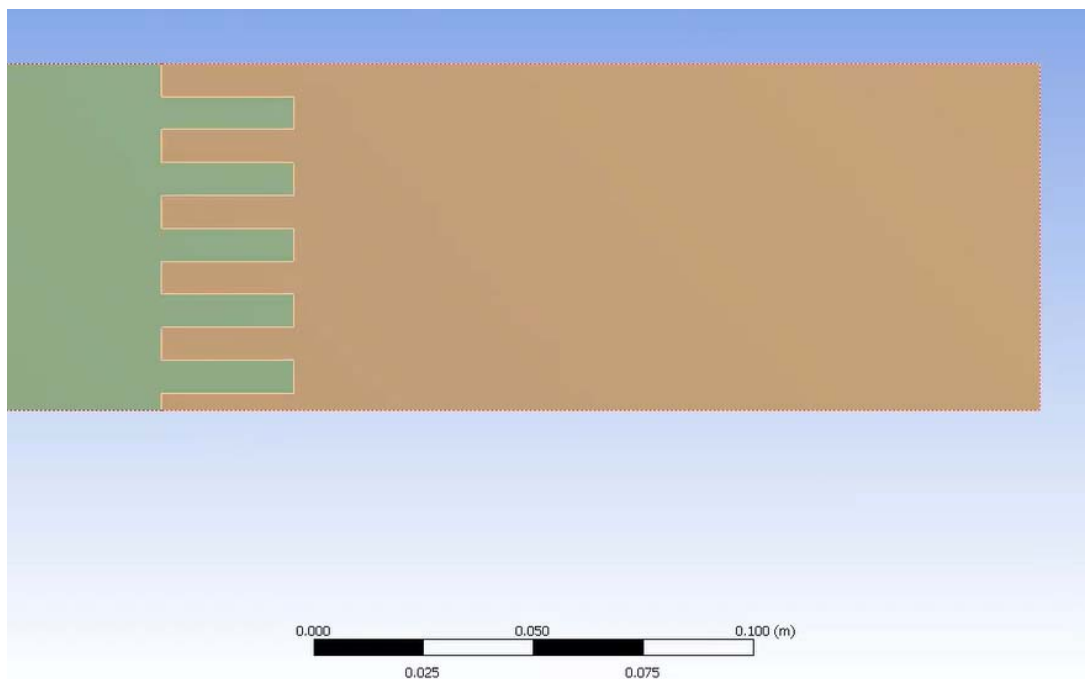
5.3.1 GEOMETRIE A VLASTNOSTI VÝPOČTU

Jak lze vidět, jedná se o 2D zobrazení s rovinnou geometrii. Na Obrázku 17 lze vidět zelenou barvou znázorněný model s pěti žebry.



Obrázek 16 - Model soustavy pěti žeber

Levou vertikální stěnou je zadána plošná hustota tepelného toku, což je hraniční podmínka. Tepelný tok toku prochází vnitřní stěnou modelu, odkud přes materiál modelu prostupuje až vnější povrch modelu. Zde v tomto případě o soustavě pěti žeber. Hnědou barvou je zobrazen vzduch, do kterého přestupuje teplo ze žeber přirozenou konvekcí. Rozměry žeber jsou zadány dle Tabulky 4. Ze vzhledu žeber je patrné, že i u žeber došlo ke zjednodušení a při výpočtu se počítá s obdélníkovými žebry, jak lze vidět z Obrázku 18, je to rozdíl proti skutečnosti, kde jsou žebra zkosená.

