

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: Stavba jaderně energetických zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Teplotní výpočet dilatací kontejneru pro skladování
vyhořelého jaderného paliva**

Autor: Bc. Jan Jílek

Vedoucí práce: Ing. Pavel Žitek

Akademický rok: **2013/2014**

Prohlášení

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

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

V Plzni 23.5.2014

Podpis

Autorská práva

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

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Pavlu Žitkovi a konzultantovi Ing. Jaroslavu Štěchovi za vedení a připomínky při zpracovávání diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Františku Sedláčkovi za cenné rady při práci se systémem NX.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Jílek	Jméno Jan	
STUDIJNÍ OBOR	2302T041 „Stavba jaderně energetických zařízení“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Žitek	Jméno Pavel	
PRACOVISTĚ	ZČU-FST-KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	NEHODÍCÍ ŠKRTNĚTE
NÁZEV PRÁCE	Teplotní výpočet dilatací koše kontejneru pro skladování vyhořelého jaderného paliva		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2014
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

Počet stran (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	94	TEXTOVÁ ČÁST	81	GRAFICKÁ ČÁST	1
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>V této práci je popsán palivový cyklus jaderného paliva. Popsány jsou všechny fáze cyklu. Zvláštní pozornost je věnována skladovacím kontejnerům, na něž navazuje praktická část DP. V praktické části je navržena metodika výpočtu teplotního pole vedením a následné dilatace na koši obalového souboru pomocí MKP, popis výpočtového modelu a výpočtu. Výsledky výpočtu jsou zpracovány do grafické podoby a hodnoceny v závěrečné části práce.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>Teplotní pole, vedení tepla, palivový cyklus, CASTOR, metoda konečných prvků, teplotní dilatace</p>

SUMMARY OF MASTER THESIS

AUTHOR	Surname Jílek	Name Jan	
FIELD OF STUDY	2302T041 „ Nuclear Power Equipment Design “		
SUPERVISOR	Surname (inclusive of degree) Ing. Žitek	Name Pavel	
INSTITUTION	ZČU-FST-KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITTLE OF THE WORK	Thermal dilatation computation of the container for spent nuclear fuel storage		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power System Engineering	SUBMITTED IN	2014
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	94	TEXT PART	81	GRAPHICAL PART	1
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION (MAX 10 ŘÁDEK) TOPIC,GOAL,RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This work deals with the uranium fuel cycle. All phases of the cycle are described, especially the spent fuel storage. The practical part suggests the method of the thermal field and dilatations computation using FEM method. The computation is performed on the basket of the spent fuel container. Work contains detail FEM model and computation description. Computed results are processed in graphical form and evaluated.</p>
KEY WORDS	<p>Temperature field, heat conduction, fuel cycle, CASTOR container, finite element method, temperature dilatation</p>

Seznam použitých označení, indexů a jednotek

Označení a jednotky veličin

a	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Součinitel teplotové vodivosti
C_p	$[\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}]$	Měrná tepelná kapacita
E	$[\text{MPa}]$	Modul pružnosti materiálu v tahu
K_{ef}	$[1]$	Multiplikační faktor efektivní
K_∞	$[1]$	Multiplikační faktor v nekonečném prostředí
K	$[1]$	Koeficient násobení
N_d	$[\text{W}]$	Dodatečný výkon
N_e	$[\text{W}]$	Výkon elektrický
N_{nom}	$[\text{W}]$	Výkon nominální
N_t	$[\text{W}]$	Tepelný výkon
r	$[\text{mm}]$	Polohový vektor
R	$[\text{K}/\text{W}]$	Tepelný odpor
R_m	$[\text{MPa}]$	Mez pevnosti
$R_{p0,2}$	$[\text{MPa}]$	Mez kluzu
t_{int}	$[\text{°C}]$	Teplota na vnitřku
t_{out}	$[\text{°C}]$	Teplota na vnějšku
T	$[\text{°C}]$	Teplota
V_N	$[\text{m}^3]$	Původní objem
\dot{q}	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	Měrný tepelný tok
α	$[\text{K}^{-1}]$	Součinitel teplotní roztažnosti
γ	$[1]$	Objemová roztažnost
λ	$[\text{W}/\text{mK}]$	Součinitel tepelné vodivosti
ν	$[1]$	Poissonova konstanta
Σ_a	$[\text{m}^2]$	Účinný průřez pro záchyt neutronů
ρ	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	Hustota
τ	$[\text{s}]$	Čas
φ	$[\text{Rad}]$	Úhel

Zkratky

EDU	Elektrárna Dukovany
ETE	Elektrárna Temelín
MOX	Mixed Oxid Fuel
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SWU	Separation Work Unit
WEC	Westing House Company
WIG	Wolfram Inert Gas

Seznam tabulek

2.1	Základní typy jaderných paliv	6
2.2	Koroze a vodíková křehkost u materiálů uvnitř AZ	20
2.3	Složení materiálů TVSA-T	21
2.4	Souhrnné informace k TVSA-T	21
2.5	Souhrnné informace o souboru VVANTAGE-6	23
2.6	Materiály souboru VVANTAGE-6	23
2.7	Souhrnné informace o palivovém souboru VVER 440	27
2.8	Souhrnné informace k souboru CASTOR 440/84M	33
2.9	Souhrnné informace k souboru CASTOR 1000/19	35
3.1	Součinitele délkové teplotní roztažnosti některých materiálů	50
4.1	Mechanické, fyzikální a teplofyzikální vlastnosti materiálů	52
4.2	Souhrn maximálních a minimálních teplot elementů	70
4.3	Vypočtené deformace koše	74
4.4	Souhrn výsledků	77

Seznam obrázků

2.1	Schéma palivového cyklu	2
2.2	a) smolinec b) zeunerit	4
2.3	Žlutý koláč	5
2.4	Palivové pruty pro lehkovodní reaktor	11
2.5	Štěpná jaderná reakce	12
2.6	Základní stavy jaderného reaktoru	15
2.7	Konstrukce kazety TVSA-T	18
2.8	Hlava a dolní část kazety s filtrem cizích částic	19
2.9	Konstrukce palivového souboru VVANTAGE-6	24
2.10	Konstrukce palivového souboru VVER 440	25
2.11	Palivový proutek VVER 440	26
2.12	Pohled do bazénu vyhořelého jaderného paliva při zavážení	29
2.13	Krytý mezisklad vyhořelého paliva Jaslovské Bohunice	31
2.14	Konstrukce obalového souboru CASTOR 440/84M	33
2.15	Konstrukce CASTORu 1000/19 a vnitřní koš	34
3.1	Rozložení teploty při vedení tepla	40
3.2	Vedení tepla válcovou stěnou	44
3.3	Vedení tepla složenou válcovou stěnou	46
3.4	Schéma výpočtového modelu	47
4.1	Vstupní teploty	55
4.2	Konstrukce koše, základní buňka a distanční část	56
4.3	Rozdělená sestava těl částí kontejneru, hélia a vzduchu	57
4.4	Složená sestava	58
4.5	Úpravy nevhodných geometrických tvarů modelu	59
4.6	Detail sítě na okraji koše	60
4.7	Sít koše	61
4.8	Sít hélia	61
4.9	Sít tělesa kontejneru	62
4.10	Sít okolního vzduchu	62

4.11	Diskretizovaný model pro potřeby strukturální analýzy	63
4.12	Příklad tvorby specifických materiálů	64
4.13	Zadání teplotního zatížení modelu	65
4.14	Kontaktní plochy jednotlivých komponent	66
4.15	Rozložení teploty po celém kontejneru v řezu kontejnerem	68
4.16	Teplotní pole koše a tělesa kontejneru	69
4.17	Teplotní pole na koši	70
4.18	Deformace koše s nedeformovaným tělesem kontejneru	71
4.19	Minimální mezera mezi košem a tělesem	72
4.20	Zvýrazněné deformace vůči nedeformovanému koši (M 10:1)	73
4.21	Zvýrazněné deformace koše (M 50:1)	73
4.22	Deformace ve směru osy Z	74
4.23	Nucená deformace koše pro hypotetický případ	75
4.24	Hypotetické rozložení napětí v konstrukci koše při zamezení posuvu	76

Obsah

1 Úvod	1
2 Palivový cyklus	2
2.1 Přední část palivového cyklu	2
2.1.1 Těžba rud	3
2.1.2 Zpracovávání uranových rud	4
2.1.3 Výroba kovového uranu a jaderného keramického paliva	5
2.1.4 Obohacování uranu	7
2.1.5 Výroba palivových článků s palivem na bázi oxidické keramiky	10
2.2 Činná část palivového cyklu	11
2.2.1 Energetické využití jaderného paliva a štěpná reakce	11
2.2.2 Palivové kazety	16
2.3 Zadní část palivového cyklu	27
2.3.1 Dochlazování palivových souborů v bazénech vyhořelého paliva	28
2.3.2 Dočasné skladování v meziskladu vyhořelého jaderného paliva	29
2.3.3 Skladování v trvalých úložištích vyhořelého jaderného paliva .	35
2.3.4 Přepřacování jaderných odpadů na energeticky využitelné formy	37
3 Teorie přenosu tepla vedením a další potřebné vztahy	39
3.1 Základní vztahy	39
3.2 Řešené typy úloh vedení tepla	42
3.3 Vedení tepla u válce s tepelnými zdroji	43
3.4 Vedení tepla v izolovaném válci	44
3.5 Aplikace na vlastní výpočet kontejneru	46
3.6 Zbytkový výkon palivových kazet	48
3.7 Teplotní roztažnost materiálů	49
4 Praktická část práce	51
4.1 Stručný popis problému	51
4.2 Materiály	52
4.3 Metodika výpočtu, použité programy	52

4.3.1	Charakteristika programu NX Thermal	53
4.3.2	Charakteristika programu NX NASTRAN	53
4.4	Vlastní výpočet	54
4.4.1	Vstupní parametry výpočtu	54
4.4.2	Model kontejneru	56
4.4.3	Úprava modelu na vhodný tvar výpočtového modelu	58
4.4.4	Popis výpočtového modelu	59
4.4.5	Výpočet – termální analýza	64
4.4.6	Výpočet – strukturální analýza	66
4.5	Výsledky	67
4.5.1	Výsledky termální analýzy	68
4.5.2	Výsledky strukturální analýzy	71
4.6	Hodnocení a diskuse výsledků	76
5	Závěr	79
	Závěr	79
6	Seznam použité literatury	81
7	Seznam příloh	84

1 Úvod

Tato práce se zabývá odvodem tepla z vyhořelého jaderného paliva a jeho dopady na konstrukci obalových souborů. V práci je pojednáno o palivovém cyklu ve všech jeho fázích – od těžby uranové rudy až po trvalé uložení použitého paliva. Krátce je pojednáno také o možnostech přepracování paliva pro další energetické využívání.

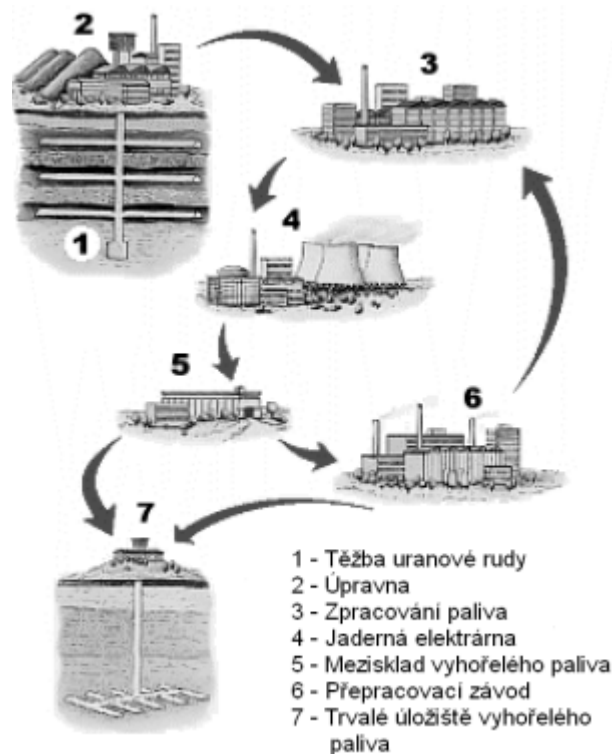
V první části je řešena problematika zpracování uranu do podoby vhodné pro energetické využití, jeho využívání v jaderných reaktorech, s nímž souvisí popis konstrukce palivových souborů. Zde je cíleno na tlakovodní reaktory používané v České republice. Na činnou část navazuje problematika skladování použitého jaderného paliva a konstrukce obalových souborů.

Ve druhé části jsou zavedeny potřebné teoretické základy pro provedení výpočet odvodu tepla a teplotních dilatací materiálů. Tento výpočet je zevrubně popsán ve třetí části práce. Praktická část práce je zaměřena na teplotní dilatace koše obalového souboru pro dočasné skladování vyhořelého jaderného paliva v meziskladech. Je stanovena metodika výpočtu za použití metody konečných prvků (MKP), provedeno její ozkoušení za daných podmínek a zpracovány výsledky analýz. V zadání diplomové práce je zavedeno několik zjednodušení oproti reálnému stavu, jehož přesná simulace by však překračovala rámec diplomové práce. Zjednodušení se týkají fyzikálních vlastností materiálů, které jsou považovány za konstantní, přenos tepla je uvažován pouze vedením bez konvekce a radiace. Na konkrétnosti práce se podepsalo omezení participace původního zadavatele diplomové práce z důvodu omezení přístupu k interním materiálům.

V poslední části práce jsou shrnuty a diskutovány výsledky simulací a v kapitole 5 je provedeno shrnutí celé diplomové práce. Zdroje informací jsou uvedeny v kapitole 6. Elektronickou přílohou jsou originální snímky výsledků simulací, které jsou ve stati práce uvedené v komprimované formě. Vloženou přílohou je výkres výpočtového modelu a konstrukčního provedení.

2 Palivový cyklus

Pod pojmem palivový cyklus rozumíme souhrn veškerých činností, jež jsou prováděny s jaderným palivem v jeho jakékoliv formě, ať se jedná o uranovou rudu, nebo použité tablety UO₂. Palivový cyklus počíná těžbou uranové rudy, pokračuje zpracováním, výrobou paliva, nakládáním s palivem a jeho využíváním v reaktorech jaderných bloků. Vyhořelé (použité) palivo se přechodně ukládá ve skladovacích bazénech elektráren a poté se přesouvá do dočasných nebo trvalých úložišť, případně na přepracování na MOX paliva. Celý tento proces – palivový cyklus – je sledován a plánován.



Obr. 2.1: Schéma palivového cyklu [4]

2.1 Přední část palivového cyklu

Přední část palivového cyklu zahrnuje činnosti spojené s těžbou materiálu potřebného pro výrobu jaderného paliva přes jeho mechanické, chemické a fyzikální zpra-

cování až po výrobu samotného paliva do podoby použitelné pro energetické využití. [3]

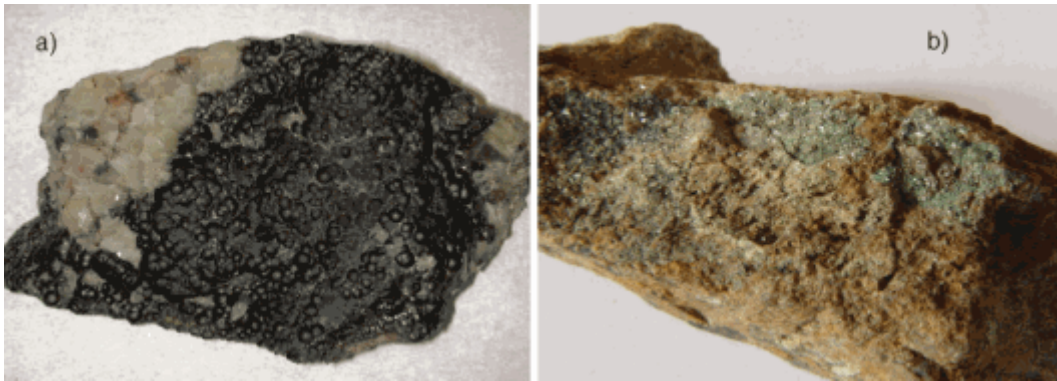
2.1.1 Těžba rud

Uran je v přírodě poměrně hojně zastoupen v několika různých formách. Střední obsah uranu v zemské kůře (tzv. hmotnostní clark) je odhadován v rozmezí 0,0002 – 0,0004 % hmotnosti zemské kůry, tzn. asi 10^{15} t uranu v zemské kůře. V dalších vrstvách, potažmo v zemském jádru, se přítomnost uranu nepředpokládá. Poměrně velké zastoupení má uran i v mořských a oceánských vodách, kde se koncentrace pohybuje okolo 3 – 3,5 mg/m³, tzn. asi 4 – 4,5 · 10⁹ tun uranu. Ač se jedná o značné množství, není známo, že by existoval závod, který by se zabýval ekonomicky přijatelným získáváním uranu z mořské vody. [5] Rudy jsou klasifikovány podle několika hledisek [5]:

- Charakter uranové mineralizace
- Kontrastnost rudy
- Obsah uranu v rudě
- Obsah dalších komponent v rudě
- Mineralogické a chemické složení rudy

Tyto vlastnosti uranové rudy jsou zohledňovány při výběru vhodného ložiska tak, aby jeho využití bylo z technologického, environmentálního a vyplývajícího ekonomického hlediska co nejméně náročné.

Uran se vyskytuje ve svých oxidických podobách v minerálech spolu s dalšími prvky. V Československu bývala nejvýznamnější těžba uraninitu (obecně známý pod starším českým názvem smolinec, resp. anglickým pitchblend – UO_2). Druhou nejvýznamnější uranovou rudou je zeunerit $(Cu(UO_2)_2(AsO_4)_2)$, minerál obsahující mimo uranu ještě arsen a měď.



Obr. 2.2: a) smolinec b) zeunerit [17]

2.1.2 Zpracovávání uranových rud

Zpracování uranových rud na chemický koncentrát (tzv. žlutý koláč) je v podstatě souhrnem procesů mechanického a chemického charakteru. Výběr možných technologických variant zpracování závisí na klasifikacích materiálu, jež jsou popsány v části 2.1.1. Výběr však ovlivňuje také ekonomická náročnost použití potřebných přídatných materiálů a činidel, stejně tak nelze opomenout tradiční přístupy jednotlivých zpracovatelských závodů v různých zemích.

Prvním procesem, kterým vytěžená ruda (části o rozměrech do 200 mm) prochází je desintegrace, čili rozpojení rudy na části, které jsou vhodné pro potřeby loužení. Loužení je separace složky z pevné matrice působením kapaliny, v níž je složka rozpustná. Tímto způsobem se například získávají složky drahých kovů z rud nebo extrahují kontaminanty z půd [19]. V praxi je toto rozpojování realizováno mechanicky, tedy mletím a drcením, na rozměr od 0,07 – 0,30 mm v závislosti na technologii loužení, jež má být použita. Technologicky spjaté s mletím a drcením je třídění. Následují operace zahušťování, kdy se z větší části vzájemně oddělují kapalné fáze od pevných. Pro potřeby vyššího stupně separace fází se používá filtrace nebo odstředování.

Loužením získáváme uranový materiál, jehož čistota, koncentrace a obohacení však není pro výrobu palivových elementů (tablet, kuliček, ...) uspokojivá. Tato

fáze se nazývá „yellow cake“, tedy „žlutý koláč“. Pro další zpracování je zapotřebí dosáhnout vyššího stupně čistoty tohoto polotovaru - tzn. nukleární čistoty. Tohoto stupně se dosahuje především pomocí rafinace na bázi kapalinové extrakce s tributylfosfátem (*TBP*) nebo méně častou rafinací pomocí srážecích postupů. Pro přípravu paliva do lehkvodních reaktorů, do níž je nutné zařadit i obohacování na vyšší obsahy ^{235}U , je nutné získávat ze žlutého koláče fluoridy UF_6 a UF_4 . To se děje technologickými postupy zpracování žlutého koláče, jež zahrnují procesy kalcinace, redukce, hydrofluorace, fluorace a frakční destilace, případně EXCER-procesy s rekonverzí kyselin z loužení. O těchto technologických postupech je velmi podrobně pojednáno v publikaci [5].



Obrázek 2.3: Žlutý koláč

2.1.3 Výroba kovového uranu a jaderného keramického paliva

Výroba samotných palivových elementů je podmíněna především typem reaktoru, na němž bude palivo používáno. Jednotlivé požadavky však lze shrnout do obecného rámce, který stanovuje především tyto vlastnosti jaderného paliva: splnění fyzikálních parametrů aktivní zóny daného reaktoru, bezpečný a spolehlivý provoz, ekonomická přijatelnost provozu. Od vývoje materiálů paliva samotného nelze odloučit vývoj materiálů povlakovaných trubek, které významně přispívají k fyzikálním a termálním charakteristikám aktivní zóny. Tato kapitola se však věnuje pouze materiálu paliva z hlediska palivového cyklu.

Nejdůležitějším parametrem pro výrobu paliva je zařízení, ve kterém bude z paliva získávána energie. Od použitého reaktoru (avšak i typu štěpné reakce) se odvíjí veš-

keré parametry, od štěpného materiálu až po tvar palivového elementu. V tabulce 2.1 jsou zmíněny hlavní typy jaderných reaktorů a jim odpovídající materiály a tvary palivových elementů.

Složení	Geometrický tvar	Typ reaktoru
Kovový uran Slitiny $U + Mo$ Slitiny $U + Zr + Nb$ Disperze U v oceli Cermety $U + UO_2$ Cermety $U + UC$	Proutky, tyče, desky	Těžkovodní (HWR) Rychlý množivý (FBR) Lehkovodní (LWR)
UO_2 (přírodní uran)	Tablety	HWR
UO_2 (ochuzený uran)	Tablety, kuličky	FBR
UO_2 (3-4% ^{235}U)	Tablety	LWR
UO_2 (20-30% ^{235}U)	Tablety, kuličky	FBR, materiálový reaktor
$UO_2 + 1-4\% PuO_2$	Tablety, kuličky	HWR, LWR
$UO_2 + 20-30\% PuO_2$	Tablety, kuličky	FBR
$UC + PuC, UN + PuN$	Tablety, kuličky	FBR
$ThO_2 + 10-15\% UO_2$ ($^{233}U, ^{235}U$)	Povlékané kuličky	HTGR
$ThO_2 +, UO_2$ (93% ^{235}U)	Povlékané kuličky	HTGR
$ThO_2 +, UC_2$ (93% ^{235}U)	Povlékané kuličky	HTGR
71,7% $LiF + 16\% BeF_2$ +12% ThF_4 + 0,3% $^{233}UF_4$	Rozpuštěné palivo	MSBR

Tabulka 2.1: Základní typy jaderných paliv [5]

Zkratka HTGR znamená Heavy Temperature Gas-cooled Reactor – vysokoteplotní reaktor chlazené plynem, momentálně vyvíjené v Číně na základě německých projektů Pebble Bed Reactor v JAR. MSBR je Molten Salt Breeder Reactor – reaktor s tekutými solemi.

2.1.3.1 Technologie výroby palivových elementů

Pomiňme výrobu kovového uranu a zmiňme výrobu palivových tablet UO_2 , jež se týká tlakovodních reaktorů. Jedná se o koncovou operaci výroby jaderného paliva. Tyto tablety jsou připraveny ke vložení do povlakovaných palivových prutů (po jejich obohacení, viz podkapitola 2.1.4). Rozdíly v geometrii částečně vyplývají z údajů v tabulce 2.1. Na počátku výroby máme práškový UO_2 nukleární čistoty, který zhutňujeme lisováním za studena. Poté se produkt sintruje (spéká) ve vodíkové atmosféře. Práškový oxid uranický se mele v kulových nebo tyčových mlýnech po dobu několika hodin. Po mletí na vysokou jemnost se přidávají pojiva (polyvinylalkohol, polyetylénglykol) a mazadla (parafin, kyselina stearová) ve formě prášku nebo roztoku. V misičích probíhá sítování – jemná frakce se vrací zpět do granulátoru, hrubší frakce (cca nad 0,01mm) pokračuje na lisování. Zde se po dobu 3 - 4 sekund zhutňuje při tlaku 100 – 400 MPa do požadovaného tvaru tablety.