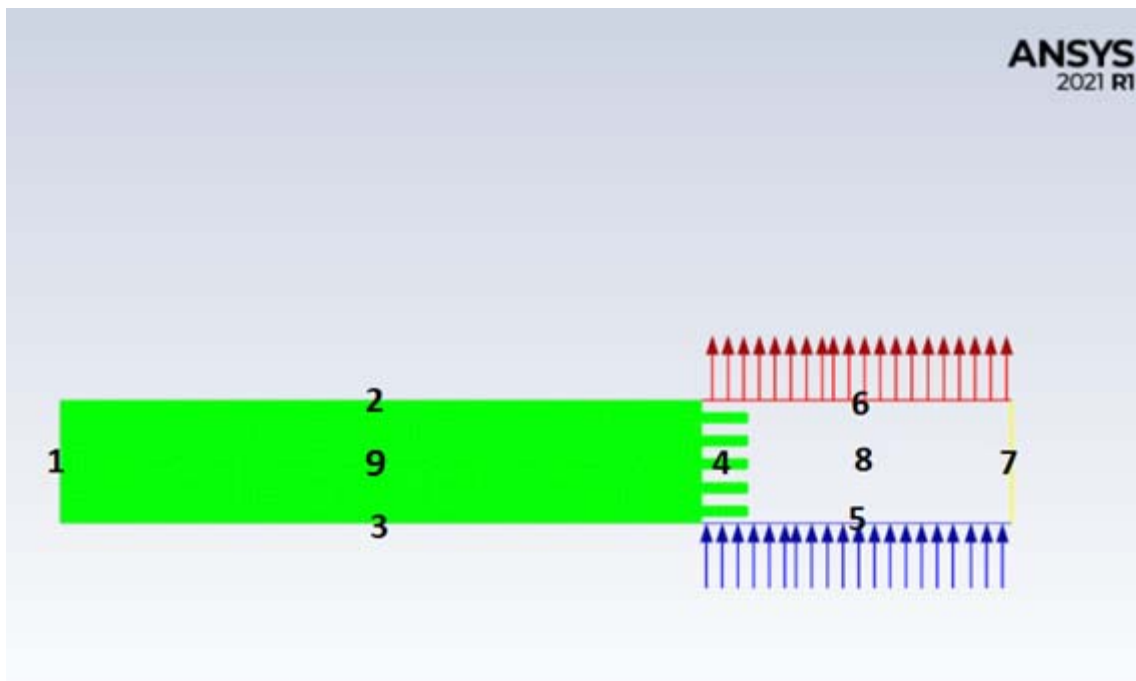


Obrázek 17 - Detail modelu

Úloha je zadána plošnou hustotou tepelného toku, na základě které je vypočítáno teplotní pole ať už ve vlastní stěně, žebrech, nebo ve vzduchu. Hraniční podmínka teploty vzduchu v nekonečnu je 38 °C jakožto maximální hodnota teploty ve vyhlášce [15]. Zde je definována pouze úloha přirozené konvekce bez dalších vlivů jako radiace nebo dalšího proudění, které reálně vznikají díky průduchům v meziskladě, kde je OS skladován. Termo-fyzikální vlastností OS jsou brány, jako vlastnosti litiny.

5.3.2 VÝPOČTOVÁ SÍŤ A HRANIČNÍ PODMÍNKY

S použitím 2D zobrazení a geometrie byla zvolena převážně čtvercová síť. Pro tvorbu výpočtové sítě byl zvolen software ANSYS – Meshing. Výše popsaná geometrie byla vysítována tak, aby kvalita sítě dle parametrů dosahovala kvality, a zároveň aby byla zachována její konformnost i na rozhraní pevného materiálu a vzduchu. Celá síť byla rozdělena na pevné těleso OS a vzduch. Síť pevného tělesa počítá teplotní pole v materiálu na základě tepelného toku ze stěny modelu. Na síti v objemu, který zaujímá vzduch, je nastavena hraniční podmínka a to 38 °C. 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 0,029 W/mK [28], což odpovídá atmosférickým podmínkám ve skladu. Hraniční podmínky jsou nastaveny na základě tlakového vstupu a výstupu.



Obrázek 18 - Hraniční podmínky modelu

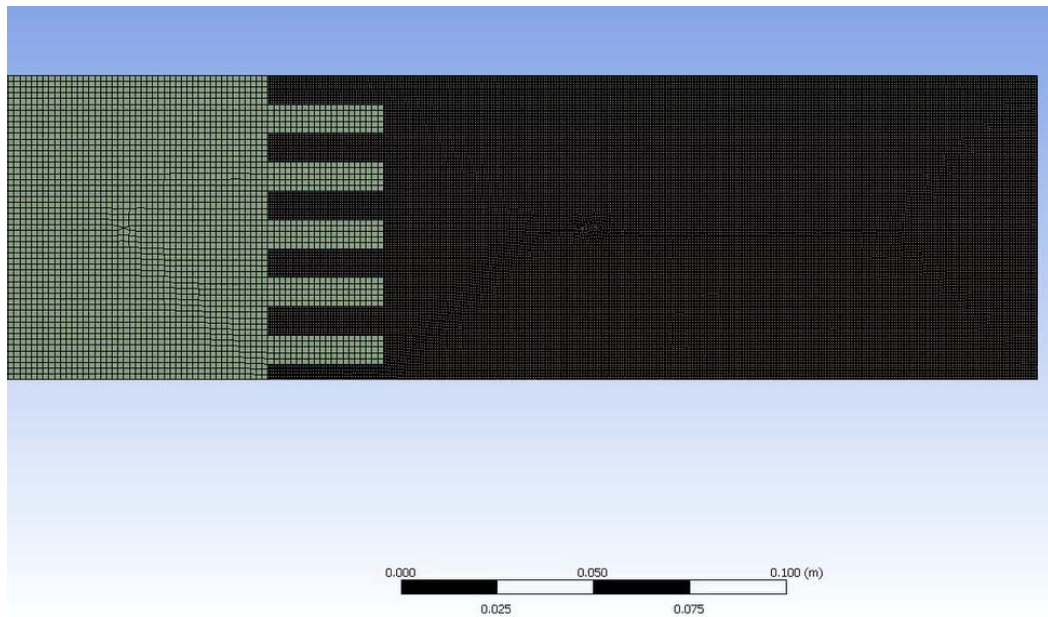
Tepelný tok je zadán zleva křivkou č. 1, zelenou barvou je ohraničen materiál modelu tedy šedá litina o hustotě 7750 Kg/m³ [28] a součiniteli přestupu tepla 36 W/m K [28]. Je důležité zdůraznit, že celý tepelný tok prostupuje k žebřům na vnějším povrchu, odkud