Před slinováním se odstraňují organické látky obsažené v mazadlech a pojivech za pomoci žíhání při teplotě 800 - 900°C v atmosféře CO_2 . Takto upravené tablety se dávají do sintrovací pece, kde při teplotě 1500 - 1700°C dochází po dobu několika hodin ke slinování. Poslední operací je broušení tablet, kdy se upravuje jejich rozměr na požadovanou hodnotu. Průměr tablety je daný světlostí povlakované trubky, kdy mezera mezi tabletou a stěnou trubky by měla činit cca 0,12 – 0,25 mm. [5]

2.1.4 Obohacování uranu

Na výzkum a vývoj obohacovacích procesů byly v minulosti vynakládány značné finanční prostředky. Toto, bohužel, nebylo motivováno snahou o mírové využití jaderné energie, ale právě naopak – vysoké stupně obohacení paliva jsou nutné pro využití v jaderných zbraních. Trendem, kterým se jaderná energetika měla od 50. let 20. století ubírat, bylo využívání přírodního uranu v těžkovodních reaktorech (Gas Cooled Reactor). První československá jaderná elektrárna A1 v Jaslovských Bohunicích byla právě tohoto typu. Zkušenosti s provozem tlakovodních reaktorů vojenských plavidlech, jejich spolehlivost a zejména bezpečnost vyplývající z teplotních zpětných vazeb a samoregulace lehkovodních reaktorů nakonec nasměrovala vývoj

jaderné energetiky právě k těmto typům. Tím nastala potřeba obohacování paliv také pro civilní využití uranu. Tato potřeba se odrazila ve výstavbě obohacovacích závodů zejména v SSSR a USA, ale také v Holandsku, Anglii či SRN a Japonsku. Obecně lze říci, že obohacovací proces je investičně a provozně značně náročný (zejména spotřeba energie je vysoká) a jeho realizaci si mohou dovolit pouze státy na odpovídající hospodářské úrovni. [5]

Jedná se o separační proces, kdy se štěpně využitelné izotopy uranu (případně transuranů) oddělují od izotopů nevyužitelných. Využívá se k tomu malých, přesto důležitých, rozdílů mezi izotopy, zejména v jejich jaderných, fyzikálních a chemických vlastnostech. Tyto rozdíly se nazývají *izotopové jevy* a týkají se nejen částic atomárních úrovní, avšak také jejich shluků, molekul a mikrokryсталických útvarů. Podle obecné představy jsou tyto jevy důsledkem různých hmotností izotopů a jejich energie okolo nulového bodu (Energie nulového bodu je vnitřní energie molekuly, která je v molekule přítomna vždy, i za limitní teploty 0 K [10]). Využívají se rozdílné molekulární (atomární,..) hmotnosti a z nich plynoucí fyzikální izotopové jevy, které charakterizují chování izotopových složek např. v tíhovém poli, při difuzi porézní přepážkou a kapilárou. Zejména chování v tíhovém poli se ve velkých provozech využívá k separaci izotopů uranu a výrobě deuteria (resp. jeho separaci z H_2O) na odstředivkách. Tato metoda je průmyslově nejpoužívanější, nicméně existují i další metody obohacování uranu:

- Centrifugace
- Difuze
- Elektromagnetická separace
- Laserová separace
- Chemická separace

Všechny tyto metody využívají zmíněných izotopových jevů. Metoda centrifugace vyžaduje přeměnu uranu (v podobě UO_2 , kovového uranu,..) na plynný UF_6 . Při odstředování na centrifugách se při vysokých otáčkách plyn dělí na izotopy ^{238}U ,

^{235}U a malé množství dalších částí, kdy těžší ^{238}U se hromadí na okrajích centrifug, zatímco molekuly s obsahem ^{235}U se hromadí ve středu. Tento systém se vyvíjel společně s materiály použitelnými na lopatky rotaček. V 70. letech se na lopatky používala ocel, kdy zařízení pracovala na hranici rychlosti zvuku (330 m/s), při použití uhlíkových vláken rychlost dosahovala již 600 m/s, v současnosti se využitím kevlaru dosahuje obvodové rychlosti až 1100 m/s. Pro zvýšení obohacení je nutné použít odstředivkové kaskády a více stupňů centrifug. Centrifug je v závodě řádově několik desítek tisíc kusů. [5]

Difúzní metoda také pracuje s hexafluoridem UF_6 , který se protlačuje keramičnými porézními přepážkami. Molekuly s izotopem ^{235}U jsou lehčí a pohyblivější než ^{238}U , takže přepážkami procházejí rychleji. Pro výsledný efekt je však nutné proces opakovat přibližně 1000x a za vysokých teplot a tlaků, což činí metodu velmi energeticky náročnou.

Další metody jsou používány spíše laboratorně kvůli jejich nízkým účinnostem v porovnání s difusí a centrifugací. Elektromagnetická separace pracuje na principu zakřívání drah letících nabitých elementů (izotopů). Toto zakřivení je opět dáno jejich rozdílnou hmotností. Laserová separace požaduje velmi citlivě naladěný laser, který dokáže excitovat pouze plynné atomy jednoho izotopu uranu, zatímco ostatní zůstávají v základním stavu. Ionizované atomy pak lze oddělovat zmíněnou elektromagnetickou separací nebo chemickou látkou. [14]

Původním důvodem pro používání reaktorů na přírodní uran byla právě absence obohacování paliva, která, jak bylo zmíněno, je energeticky a investičně náročná. Jednoduchou úvahou můžeme tuto náročnost demonstrovat v provozu elektrárny s tlakovodním reaktorem o výkonu 1300 MWe. Uvádí se, že při odstředivém obohacování uranu je zapotřebí asi 50-60 kWh na jednu SWU (Separative Work Unit – práce potřebná na separaci – kolik materiálu bylo zpracováno a na jaké obohacení). Zmíněný velký reaktor potřebuje na jeden rok palivo (obohacení na 3,75 % ^{235}U), na jehož obohacení bylo zapotřebí 120 kSWU. Energetická potřeba na výrobu tohoto objemu paliva je tedy asi $55 \cdot 120\,000 = 6\,600\,000 \text{ kWh} = 6\,600 \text{ MWh}$. Celková roční produkce elektrárny při zanedbání odstávek je $1300 \cdot 365 \cdot 24 = 11\,388\,000 \text{ MWh}$.

To znamená, že z energetického hlediska na obohacení paliva stačí 0,058 % výkonu bloku. Nezapomínejme také, že u těžkovodních reaktorů s přírodním, neobohacným palivem je nutné používat právě těžkou vodu, jež je získávána obdobně jako obohacený uran, tedy separací izotopů. [13]

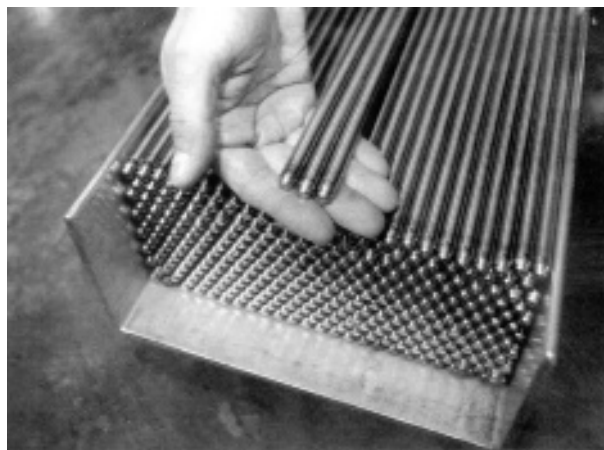
2.1.5 Výroba palivových článků s palivem na bázi oxidické keramiky

Výroba palivových článků, resp. palivových tyčí, je konečnou fází přípravy paliva pro jaderné reaktory. Technologie výroby se liší podle typu reaktoru a jeho projektu, který počítá s daným typem paliva. Tato podkapitola se věnuje pouze výrobě článků, které jsou plněny tabletami oxidického uranového paliva. Další typy, např. vybavení pro metalická paliva, paliva pro HTGR, apod. nejsou zmiňovány. Palivo ve formě tablet je jednoznačně nejrozšířenější a používané jak lehkovodními reaktory (tlakovodními i varnými), tak i těžkovodními reaktory.

Pro povlakované trubky palivových článků reaktorů VVER (ale i dalších – RBMK, BWR, ...) se používají materiály ze zirkoniových slitin (komerční označení Zircaloy) legované niobem a dalšími prvky. Použity musí být materiály s malým účinným průřezem pro zachyt neutronů Σ_a , čímž se v důsledku snižuje obohacovací práce a především se minimalizuje účinek konstrukčních materiálů na fyziku aktivní zóny. Jejich omezená tepelná odolnost je vzhledem k teplotám nepřekračujícím 350°C, dostatečná. Před použitím se provádí povrchové úpravy mechanické, chemické a elektrochemické, jmenujme broušení, moření a elektrolytické leštění.

Plnění povlakovaných trubek palivovými tabletami je většinou realizováno zařízeními, která umožňují provádět více operací nutných pro splnění požadavků na palivový soubor při zaručení kvality, jíž je věnována mimořádná pozornost. Zařízení například zvládají vakuování trubek, plnění tabletami, plnění heliem a uzavírání palivového článku. Plnění tabletami obvykle probíhá v inertní atmosféře kvůli omezení přístupu vlhkosti k samotnému palivu. Z tohoto důvodu se také otevřené palivové tyče ve vakuu suší za zvýšené teploty. Uzavírání se provádí svařováním důkladně prověřenými a schválenými svařovacími postupy. Technologie se liší dle výrobců – používá se např. WIG technologie, magnetické impulsní svařování nebo

svařování proudem elektronů. Samozřejmostí je kontrola svarů rentgenem nebo ultrazvukem. Komplexní kontrolou a kompletací palivové kazety se proces uzavírá. Rozměry a konstrukce palivových kazet používaných na VVER reaktorech v České republice je podrobněji popsána v sekci 2.2.2.



Obrázek 2.4: Palivové pruty pro lehkovodní reaktor

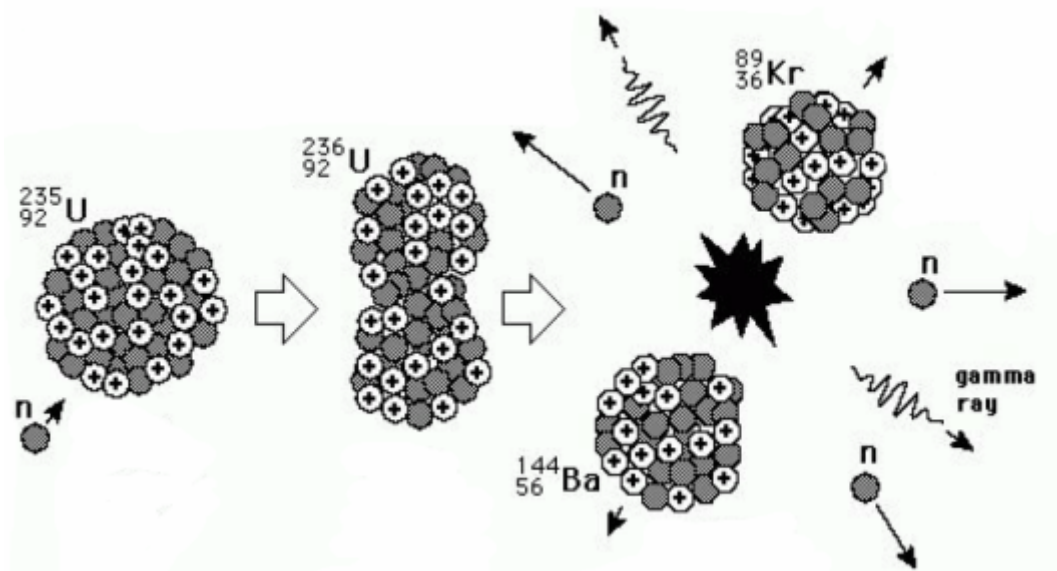
2.2 Činná část palivového cyklu

Tato kapitola se zabývá energetickým používáním jaderného paliva a především technologickými a konstrukčními řešeními souvisejících komponent. Činná část palivového cyklu je s dosavadními technickými a ekonomickými možnostmi hlavní částí života jaderného paliva, která navazuje na přípravnou přední část palivového cyklu. Zadní část palivového cyklu pojednává spíše o možnostech skladování a případného přepracování paliva. Z energetického (ale i z hlediska ekonomického) je činná část palivového cyklu jedinou ziskovou ze tří jmenovaných. Řešené jsou především součásti související s provozem reaktorů VVER na území České republiky.