přirozenou konvekcí teplo přestupuje do okolního vzduchu. Mezi podmínkou č. 5 a 6 je potřeba počítat s hydrostatickým tlakovým rozdílem. Detailní seznam druhů hraničních podmínek je uveden v následující tabulce:

Tabulka 5 - Typy hraničních podmínek

ČÍSLO HRANIČNÍ PODMÍNKY	DRUH PODMÍNKY
1	Stěna, tepelný tok $q = 1000 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
2	Adiabatická hraniční podmínka
3	Adiabatická hraniční podmínka
4	Rozhraní mezi pevným materiálem a vzduchem
5	Tlaková vstupní – 98.000 Pa
6	Tlaková výstupní – 98.150 Pa
7	Symetrie
8	Látka - vzduch
9	Materiál - litina

Tlaková výstupní hraniční podmínka je snížena o hydrostatický tlak oproti tlakové vstupní hraniční podmínce.



Obrázek 19 - Detail Sítě

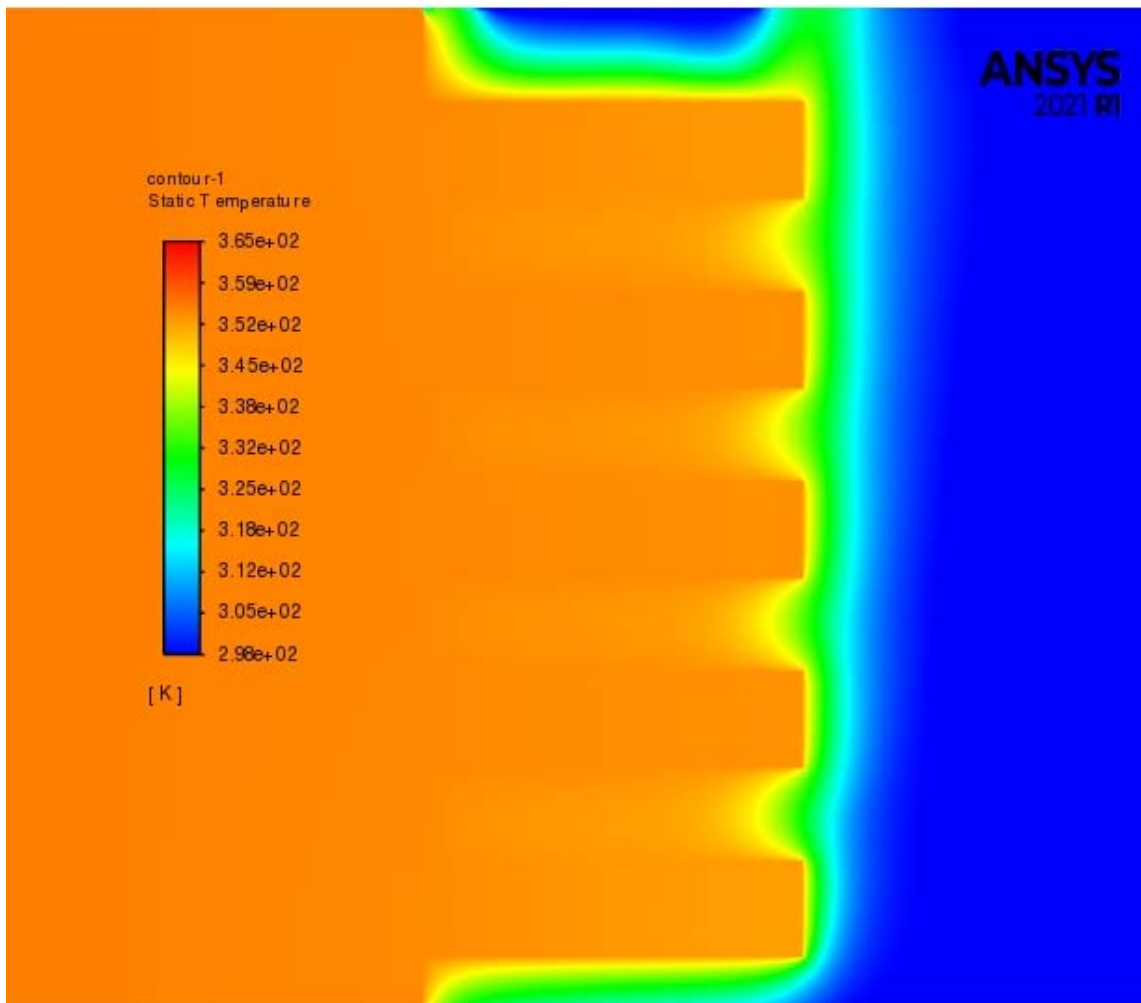
5.3.3 VÝPOČET A ANALÝZA VÝSLEDKŮ

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 2021 R1.