2.2.1 Energetické využití jaderného paliva a štěpná reakce

Pro ucelený pohled na palivový cyklus nelze nezmínit alespoň základy štěpné reakce a její využívání při produkci tepla v jaderných reaktorech. Štěpná jaderná reakce je rozpad jádra nestabilního atomu (v případě aktivní zóny VVER jádra izotopu ^{235}U) vlivem vniknutí cizí částice (obvykle neutronu). Rozpadnuvší se

atom se rozdělí na dvě jádra (odštěpky), jejichž vysoká rychlost získaná z energie jaderné reakce je okolními atomy snižována (odštěpky se brzdí o okolní prostředí) a přeměňována na teplo. Při rozpadu původního jádra jsou uvolňovány 2-3 (přesně 2,4 neutronu – statistický děj) nové neutrony, které jsou při příznivém multiplikačním koeficientu soustavy schopné udržovat štěpnou reakci, tedy ji činit řetězovou reakcí. Štěpnou reakci vysvětluje obrázek 2.5: Neutron je zachycen ^{235}U , čímž se změní hmotnostní číslo A atomu uranu na ^{236}U (tedy izotop uranu ^{236}U), který je nestabilní a rozpadá se na ^{89}Kr a ^{144}Ba .¹ Při tomto rozpadu vznikají 2-3 neutrony, γ záření a vydá energii asi 184 MeV (bez energie uvolněných neutrin, která jsou nezachytitelná a jejich energie tedy nevyužitelná).² [7]



Obrázek 2.5: Štěpná jaderná reakce

Pro udržení tepelného výkonu a provozování jaderného reaktoru na ustáleném nominálním výkonu N_{nom} je klíčové udržení štěpné reakce, tedy vznik generací neutronů, jež produkují nové generace neutronů. V podstatě se jedná o udržení produkce takového množství neutronů, z nichž se dostatečná část zachytí ve štěpném mate-

¹Hmotnostní číslo A udává počet nukleonů (protonů a neutronů) v jádře atomu; $A = Z + N$, kde Z je atomové číslo (počet protonů) a N je počet neutronů

²Štěpením jader vzniká přibližně 60 radioaktivních nuklidů. Protože každý z nich je mateřským jádrem dvou až tří nuklidů, tvoří štěpné produkty asi 180 radioaktivních druhů. [8]

riálu a vyvolá štěpení, při němž se vytvoří nový neutron. Pravděpodobnost záchytu se zvyšuje se snižující rychlostí zachycovaných neutronů. Z tohoto důvodu je nutné rychlé neutrony, vzniklé přímou štěpnou reakcí, zpomalovat (moderovat) vhodnými materiály. V případě tlakovodních reaktorů zastává funkci moderátoru běžná H_2O , která plní i funkci chladiva.

Při udržování štěpné reakce spolu soupeří několik procesů, které musejí být kompenzovány intenzitou neutronového toku: radiační záchyt neutronů v palivu, záchyt neutronů v neštěpitelném materiálu konstrukcí, a únik neutronů z aktivní zóny. Pro udržení štěpné reakce je zásadní multiplikační koeficient k_{ef} .

Multiplikační koeficient³ nekonečné soustavy k_∞ [8]:

$$k_\infty = \eta \cdot f \cdot \varepsilon \cdot p \quad (1)$$

kde:

- η regenerační faktor; udává střední počet rychlých neutronů uvolněný při štěpení zachycením jednoho tepelného neutronu ve štěpné látce
- ε koeficient násobení rychlými neutrony; je dán konstrukcí a z ní vyplývající fyzikou aktivní zóny, pro tlakovodní reaktor VVER s obohaceným palivem je hodnota $\varepsilon \approx 1,15$
- f koeficient využití tepelných neutronů; udává poměr počtu tepelných neutronů pohlcených v palivu k celkovému počtu pohlcených tepelných neutronů
- p udává pravděpodobnost, že dojde ke štěpnému záchytu tepelného neutronu v palivu, tedy pravděpodobnost vyhnutí se rezonančnímu pohlcení při zpomalování

Protože reaktor a jeho aktivní zónu nelze kvůli konstrukci považovat za nekonečnou soustavu, udává se efektivní hodnota multiplikačního faktoru k_{ef} , která je

³Pro tlakovodní reaktor VVER jsou hodnoty koeficientů: $\eta \approx 1,65$, $\varepsilon \approx 1,15$, $f \approx 0,71$, $p \approx 0,87$, z čehož vychází $k_\infty \approx 1,04$; $PNL \approx 0,97$ pro rychlé neutrony a $0,99$ pro tepelné neutrony $\Rightarrow k \approx 1,00$ [8]

součinem multiplikačního koeficientu v nekonečné soustavě a pravděpodobnosti, že neutrony neuniknou ze soustavy. Tato hodnota respektuje místně proměnlivou hodnotu k_∞ a především respektuje eventuelní úniky neutronů z aktivní zóny.

Efektivní multiplikační koeficient k_{ef} :

$$k_{ef} = k_\infty \cdot P \quad (2)$$

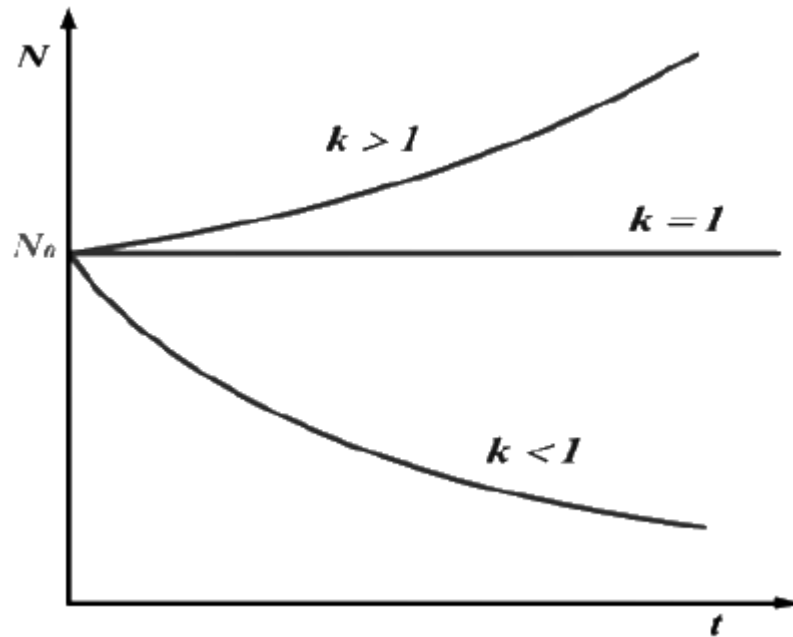
kde:

- k_∞ multiplikační koeficient v nekonečné soustavě
 P pravděpodobnost, že neutrony neuniknou ze soustavy

Z uvedeného koeficientu násobení k (resp. z konkrétního k_{ef} pro daný reaktor) je možné určit tři základní fyzikální stavy reaktoru:⁴

- $k < 1$ podkritický stav, počet neutronů v řetězové reakci klesá, reakce se nemůže sama udržet (při momentálním stavu aktivní zóny)
- $k = 1$ kritický stav, počet neutronů v reakci je ustálený, reakce se udržuje samovolně
- $k > 1$ nadkritický stav reaktoru, počet neutronů v reakci se zvyšuje, výkon reaktoru se zvyšuje

⁴Koeficient násobení $k = \frac{n_i}{n_{i-1}}$, kde n_i je počet neutronů v generaci, n_{i-1} je počet neutronů v generaci předcházející.



Obrázek 2.6: Základní stavy jaderného reaktoru

Reaktor je regulovaná soustava, jejíž neutronový výkon se řídí pomocí zpožděných neutronů, které vznikají sekundárním rozpadem štěpných produktů. Řízení pomocí okamžitých neutronů by kvůli jejich dynamice nebylo možné a dosažení kritičnosti na okamžitých neutronech by znamenalo havárii a nebezpečí nejen pro reaktor a výrobní blok.

Samotná regulace se realizuje pomocí vnášení kladné či záporné reaktivity ρ pomocí regulačních orgánů nebo pomocí změny koncentrace absorbátoru neutronů v chladivu reaktoru. U tlakovodních reaktorů jsou regulačními orgány regulační tyče a absorbátorem v chladivu je kyselina boritá H_3BO_3 . Regulační tyče mají větší dynamiku regulace a používají se při okamžitých požadovaných změnách výkonu reaktoru. Změna koncentrace je pomalejší a užívá se pozvolna v průběhu celé kampaně. Reaktivitu aktivní zóny nejpomaleji ovlivňují vyhořívající absorbátory, které se přidávají do paliva při jeho výrobě. U současných palivových souborů se jako vyhořívající absorbátor používá gadolinium (Gd), které má nejvyšší účinný průřez pro záchyt neutronů Σ_a ze všech známých prvků. Vyhoření absorbujícího gadolinia kompenzuje vyhoření ^{235}U v palivových tabletách.

Akční veličinu regulace nazýváme reaktivita ρ a lze ji odvodit z koeficientu násobení k :

$$\rho = \frac{k - 1}{k} \quad (3)$$

kde:

k koeficient násobení

Pro stavy reaktoru tedy platí:

- $\rho < 1$ vnos záporné reaktivity \Rightarrow směřování ke snížení výkonu
- $\rho = 1$ kritický reaktor, udržování výkonu
- $\rho > 1$ vnos kladné reaktivity \Rightarrow zvyšování výkonu

Je uvedeno, že energie jednoho štěpení je 184 MeV.⁵ Pro výkon 1W je nutné provést $3,39 \cdot 10^{10}$ štěpení za sekundu při energii jednoho štěpení 184 MeV, což dává výsledný výkon štěpení potřebný pro 1W, a to $6,24 \cdot 10^{10}$ MeV/s. Jeden megawatt tepelné energie tedy vyžaduje $3,1 \cdot 10^{19}$ rozštěpených jader každou sekundu. Jeden m^3 obsahuje řádově 10^{28} jader.

2.2.2 Palivové kazety

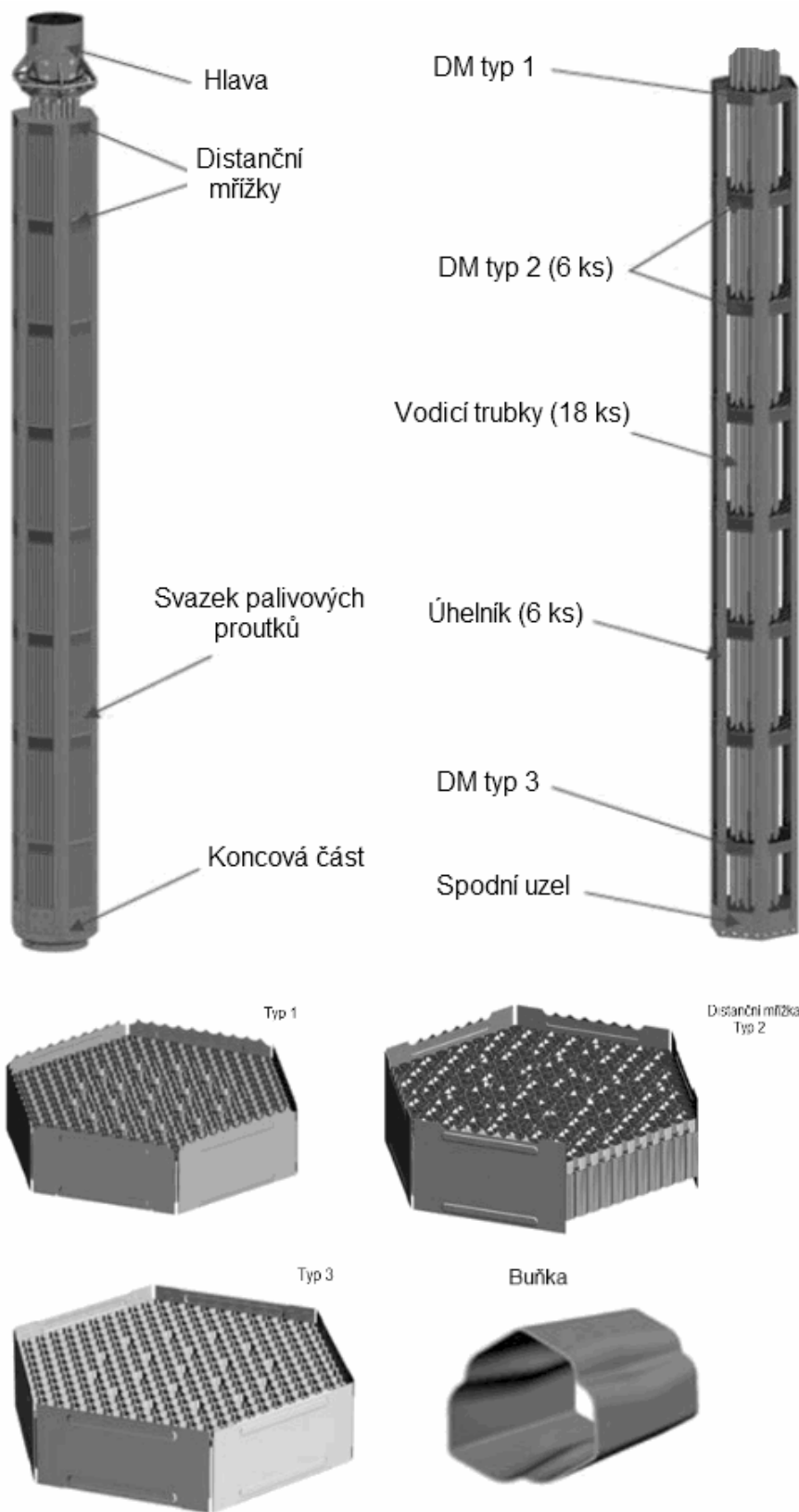
Montáž palivových proutků do kazet usnadňuje manipulaci. Kazety bývají vyrobeny z materiálů s malým účinným průřezem pro zachyt neutronů, tak jako u povlakovaných trubek palivových proutků. Jsou opět používány zirkoniové slitiny a austenitické oceli. Obecně jsou palivové kazety konstrukčně provedeny soustavou různých typů distančních mřížek, vrchní hlavice, koncové dosedací části a svazkem palivových proutků. Distanční mřížky mají za úkol udržovat sestavení palivových proutků v zadaném tvaru za provozních podmínek, kdy teplota se pohybuje okolo 300°C, a při vysokých místních rychlostech průtoku chladiva kazetou, které budí tlakové rázy a vibrace soustavy. Některé typy distančních mřížek jsou opatřeny turbulizujícími elementy, které zviřují proudící medium, čímž se vylepšuje kvalita přestupu tepla z palivových proutků do chladiva. Hlavice jsou opatřeny prvky pro sledování parametrů fyziky aktivní zóny a diagnostickými snímači.

⁵1eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J

2.2.2.1 Palivová kazeta pro VVER1000, JE Temelín – TVSA-T

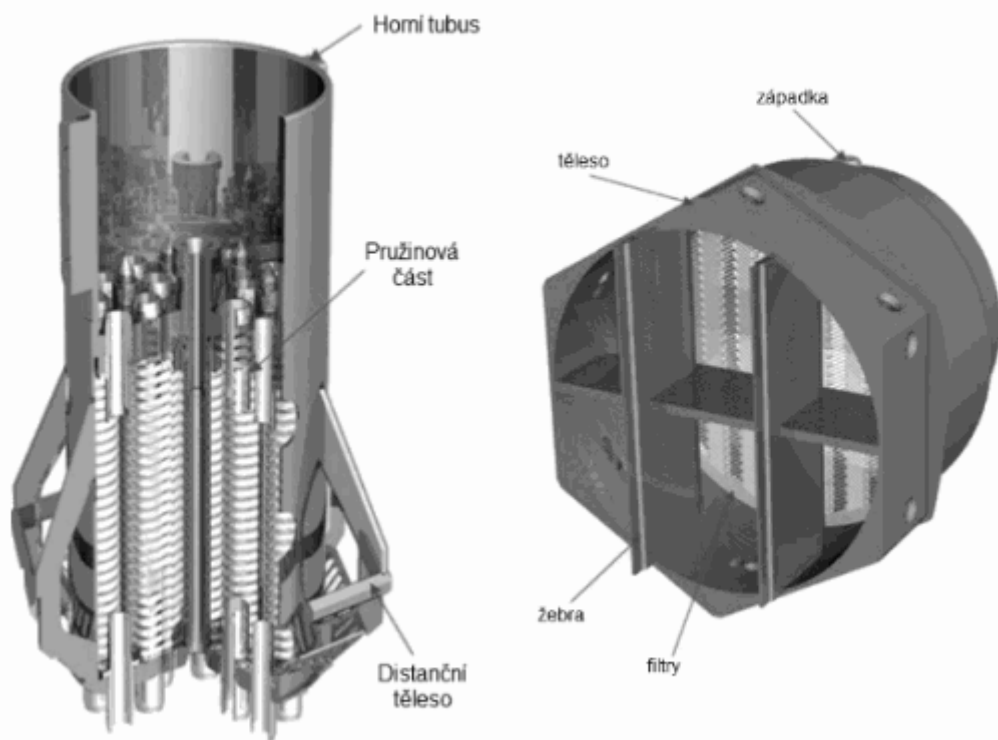
V jaderné elektrárně Temelín se momentálně používají palivové kazety ruské provenience TVSA-T, které nahradily kazety od firmy Westinghouse (WEC), jejichž nepřípustné průhyby působily problémy v provozu elektrárny. Popis konstrukce kazety je možné zobecnit na další typy kazet.

Kazeta TVSA-T je palivový soubor s pevnou kostrou tvořenou šestiúhelníkovými kotvícími prvky. Soubor je charakteristický kombinací dvou typů distančních mřížek, z nichž první – distanční mřížky (*spacer grid*), zprostředkovávají především oporu pro palivové proutky, a druhý typ – turbulizující mřížky (*mixture grid*), zviřují chladivo a přispívají zlepšení termických vlastností kazety. Disponují zvýšenou odolností proti ohýbání za provozních podmínek a operativní rozebíratelností pro kontrolu případných netěsností. Kazeta váže 312 palivových proutků obsahujících 370 palivových pelet UO₂ ve sloupci vysokém 3680 mm (prodloužení o 150 mm oproti původním kazetám používaným na VVER100 typu 320) a 18 vodicích trubek. Materiál pokrytí je Zr1Nb (zirkoniová ocel s přísadou niobu), střední tloušťka pokrytí je 0,69 mm.



Obrázek 2.7: Konstrukce kazety TVSA-T

Hlava palivové kazety disponuje diagnostickými orgány pro kontrolu teploty chladiva. Tyto jsou součástí regulačního systému a přispívají k bezpečnému užívání formou poskytování dat operátorům. Dolní část kazety obsahuje filtr nečistot, který zachycuje částice větší než 2 mm. Tím je zajištěna ochrana proti vniku cizí částice do technologie kazety a případným problémům při demontáži. Dolní část kazety je opatřena tlumicí mřížkou pro odstranění tlakových pulsů vyvolaných proudícím chladivem. Tlumení je zajištěno geometrickými ustalovači proudu v mřížce.



Obrázek 2.8: Hlava a dolní část kazety s filtrem cizích částic

Kazeta je oproti projektu prodloužena o 150 mm v činné části (delší palivové proutky), což umožňuje zvýšit výkon na jednu kazetu. Ten se pohybuje okolo 68MW/kg uranu. Soubor počítá s obohacením paliva na 4,5 % ^{235}U . Vylepšený palivový soubor TVSA-T umožňuje prodloužení palivové kampaně, zvýšení inhe-

rentní bezpečnosti, zvyšuje vyhoření paliva a těmito parametry se příznivě promítá do ekonomičnosti provozu celé elektrárny.

Konstrukční části palivového souboru jsou vyrobeny z multikomponentální zirkoniové slitiny E635, která se vyznačuje vysokou pevností a odolností proti radiačnímu zkřehnutí (stárnutí) stejně jako odolností proti korozi. Tento materiál je široce používán jak na části kazet, tak na povlakované trubky palivových proutků v kombinaci se zirkon-niobovým povlakem. U TVSA-T je použitý také na vodící prstence v hlavících kazet, nosné části kostry kazety a pevné rámové distanční mřížky. Zvýšená pozornost je věnována vodíkové křehkosti a oxidaci těchto vnitřních částí primárního okruhu a je sledována defektoskopickými metodami. Pro ilustraci je uvedena tabulka výsledků zkoumání oxidického pokrytí a obsahu vodíku materiálů E635 a E110 po třech letech práce v aktivní zóně reaktoru VVER-1000 na jaderné elektrárně Balakovo v Ruské federaci.

Materiál	Část	Tloušťka oxidace, μm	Obsah H_2 , % obj.
E635	Pokrytí proutků	40	0,014
	Vodící prstence	25	0,006
	Kostra kazety	22	0,010
	Rámová dist.mřížka	26	0,010
E110	Pokrytí proutků	6	0,007
	Vodící prstence	6	0,005
	Kostra kazety	3	0,004

Tabulka 2.2: Koroze a vodíková křehkost u materiálů uvnitř AZ

Zmíněný materiál E110 je doporučovaný na pokrytí palivových proutků, avšak kvůli svým nižším pevnostním hodnotám se nepoužívá pro namáhané části kazety, jako například distanční mřížky. [11]

Pro úplnost jsou uvedena chemická složení zmíněných materiálů [12]:

E635	<i>Zr</i> 98,46% + <i>Nb</i> 1,00% + <i>O</i> 0,07% + <i>Fe</i> 0,40% + <i>Ni</i> 0,02% + <i>Cr</i> 0,02% + <i>C</i> 0,02% + <i>Hf</i> 0,01%
E100	<i>Zr</i> 98,76% + <i>Nb</i> 1,00% + <i>O</i> 0,10% + <i>Fe</i> 0,07% + <i>Ni</i> 0,02% + <i>Cr</i> 0,02% + <i>C</i> 0,02%

Tabulka 2.3: Složení materiálů TVSA-T

Souhrnné informace k palivovým souborům TVSA-T jsou uvedeny v tabulce 2.4. Základní informace, jako počet souborů v reaktoru, apod., samozřejmě platí také pro typ kazety VVANTAGE-6, který je uveden v podsekcí 2.2.2.2.:

Počet souborů v reaktoru	163
Počet palivových proutků v jedné kazetě	312
Počet palivových pelet v jednom proutku	370
Výška jedné palivové pelety	9-12 mm
Vnitřní/vnější průměr palivové pelety	2,4/7,6 mm
Profil	Šestihran
Výška souboru	4570 mm
Hmotnost souboru	735 kg
Hmotnost paliva	435 kg
Materiály komponent	E635, E100

Tabulka 2.4: Souhrnné informace k TVSA-T

2.2.2.2 Palivová kazeta pro VVER1000, JE Temelín – VVANTAGE-6

Palivový soubor je řešením firmy Westinghouse pro temelínské reaktory. Skelet palivového souboru je tvořen 18 vodícími trubkami, jednou instrumentační trubicí v centrální pozici a čtyřmi druhy distančních mřížek. Nad spodní koncovkou kazety je spodní distanční mřížka vyrobená z materiálu Inconel, po 272 mm následuje distanční mřížka bez turbulizujících elementů vyrobená z materiálu Zircaloy, dále je

směrem k hlavici kazety rozmístěno po roztečích 510 mm šest identických zircaloyových distančních mřížek s míchacími křídélky. Nad šestou zircaloyovou turbulizující mřížkou je ve vzdálenosti 463 mm umístěna inconelová horní distanční mřížka. Celý soubor palivových proutků a mřížek je upevněn k horní odjímatelné koncovce pomocí vodících trubek. Schéma kazety je na obrázku 2.9. Snížení případných vibrací vznikajících vlivem tlakových pulsů je řešeno tangenciálním pootočením míchacích mřížek o 60° vůči sobě.

Narozdíl od palivového souboru TVSA-T obsahuje VVANTAGE-6 primární zdroj neutronů. Ten hraje roli při zavážení čerstvého paliva do reaktoru, kdy udržuje neutronový tok na úrovni citlivosti necejhovaných ionizačních komor v pásnu zdroje. Primární zdroj tak zajišťuje spolehlivý signál neutronového toku pro detekci multiplikačního koeficientu k_{ef} aktivní zóny.

Na JE Temelín vyvstaly problémy s popisovanými palivovými soubory v souvislosti s jejich geometrickými změnami po délce kazety, které byly způsobeny radiačním růstem skeletu palivového souboru. Prohnutí kazet po délce nemá přímý vliv na radiační bezpečnost, avšak byla tím omezena volná dráha pro pády regulačních a havarijních orgánů – regulačních klastrů. Dle Limit a podmínek na ETE musí klastry zcela dosednout do hydraulických tlumičů pádu do 3,5 sekundy od jejich uvolnění. Zjištěno bylo neúplné dosednutí klastrů do hydraulických tlumičů. Po zkouškách nařízených SÚJB v červnu 2006 byl pozorován zhoršující se trend poruchy, kdy dva z regulačních souborů nedosáhly úrovně hydraulického tlumiče. Navrženým nápravným opatřením byla změna konstrukčního materiálu kazet Zircaloy 4 na slitinu *ZIRLOTM*, ze které jsou vyrobeny vodící trubky, instrumentační trubky a pokrytí palivových proutků. Modifikována byla také konstrukce vodících trubek s cílem zvýšení tuhosti celého souboru. [21]

Informace o palivovém souboru VVANTAGE-6 jsou uvedeny v tabulce 2.5.