Maximální teplota je na vnitřním povrchu modelu, kde teplota dosahuje kolem 93 °C. Vedením tepla kondukcí litinou se teplota postupně snižuje až na povrch žebra modelu, kde je již průměrná teplota na povrchu 77 °C a vlivem přirozené konvekce bez přítomnosti radiace je teplo předáno do okolí. Výpočetní model je řešen stacionárně.

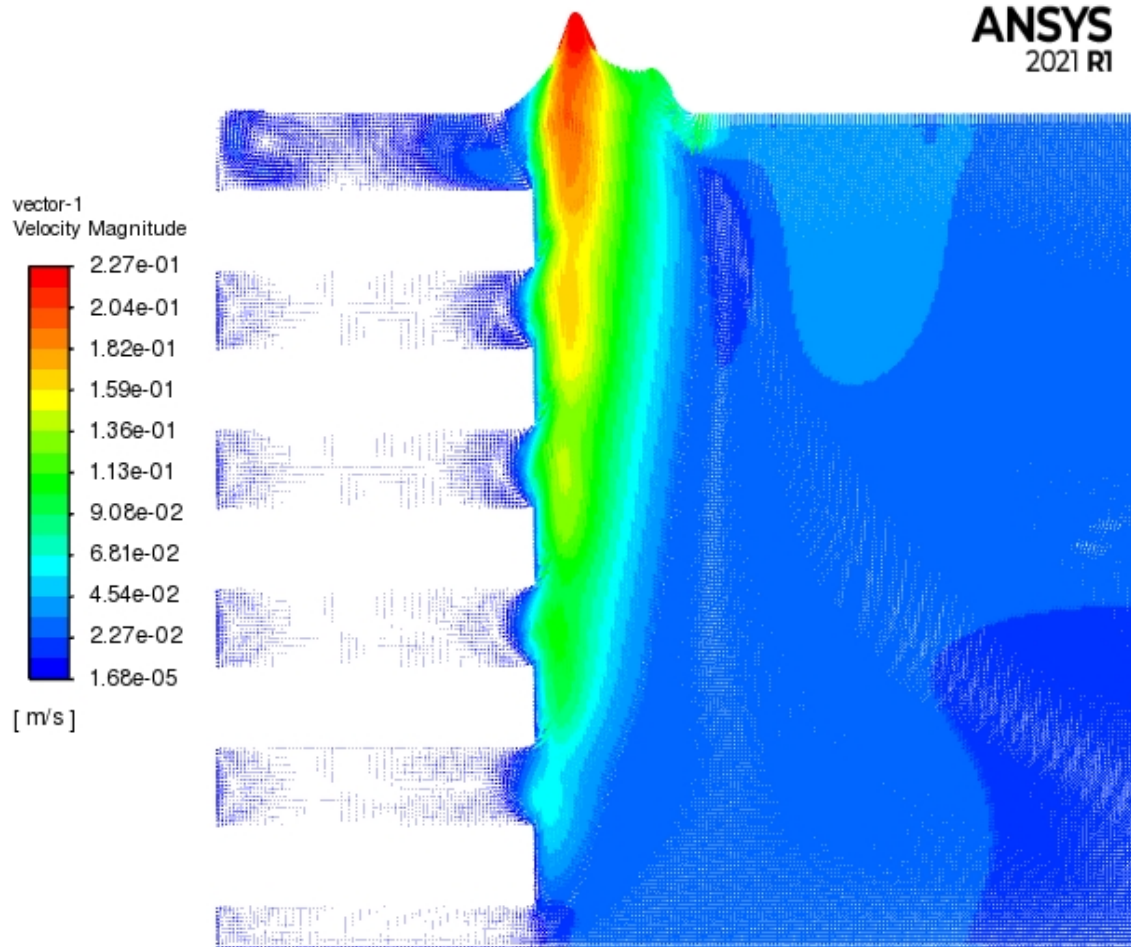
Model turbulence byl zvolen dle doporučení na základě článku o numerickém řešení přestupu tepla na žebrovaném povrchu [23] jako K- ϵ . Detail teplotního pole modelu 5 žebor lze vidět z Obrázku 21.

Na výstupní tlakové podmínce by měla jít kapalina pouze ven. Jestliže dochází ke zpětnému proudění do modelu na výstupní hraniční podmínce tlakové tak je zapotřebí zadat teplotu o hodnotě referenční teploty modelu což odpovídá 38 °C. Tuto nepřesnost modelu lze vidět nad nejvýše položený žebrem.



Obrázek 20 - Detail teploty na simulovaném modelu pěti žeber

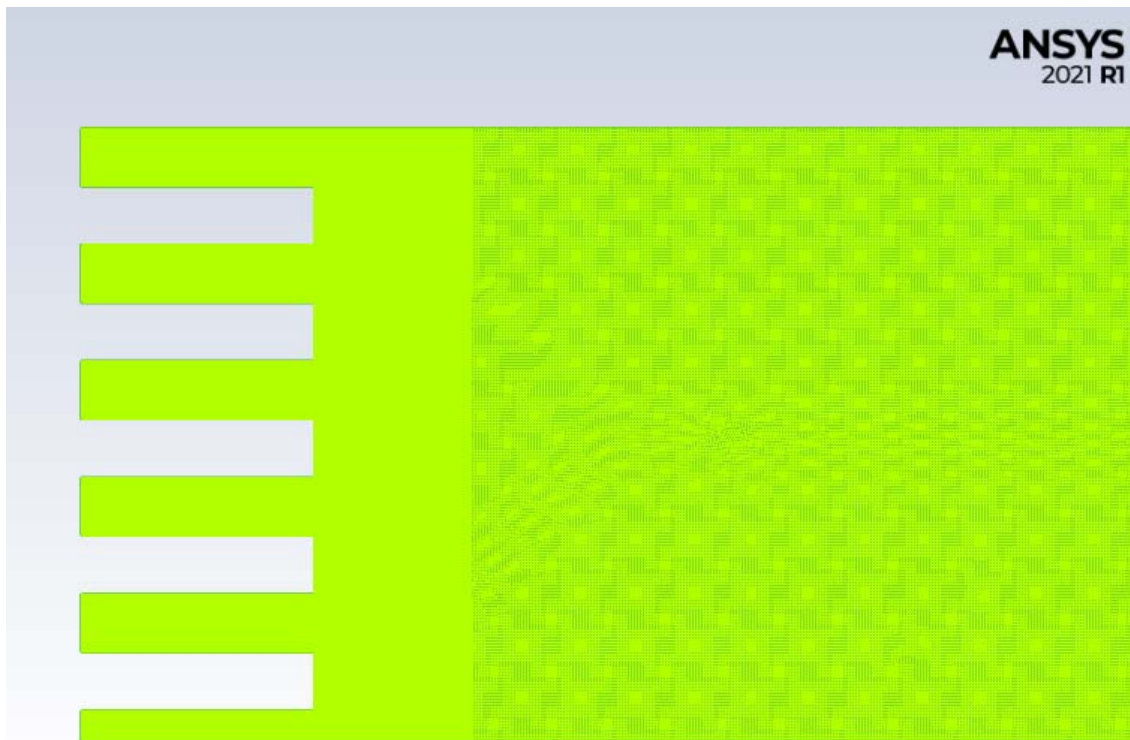
Z Obrázku 21 lze vidět detail modelu 5 žeber. V modelovaném případě velikost mezižebního prostoru není dostatečně velká a nedochází tedy k dostatečnému odvodu tepla. Ohřátý vzduch zde neproudí, v mezižebním prostoru tedy není žádná konvekce a dochází zde jen ke kondukcii. Dalším výsledkem modelu je vektorové pole vzduchu, kde maximální rychlost proudění dosahuje 0,227 m/s a z Obrázku 21 lze vidět, že ve větší vzdálenosti od modelovaného povrchu vzduch téměř vůbec neproudí.