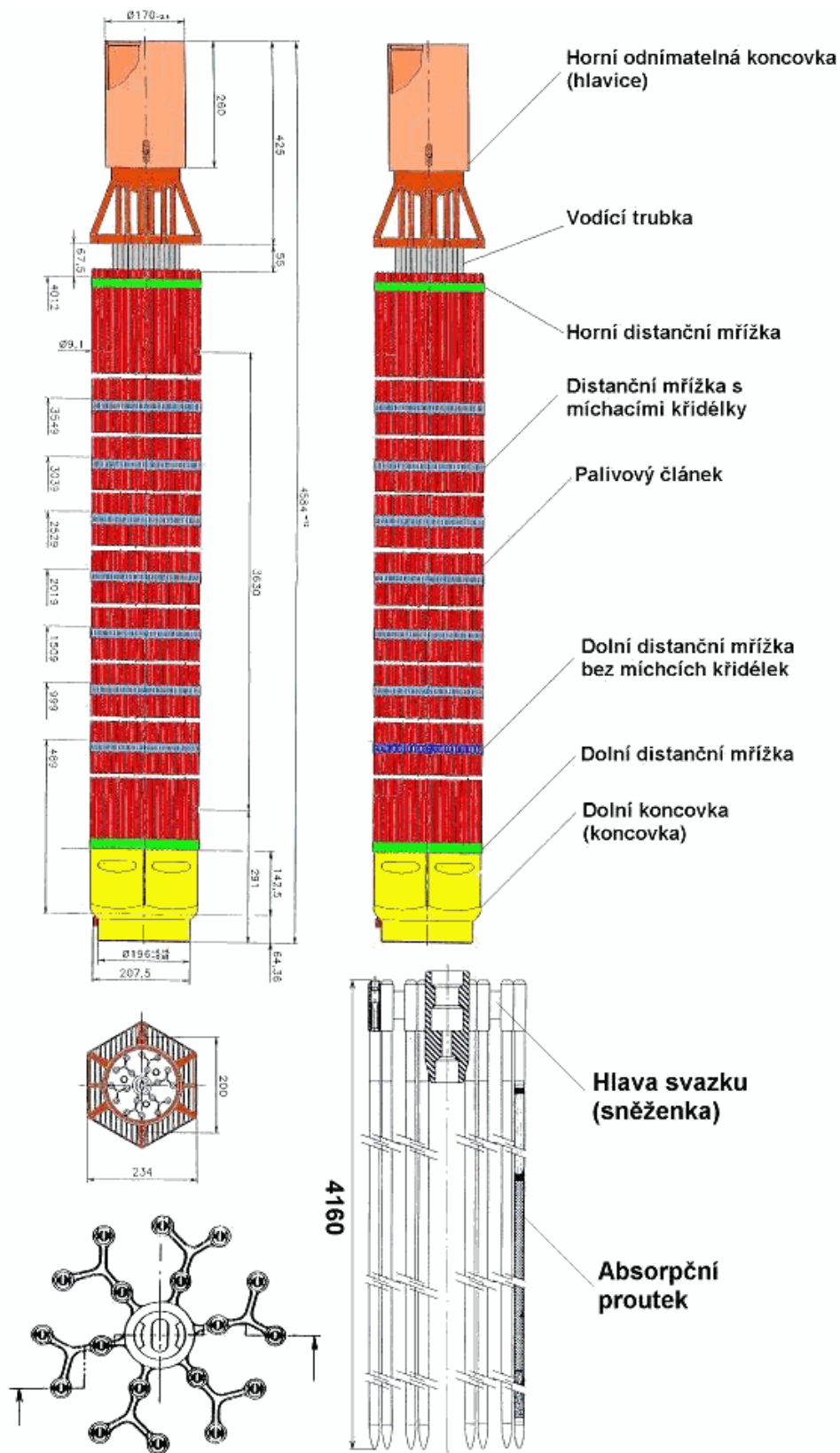
Materiál pokrytí palivových proutků a instrumentačních trubek	Zircaloy-4
Materiál vodících trubek	ZIRLO™
Výška sloupce uranových pelet v proutku	3630 mm
Tloušťka pokrytí proutku	0,69 mm
Vnitřní/vnější průměr palivové pelety	0/7,6 mm
Profil	Šestihran
Výška souboru	4584 mm

Tabulka 2.5: Souhrnné informace o souboru VVANTAGE-6

Chemické složení materiálů použitých v souboru [22]:

Zircaloy-4	Zr 97,56-98,27% + Sn 1,20-1,70% + Fe + Cr 0,28-0,37% + Fe 0,18-0,24%
ZIRLO™	Zr 97,7% + Nb 0,5-2,0% + O 0,10% + Fe 0,07-0,14% + Ni 0,03-0,08% + Cr 0,03-0,08%
AISI 304	Ocel, C < 0,07, Cr 17,0-19,0%, Ni 8,0-10,5%, Mn < 2,0

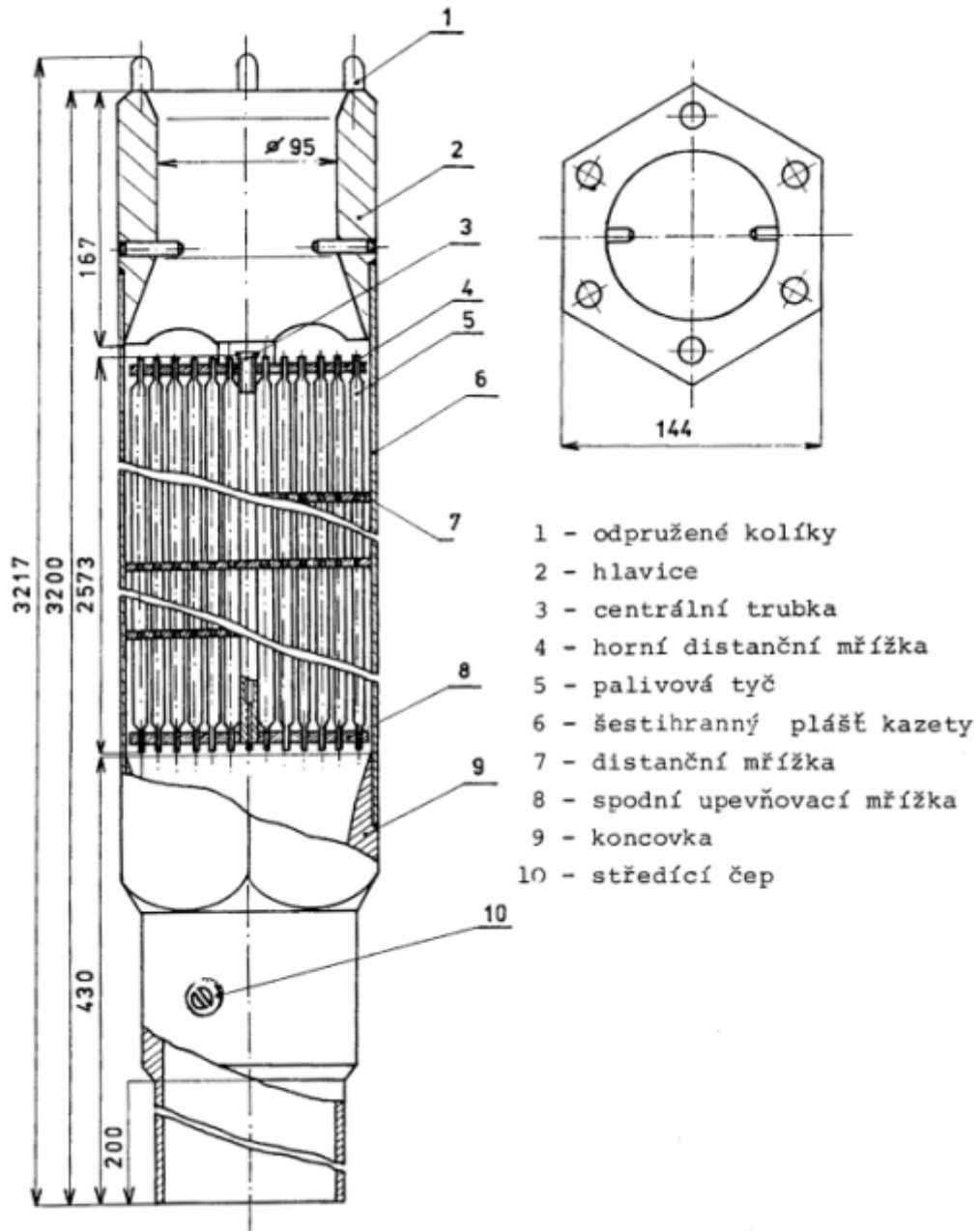
Tabulka 2.6: Materiály souboru VVANTAGE-6



Obrázek 2.9: Konstrukce palivového souboru VVANTAGE-6

2.2.2.3 Palivová kazeta pro VVER 440 (V-213), JE Dukovany

Aktivní zóna reaktoru VVER440 čítá 349 palivových souborů, z čehož je 37 regulačních. Počet palivových proutků v každém souboru je 126. Celková hmotnost UO₂ v aktivní zóně je 42 tun. V jaderné elektrárně Dukovany jsou dnes používány palivové soubory 2. generace, které jsou označovány jako TVS-ARK. Toto palivo je používáno v pětiletém kampaňovém cyklu. [20]

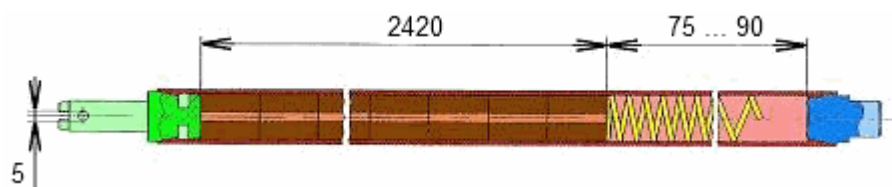


Obrázek 2.10: Konstrukce palivového souboru VVER 440

Konstrukce je podobná jako u TVSA-T. Palivové proutky jsou k centrální tyči upevněny pomocí distančních mřížek na horní a dolní části kazety. Tuhost konstrukce zvyšují také distanční mřížky mezi dvěma zmíněnými, které zároveň fungují jako turbulizátory chladiva. Tyto jsou vyhotoveny z materiálu Zr1%Nb. Zásadním konstrukčním rozdílem oproti TVSA kazetám je šestiboký plášť, který celou kazetu obaluje.⁶

Ve spodní části kazety je opět umístěn filtr cizích částic. [23]

Palivové proutky jsou tvořeny trubkou o vnějším průměru 9,1 mm a tloušťce stěny 0,65 mm. Materiál je zirkoniová slitina Zr1%Nb. Hermetický proutek uzavírá přivařená válcová koncovka, pomocí níž se také proutek ukládá do nosné mřížky kazety. Palivové pelety vysoké 9 - 11 mm jsou ve sloupci vysokém 2536 mm a jsou k sobě přitlačovány pružinou. Pelety mají vnější průměr 7,57 mm a jsou opatřeny ve středu otvorem pro potlačení teplotního extrému v peletě a zároveň pro umožnění tepelné dilatace pelety. Palivový proutek je naplněn heliem o přetlaku okolo 500 kPa pro vylepšení přestupu tepla do chladiva a pro kontrolu hermetičnosti. Na obrázku 2.11 jsou hnědou barvou znázorněny palivové pelety, hermetická koncovka zeleně a hlavice proutku modře.



Obrázek 2.11: Palivový proutek VVER 440

Druhá generace paliva, kterou používá v pětileté kampani JE Dukovany, je charakteristická profilovaným palivem s vyhořívajícími absorbátory z gadolinia. Bylo také zvýšeno obohacení z původních 3,82 % ^{235}U na 4,38 %. Dalším vývojem však bylo obohacení opět částečně sníženo na 4,25 % kvůli lepšímu poměru palivo – mode-

⁶„KARKAZ“ – obálka pro II. generaci paliva byla původně vyvíjena pro palivo VVER 1000 pro zabránění efektu bowingu [23]

rátor, jehož se dosáhlo díky ztenčení pokrytí palivových proutků. Z původního projektového tříletého cyklu, kdy se vyměňovalo 116 kazet ročně, se přes čtyřletý došlo na pětiletý, kdy se mění 72 kazet ročně. Tato časová a ekonomická úspora se samozřejmě promítá do nákladů na výrobu elektřiny. Souhrnné informace o palivové kazetě VVER 440 jsou uvedeny v tabulce 2.7.

Počet souborů v reaktoru	312
Počet palivových proutků v jedné kazetě	126
Počet palivových pelet v jednom proutku	280
Výška jedné palivové pelety	9-11 mm
Vnitřní/vnější průměr palivové pelety	2,4/7,57 mm
Profil	Šestihran
Výška souboru	3217 mm
Tloušťka pokrytí	0,63 mm
Materiály komponent	Zr1%Nb

Tabulka 2.7: Souhrnné informace o palivovém souboru VVER 440

2.3 Zadní část palivového cyklu

Do zadní části palivového cyklu palivový soubor, resp. palivo, vstupuje okamžikem vyjmutí z aktivní zóny jaderného reaktoru, avšak za předpokladu, že se do aktivní zóny nebude vracet. Jinými slovy – poté, co prošlo celou palivovou kampaní, která trvá u jaderné elektrárny Dukovany 5 let a u jaderné elektrárny Temelín 4 roky.