Obrázek 21 - Vektorové pole proudění vzduchu pro K-ε model turbulence

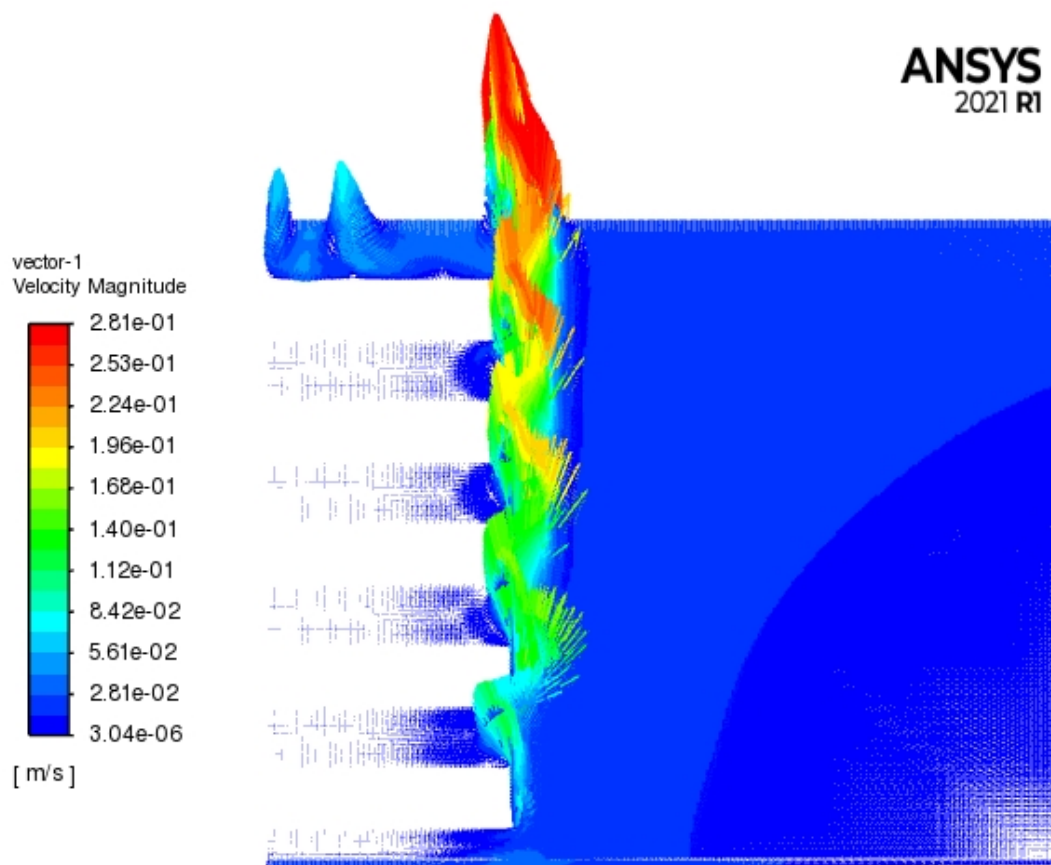
5.3.4 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

Pro porovnání vypočtených dat je nezbytné provedení citlivostní analýzy. Nejprve pro dosažení vyšší přesnosti bylo v blízké vzdálenosti žebek zvýšena hustota sítě na dvojnásobek. Tento malý detail lze vidět z Obrázku 23.



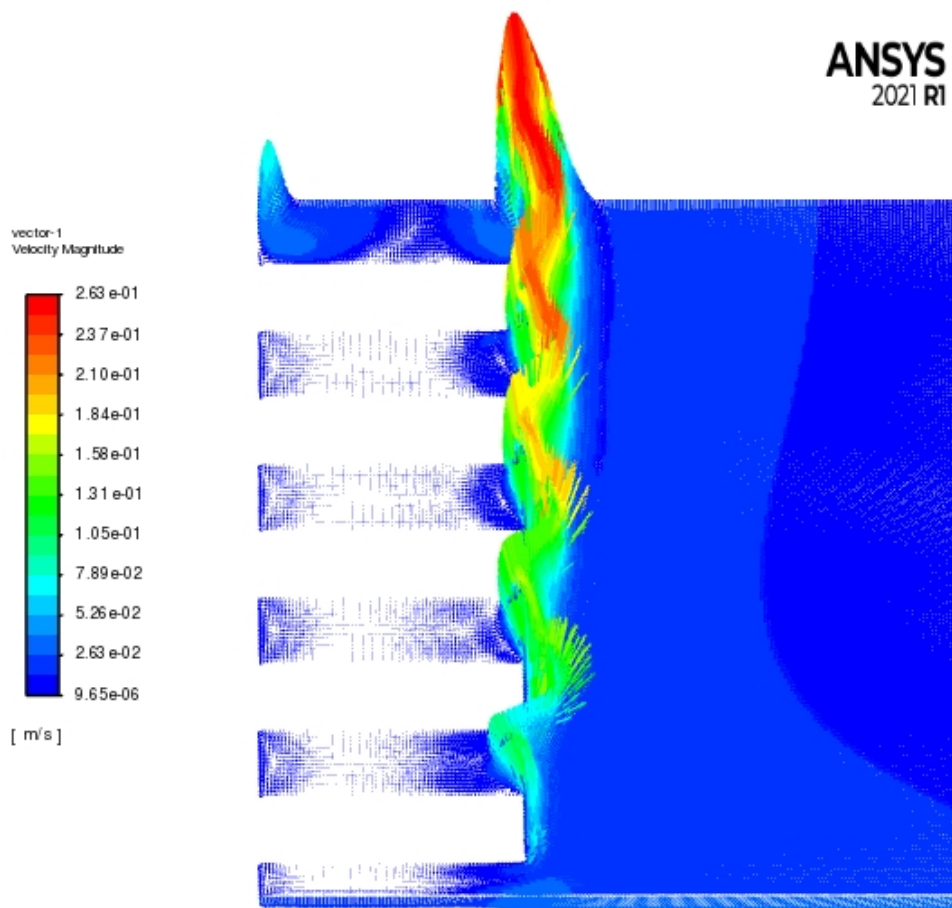
Obrázek 22 - Detail zkvalitnění sítě

Numerický výpočet byl proveden i s jiným modelem turbulence a to pro K-omega model turbulence. Jak již bylo zmíněno v Kapitole 4.1 u tohoto modelu, je tento model vhodný pro nižší Reynoldsova čísla, nevýhodou zde je nižší přesnost výpočtu s rostoucí vzdáleností od stěny. Z Obrázku 23, lze vidět zvýšení rychlostního pole na maximální rychlost 0,281 m/s. Tento model byl vytvořen pouze za účelem srovnání s hlavním, doporučeným [23] modelem turbulence.



Obrázek 23 - Vektorové pole proudění vzduchu pro K-omega model turbulence

Jako další model turbulence byl zvolen Reynolds Stress, který založen na RANS metodě a Reynoldsových napětí jako předešlý model turbulence. Řeší přímo šest nezávislých diferenciálních rovnic pro Reynoldsova napětí a tedy i výpočet trvá výrazně déle než je tomu u předešlých případů. Vizuální vzhled se podobá K-omega modelu turbulence, každopádně lze vidět zvýšené proudění v ose X, kde u modelu turbulence K- ϵ probíhá proudění převážně jen v ose Y směrem vzhůru.

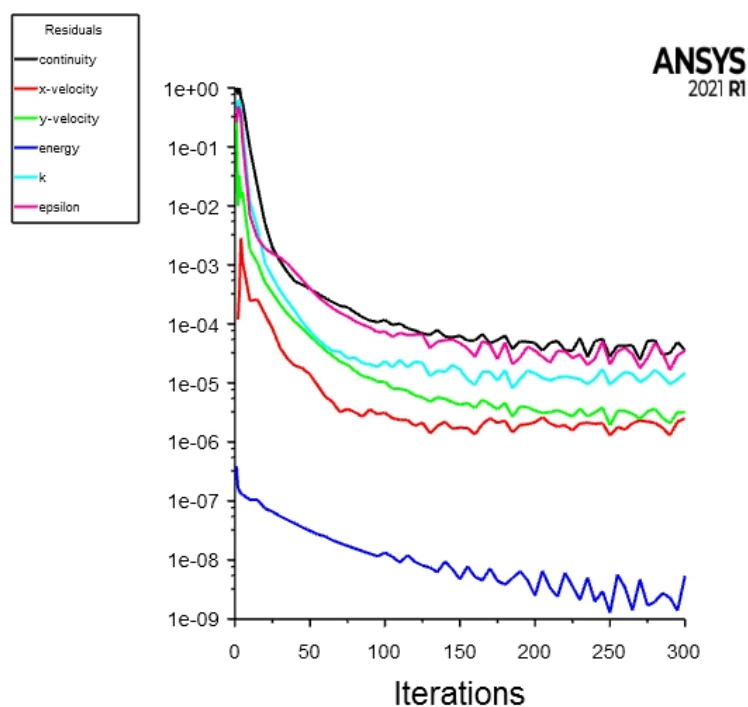


Obrázek 24 - Vektorové pole proudění vzduchu pro Reynolds Stress model turbulence

5.3.5 KONVERGENCE

K tomu, aby mohlo být numerické řešení programu ANSYS Fluent považováno za dokončené, je důležité získat tzv. konvergentní řešení. 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 $1 \cdot 10^{-3}$ u všech sledovaných veličin oproti počátečním hodnotám, kromě energie, kde hodnota musí klesnout pod $1 \cdot 10^{-6}$ a zároveň je jejich průběh ustálený (průběh neroste ani nejsou pozorovány fluktuace), lze prohlásit dle doporučení [23] řešení za relativně konvergentní.

Z následujícího Obrázku 26 lze vidět výsledná residua pro numerický výpočet.



Obrázek 25 - Residua pro K-ε model turbulence

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. Aby se přesnost výpočtu potvrdila bez chyb, je za potřebí udělat detailní kontrolu zákona zachování energie a zákona zachování hmotnosti. Díky funkci, která spočítá souhrnné integrální hodnoty na vstupu a výstupu. Energie na výstupu se dle ověření shoduje s energií na vstupu společně s energií která prošla přes pevnou stěnu. U zákona zachování hmotnosti je potvrzeno, co do systému vstoupí v jednotkách kg/s tak ze systému vystoupí.