Zadní částí palivového cyklu rozumíme fázi, po kterou palivo v původní podobě již není využíváno k energetickým účelům. V této fázi se tedy řeší problematika skladování paliva a problematika přepracování paliva k dalšímu energetickému využití. Můžeme určit hlavní možnosti nakládání s vyhořelým jaderným palivem:

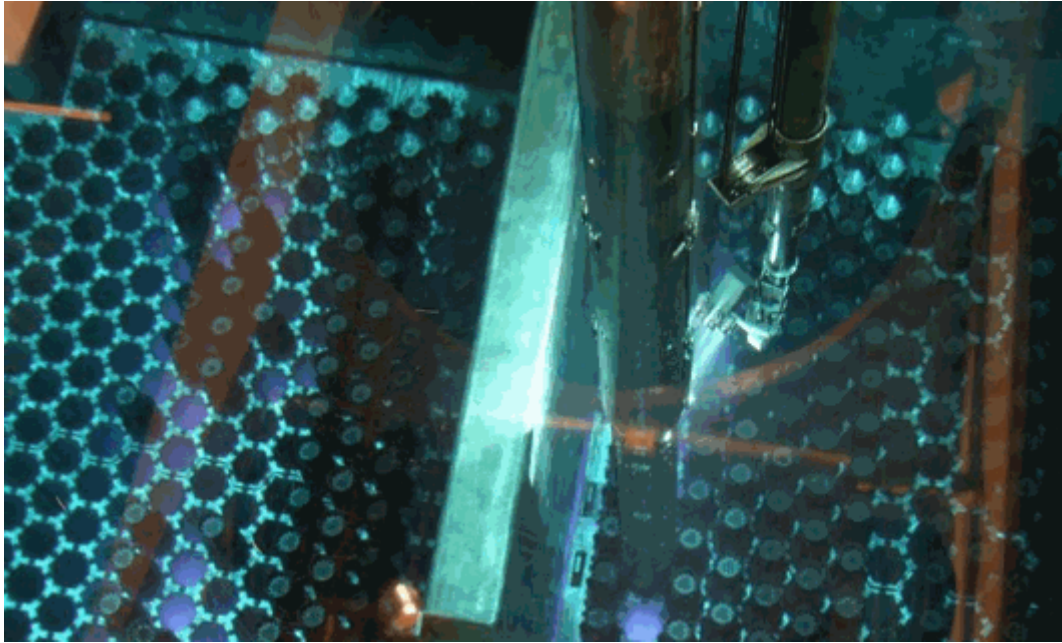
- Dochlazování palivových souborů v bazénech elektrárny
- Suché dočasné skladování souborů v meziskladech VJP

- Mokrý dočasné skladování souborů v bazénech
- Trvalé skladování vyhořelého jaderného paliva v trvalých úložištích
- Přepřacování paliva na MOX paliva a další formy vhodné pro energetické využití

2.3.1 Dochlazování palivových souborů v bazénech vyhořelého paliva

Do bazénů vyhořelého paliva se palivové soubory dostávají bezprostředně po vyjmutí z aktivní zóny. Bazén je umístěn přímo v kontejmentu vedle reaktorové šachty a manipulace s palivovým souborem probíhá z důvodů radiační ochrany pod vodou. V bazénech vyhořelého paliva zůstávají soubory přibližně 10 let, kdy se z nich odvádí zbytkový výkon, který je mařen v okruhu chlazení technické vody důležité. Voda zde působí jako ochrana obsluhujícího personálu před ionizujícím zářením a chladiivo palivových souborů. Kromě zajištění dostatečného odvodu tepla je nejdůležitějším kritériem zajištění podkritičnosti souborů, jehož se dosahuje vhodným geometrickým uspořádáním a přidáváním absorbátoru do chladiiva na nutnou koncentraci. Absorbátorem je H_3BO_3 , tak jako v primárním okruhu.[24]

Mokrý metoda skladování má několik nevýhod. Je energeticky a technicky náročná kvůli nutnosti čerpání vody, kterou je nutné zároveň čistit a chemicky upravovat. Hlavní výhodou je vysoké množství odváděného tepla ze souborů. Snadná je také vizuální kontrola a přístupnost k souborům. Po uplynutí vymírací doby se palivové soubory přesouvají do meziskladů vyhořelého jaderného paliva, které jsou situovány obvykle v areálu elektrárny. Zodpovědnost za nakládání s radioaktivními odpady nese držitel povolení, tedy provozovatel elektrárny.



Obrázek 2.12: Pohled do bazénu vyhořelého jaderného paliva při zavážení

2.3.2 Dočasné skladování v meziskladu vyhořelého jaderného paliva

Při dosažení hodnoty zbytkového výkonu, který umožňuje suché skladování, se palivové soubory mohou přesunout do meziskladu vyhořelého paliva. Tato metoda skladování se označuje jako suchá. Zde jsou palivové kazety uloženy v betonových prefabrikátech, nebo kovových či betonových kontejnerech. Suché skladování je vhodné pro delší periody skladování a je předstupněm ke skladování v trvalém úložišti, nebo k přepracování paliva. [25]

Odvod zbytkového tepla je realizován přirozenou konvekcí a vedením do okolního proudícího media, tedy vzduchu. Hlavní výhodou je pasivní odvod tepla, dále minimální vznik korozních prvků a minimální provozní náklady. Nevýhodou je obtížnější přístup, a tedy kontrola palivových kazet, a jejich vyšší teplota než u mokré metody skladování. Vnitřní teplota palivových souborů se obvykle pohybuje mezi 200 - 300°C. Suché skladování lze rozdělit do podskupin podle použitých obalových technologií na:

- Kontejnerové sklady

- Kobkové sklady
- Betonová sila

Kobkové sklady jsou modulárně uspořádávané zásobníky z betonových prefabrikátů. Tyto zásobníky jsou opatřeny skladovacími dutinami, jež obvykle obsahují jeden palivový soubor, který je uzavřen v kovovém pouzdře naplněném inertním plynem, pomocí něhož je sledována těsnost pouzdra. Chlazení se odehrává buď přirozenou nebo nucenou konvekcí vzduchu. Betonová sila jsou podobné konstrukce jako kobkové sklady, avšak jsou uspořádávány do komplexnějších jednotek po více kobkách.

Vzhledem k zadání diplomové práce je pozornost upřena především na kontejnerové sklady, resp. kontejnery samotné. Skladovací kontejnery byly vyvinuty z transportních kovových kontejnerů. Stínění je zabezpečeno mohutnými kovovými stěnami a případně přídatnými materiály.⁷ Tyto kontejnery jsou plněny kazetami pod vodou, která je po naplnění odčerpána technologickými otvory, jež zároveň slouží pro plnění nádoby heliem a technologická měření. Geometrické uspořádání kazet v kombinaci s použitím bóru v konstrukčních materiálech zajišťuje podkritičnost souboru.

Samotný sklad může být buď v budově nebo na volném prostranství. V budově je chráněn před povětrnostními vlivy, avšak musí být zajištěna výměna chladicího vzduchu. Volné prostranství naopak neposkytuje ochranu před vlivy počasí, avšak netřeba zde zajišťovat chladiivo. Neopominutelným faktorem je jistě také psychologický efekt pro obyvatelstvo, který mohou kontejnery na volném prostranství evokovat. V jaderné elektrárně Temelín byl v roce 2010 vybudován mezisklad, jehož budova je koncipována s ohledem na přirozenou konvekci vzduchu, tudíž je zdařilou kombinací obou zmíněných řešení.

⁷Například CASTOR 440/84 omezuje tok neutronů z palivového souboru soustavou polyetylenových válců naskládaných po obvodu nádoby ve dvou řadách.



Obrázek 2.13: Krytý mezisklad vyhořelého paliva Jaslovské Bohunice

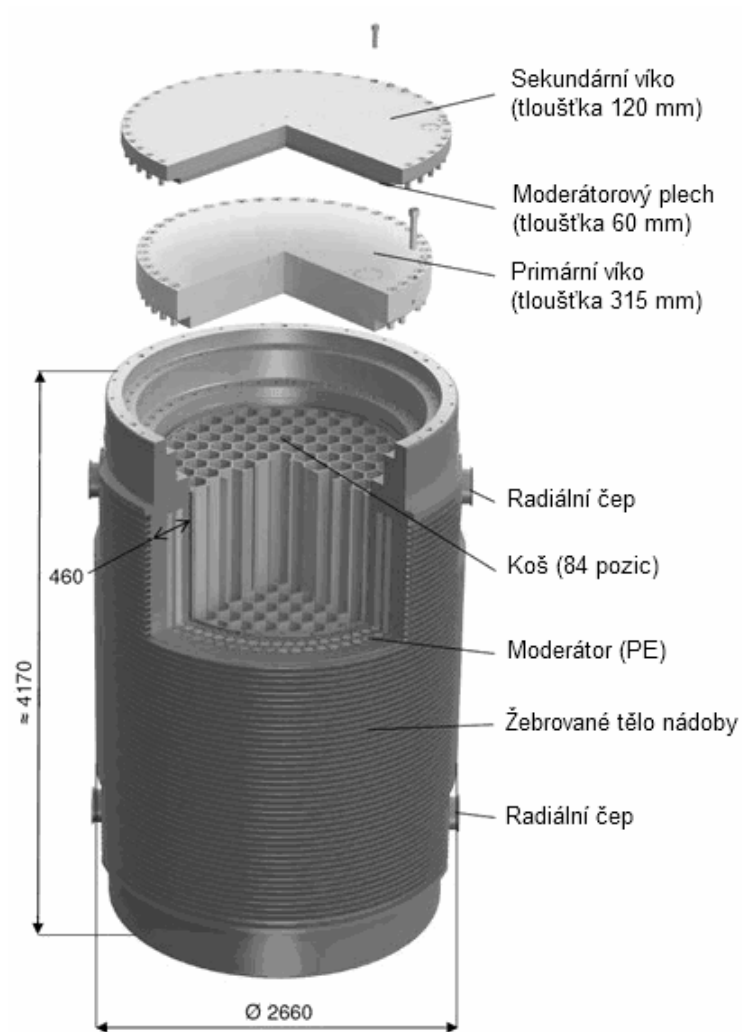
Následující podsekke se zabývají základními typy kontejnerů, jež jsou používány na českých jaderných elektrárnách. Vztahy pro zbytkový výkon kazet a další hodnoty jsou uvedeny v kapitole 3, která se zabývá praktickou částí této práce.

2.3.2.1 Kontejner CASTOR 440/84M pro EDU

Kontejnery typu CASTOR se osvědčily v různých konstrukčních variantách jak pro palivo z reaktorů tlakovodních, tak varných a dalších. Typickým zástupcem je i v České republice používaný CASTOR 440/84M, který je nástupcem původního CASTOR 440/84. Název napovídá, že kontejner je určen pro palivo z reaktorů VVER440 a vejde se do něj 84 palivových souborů. Typ označený M byl vyvinut pro druhou vývojovou generaci paliv pro dukovanské reaktory, která především disponuje vyšším obohacením než palivo, se kterým bylo počítáno v projektu. Z toho vyplývají vyšší nároky na odvod tepla a odolnost proti radiačnímu zatížení.

Konstrukce je řešena nádobou z tvárné litiny s globulárním grafitem GGG 40, která je opatřena na vnější straně žebry pro zlepšení přestupu tepla při konvekcii do okolního chladicího vzduchu. Vertikálně jsou v po obvodu v nádobě provedeny vývrty ve dvou kruhových polích, do nichž se vkládá absorbující materiál (nejčastěji polyetylén). Tyto vývrty jsou provedeny v takovém geometrickém uspořádání, aby z vnitřku nádoby směrem ven nemohla projít přímka, která by jimi neprocházela. Toto opatření má odstínit neutronový tok pohybující se právě po přímých trajektoriích. Celý systém je uzavřen dvěma víky, mezi nimiž je prostor zaplněný inertním plynem o tlaku vyšším, než je tlak uvnitř kontejneru. Tento tlak je monitorován a jeho změna indikuje případnou netěsnost. V primárním víku je také těsněný otvor, který slouží pro vyčerpání technologické vody, v níž je kontejner plněn použitým palivem. Pro manipulaci slouží 4 radiální čepy na plášti kontejneru. Vnitřní stěna nádoby je opatřena protikorozním niklovým povrchem.

Koš je tvořen 85 šestihrannými protlačovanými trubkami z hliníkové slitiny AlMg1,8 a mezi trubkami jsou ocelové rozpěrné plechy z oceli sycené bórem. Hliníková slitina dobře vede teplo a ocel je zastoupena pro zvýšení pevnosti koše. Koš je naplněn 84 soubory, přičemž centrální buňka je neobsazena. Těsnicí systém je realizován dvěma víky s kovovými těsnícími kroužky, tak jako u předchozího typu 440/84, avšak vylepšení spočívá v přidání elastomerového těsnění pod každé víko. Nad sekundárním víkem je krycí plech, který je opatřen epoxidovým nátěrem, stejně jako celý vnější povrch kontejneru. Na obrázku 2.14 je schéma konstrukce obalového souboru.