5.4 SROVNÁNÍ NUMERICKÉHO VÝPOČTU S ANALYTICKÝM

Správnost fyzikálního modelu lze odvodit ze srovnání výsledku analytického a numerického výpočtu. Díky analytickému výpočtu se díky korelaci Harahap a McManuse v kapitole 3.2.1 dospělo v teplotě na povrchu žebra $51,5^{\circ}\text{C}$. Pro srovnání u druhé korelace Bar a Cohen byla hodnota $73,8^{\circ}\text{C}$. Pro srovnání těchto hodnot byla průměrná teplota povrchu v numerickém výpočtu stanovena na 77°C . Teploty jsou obecně závislé na mnoha faktorech těmi jsou: konstrukce OS, kde předpokládáme, že se jedná o monolitický OS vyroben z šedé litiny, reálně se jedná o mnoho různých materiálů přes které přestupuje teplo z OS ven na žebrovaný povrch. Dále byla diskutována rychlost proudění vzduchu podél vertikální desky u přirozené konvekce. Dle dostupné literatury na toto téma [25] byla použita rovnice (37) po dopočítání konstant (38) a (39) a došlo se k závěru, že ve vzdálenosti posledního žebra je rychlost proudění $0,31\text{ m/s}$. Jako výsledek v numerickém výpočtu dle Obrázku 22 lze vidět maximální rychlost modelu $0,23\text{ m/s}$. Rozdíl ve spočítaných veličinách, jako byla teplota povrchu a rychlost proudění oproti odečteným hodnotám z numerického výpočtu. Nepřesnosti, které tyto výpočty mohli ovlivnit byli zejména: zjednodušení modelu jen do soustavy 5ti žeber, aproximace OS jako rovinou stěnu, zanedbání radiace a zanedbání nucené konvekce ke které kolem OS v případě skladování dochází.

6. ZÁVĚR

Skladovací kontejnery pro použité jaderné palivo představují důležitou bezpečnostní bariéru při ochraně živých organismů před radioaktivními látkami a ionizujícím zářením. Z tohoto důvodu je jejich vývoji věnována velká pozornost. Postupy, které se v daném odvětví při této činnosti aplikují, jsou nejen teoreticky ale především i prakticky ověřeny zkouškami, aby vždy byla garantována vysoká úroveň bezpečnosti. Výpočtové situace jsou záměrně řešeny v podmínkách příklánějících se více k extrémním případům, ke kterým často v praxi nedochází, a mnohdy ani principiálně docházet nemůže. V duchu této konzervativní myšlenky je provedena i praktická část této práce.

Provedený CFD výpočet ukázal teploty na povrchu. Takto žebrovaný povrch není optimální z hlediska proudění, jelikož nedochází k dostatečnému proudění vzduchu v mezižebním 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 se zjednodušeným analytickým výpočtem jak bylo provedeno v kapitole 5.2.

Přístup analytického tak i numerického výpočtu byl velmi zjednodušený. V práci byl spočítán analytický výpočet na základě dvou různých korelací a v kapitole 5.4 diskutováno srovnání těchto výsledků. Naměřená i spočítaná teplota povrchu byly shodné alespoň řádově.

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, České vysoké učení technické v Praze. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, 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/barton.pdf>
- [5] KOBYLKA, D. Osobní konzultace na KJR v Holešovičkách (Říjen 2020-Leden 2022)
- [6] ŠKORŇA, M. *Chlazení obalového souboru CASTOR 440/84M:*, Bakalářská práce. Praha 2017, 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, Plzeň 2013, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Strojní, , Vedoucí práce Jan Zdebor.
- [8] SÚJB [online] [[cit. 8.8.2021] <<http://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/jaderna-zarizeni/sklady-vyhoreleho-jaderneho-paliva/mezisklad-vyhoreleho-paliva-dukovany>>
- [9] NELSON, A. 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*: Bakalářská práce, Praha 2015, 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*, Bakalářská práce, Liberec 2010, 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] ŠVARŤÍČEK, T. *Analýza teplotního pole kontejneru pro použité palivo*. Bakalářská práce. 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, České vysoké učení technické v Praze. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, katedra jaderných reaktorů. Vedoucí práce Dušan Kobyłka.
- [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, Plzeň 2015, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, , Vedoucí Práce Roman Pechánek,
- [25] LIENHARD IV J, LIENHARD V. J. Heat transfer textbook – Third edition ISBN: 9780486837352
- [26] GREGOR, M. *Návrh vnitřní vestavby (koše) kontejneru pro palivo reaktoru typu VVER 1000*, Diplomová práce, Plzeň 2014; Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní. Vedoucí Práce Josef Formánek.
- [27] ŠIMBERSKÝ, M. *Simulace proudění vzduchu a stanovení trvalé tlakové ztáty pro normalizovanou clonu*, Diplomová práce, Brno 2014, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Soňa Šedivá.
- [28] RAŽNJEVIČ, K. Termodynamické tabulky. Bratislava: Alfa, 1984.
- [29] SÚJB [online] [cit. 12.12.2021] Bezpečnostní návod BN-02.2 – Skladování vyhořelého jaderného paliva v samostatných jaderných zařízeních, Dostupné na :
<https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/Skladovani_VJP_v_sa mostatnych_JZ_BN02_2.pdf>