Obrázek 2.14: Konstrukce obalového souboru CASTOR 440/84M

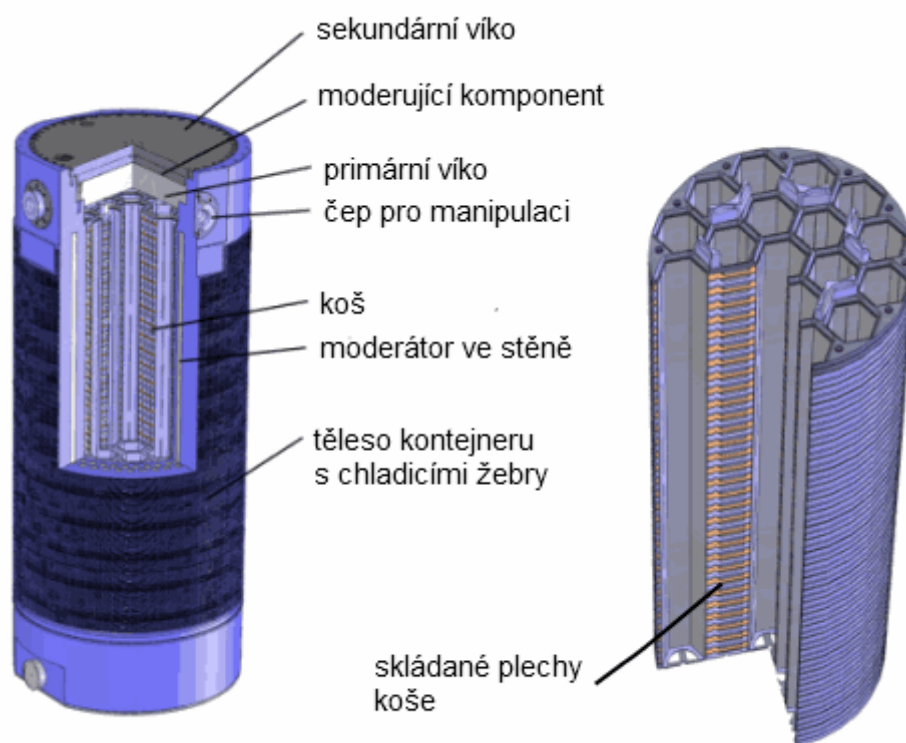
Souhrnné informace o obalovém souboru jsou uvedeny v tabulce 2.8:

Počet souborů v koši	84
Výška kontejneru	4170 mm
Průměr kontejneru	2660 mm
Materiál nádoby	GGG 40 litina
Materiál koše	AlMg1,8 , ocel
Zbytkový tepelný výkon obalového souboru	24,66 kW
Obohacení paliva	3,85% ^{235}U

Tabulka 2.8: Souhrnné informace k souboru CASTOR 440/84M

2.3.2.2 Kontejner CASTOR 1000/19 pro ETE

Tento typ kontejneru byl vyvinut pro palivo TVSA-T pro temelínskou jadernou elektrárnu. Kontejner je koncipován jako masivní tlustostěnná litinová nádoba, v níž je umístěn koš se šestiúhelníkovými pouzdry pro zasunutí palivových kazet. Primární víko je opatřeno otvorem pro vyčerpávání vody, plnění inertním plynem a diagnostické prvky. Koš je koncipován pro 19 palivových souborů TVSA-T. Celkový zbytkový výkon přenášený kontejnerem je 17kWt. Kontejner je vybaven systémem uzavírání několika víky, kdy mezi primárním a sekundárním víkem je umístěn moderátorový plech. Sekundární víko je ještě překryto krycím víkem. Obrázek 2.15 zobrazuje konstrukci kontejneru. Krycí víko na obrázku není zobrazeno. Tělo kontejneru je opatřeno žebry pro zvětšení plochy pro přestup tepla do proudícího vzduchu. Teplota kazet uvnitř kontejneru nepřekračuje 300°C.



Obrázek 2.15: Konstrukce CASTORu 1000/19 a vnitřní koš

Konstrukce koše je řešena kombinací devatenácti plechových šestiúhelníkových trubic z nerezové oceli s přidavkem bóru a dvěma typy plechů. První je z nerezové

oceli a druhý z hliníkových eloxovaných plechů. Plechy jsou střídavě řazeny po výšce koše a jejich vzdálenost vymezují distanční trubky. Střídání hliníkových a ocelových má zaručit vyhovění jak požadavkům vedení tepla, tak požadavkům pevnostním. Celý koš je fixován dvanácti závitovými tyčemi.

Počet souborů v koši	19
Výška kontejneru	5500 mm
Průměr kontejneru	2330 mm
Materiál nádoby	GGG 40 litina
Materiál koše	AlMg1,8 , ocel
Zbytkový tepelný výkon obalového souboru	17 kW
Obohacení paliva	5% ^{235}U

Tabulka 2.9: Souhrnné informace k souboru CASTOR 1000/19

2.3.3 Skladování v trvalých úložištích vyhořelého jaderného paliva

Projekty pro vybudování trvalých úložišť jaderných odpadů jsou plánovány v mnoha zemích světa včetně ČR. Problematika vyhodnocení vhodnosti oblasti k vybudování hlubinného úložiště je poměrně komplikovaná, navíc se jedná o mediálně velmi exponované téma, které využívají ke své propagaci různé zájmové a politické organizace. Jediné geologické úložiště na světě funguje v Novém Mexiku v USA a má název *Waste Isolation Pilot Plant* (WIPP) [29]. V Evropě má projekt výstavby v pokročilé fázi Finsko pro stavbu úložiště středně a nízko aktivních odpadů nedaleko jaderné elektrárny Olkiluoto.

2.3.3.1 Rozdělení radioaktivních odpadů

- **Vysoce radioaktivní odpady (kategorie I)** obsahují dlouhodobé zářiče, produkují intenzivní teplo a jejich nebezpečnost se počítá na milióny let. Doporučuje se jejich uložení ve speciálním trvalém úložišti jaderného odpadu v hlubinné geologické formaci.

- **Středně aktivní radioaktivní odpady (kategorie II)** obsahují dlouhodobé zářiče, avšak produkují méně tepla. Nebezpečnost se pohybuje ve statisících let. Doporučuje se jejich trvalé uložení v hlubinné geologické formaci.
- **Nízkoaktivní radioaktivní odpady (kategorie III)** obsahují dlouhodobé zářiče a nebezpečnost je v řádu desetitisíců let. Doporučené je trvalé uložení v hlubinné geologické formaci.
- **Středněaktivní radioaktivní odpady (kategorie IV)** neobsahují dlouhodobé zářiče, nebezpečnost v řádu tisíců let. Doporučuje se trvalé uložení v solných nebo jiných dolech, jeskyních nebo v povrchových a podpovrchových úložištích se zesílenou inženýrskou strukturou
- **Nízkoaktivní radioaktivní odpady (kategorie V)** neobsahují dlouhodobé zářiče, neprodukují teplo, nebezpečnost v řádu stovek let. Doporučuje se ukládat v povrchových a podpovrchových úložištích, jeskyních a dolech. [30]

2.3.3.2 Filosofie a podmínky ukládání jaderného odpadu

Prvním a nejdůležitějším ohledem při nakládání s radioaktivními odpady je ochrana zdraví a životního prostředí před účinky ionizujícího záření pomocí využívání umělých a přírodních bariér. Umělé bariéry jsou tvořeny obalovými soubory, maticemi vitrifikovaných a bitumenovaných odpadů a veškerými dalšími člověkem vytvořenými bariérami. Za přírodní bariéry lze považovat skalní a horninové masivy, vodní bariéry, atd.

Při výběru lokality pro vybudování trvalého hlubinného úložiště se postupuje podle přísných podmínek stanovených státními institucemi (SÚJB, MŽP, báňské úřady). V úvahu musejí být brány geologické vlastnosti podloží, činnost spodních vod, úroveň mineralizace vod, zátopové oblasti, krasové oblasti, hydrogeologická, seizmická a geologická stabilita, atd. V ČR přichází v úvahu skladování do granitového masivu v hloubce několika set metrů, kde by jaderný odpad měl být uložen nastálo (míněno 40 tisíc – až 100 tisíc let). Tento pojem je samozřejmě velice vágní, ačkoliv je číselně vyjádřen.

2.3.4 Přepracování jaderných odpadů na energeticky využitelné formy

[5] V jaderném palivu, které je ukládáno do dočasných úložišť, je obsaženo asi 1 % ^{235}U a 1 % štěpitelného ^{239}Pu . Hlavní část paliva - asi 95 % - tvoří ^{238}U a další prvky, jmenujme například hlavní nosiče radioaktivity ^{137}Cs a ^{90}Sr , které vznikají jako štěpné produkty při využívání paliva v reaktoru. Tyto prvky mají poločas rozpadu okolo 30 let. Další štěpné produkty by po oddělení mohly být průmyslově zajímavé, například platina, stříbro a paladium. [30]

Podstatou přepracování je oddělení energeticky využitelných prvků od nevyužitelných a přeměna izotopů na izotopy energeticky využitelné, tedy přepracování vyhořelého jaderného paliva, ze kterého se získává sekundární štěpný materiál. Tímto způsobem by byl uzavřen palivový cyklus. Ideou je uzavření palivového cyklu pro několik reaktorů termálních, které by dotovaly palivem reaktor rychlý množivý pomocí přepracování plutonia z vyhořelého paliva. Zbývalo by i plutonium pro palivo do termálního reaktoru.

Komerční přepracování závody jsou např. ve Francii a ve Velké Británii, kde vyrábí MOX paliva (Mixed Oxide). V současné době je však stále technologie finančně náročná v poměru k výrobě paliva z čerstvé uranové rudy.

Směsná paliva byla původně určena pro rychlé množivé reaktory (FBR) a vysokoteplotní plynem chlazené reaktory (HTGR), v dnešní době však nabývají významu i jako paliva pro reaktory tlakovodní, případně i těžkovodní. Nejtypičtější formou je směsné palivo na bázi oxidické keramiky $\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$. Případnou budoucí alternativou by mohlo být přepracovávání thoria z HTGR reaktorů.

Zásadními problémy při přepracování paliva aspekty bezpečnosti práce a hygieny. Nutná je dálková ovladatelnost technologických postupů a minimalizace prašných operací. Je tedy zapotřebí pracovat spíše s hrubozrnnými prášky, které však způsobují technologické problémy s rozpustností v kyselině dusičné. Vhodná je také celková automatizovatelnost procesu. Pracuje se s vysoce aktivními materiály, kdy jsou emitována alfa, beta, gama záření a neutrony, především neutronová radiace ^{240}Pu a gama záření ^{241}Am . Původní linky byly sestavovány z rukavicových,

mírně podtlakových boxů. Zmiňovaná prašnost však způsobovala velké prachové sedimenty na stěnách boxů a také na samotných rukavicích a rezultovala ve vývoj semidistančních a distančních procesů. Celou problematiku hygieny navíc umocňuje potřeba důsledně zachovávat podkritičnost všech procesů za pomoci používání moderativních materiálů a aditiv.

3 Teorie přenosu tepla vedením a další potřebné vztahy

V této kapitole jsou uvedeny základy přenosu tepla vedením, roztažností materiálů a zbytkového výkonu. Zejména je cíleno na zadání diplomové práce a navržený výpočtový model. Čerpáno bylo zejména ze zdrojů [2] a [3].

3.1 Základní vztahy

Vedení tepla v tělese má různý charakter podle podmínek. Pokud se šíří teplo tak, že teplota je v jednotlivých částech tělesa časově konstantní, jedná se o stacionární přenos tepla. Pokud se teplota v těchto místech s časem mění, nazývá se tento proces vedení tepla nestacionární. Bylo-li těleso vystaveno náhlému, dostatečně dlouhému působení tepla, po uplynutí určité doby těleso ztrácí vlastnosti svého počátečního tepelného režimu a nestacionární režim se úplně podřizuje uvedenému působícímu tepelnému zatížení. Takový režim se nestacionárního vedení tepla se nazývá regulární. Je-li těleso vystaveno periodickému tepelnému zatížení, teplota v jednotlivých místech tělesa se s časem periodicky mění. V takovém případě má přenos tepla v tělese vlnový charakter. Teplo na těleso může působit buď povrchem ohraničeného objemu tělesa, nebo z vnitřních zdrojů tepla, které působí v objemu tělesa. Takový případ se nazývá vedení tepla s vnitřním zdrojem.

Základní veličina pro stanovení vedení tepla v tělese je *měrný tepelný tok*:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \nabla T \quad (4)$$

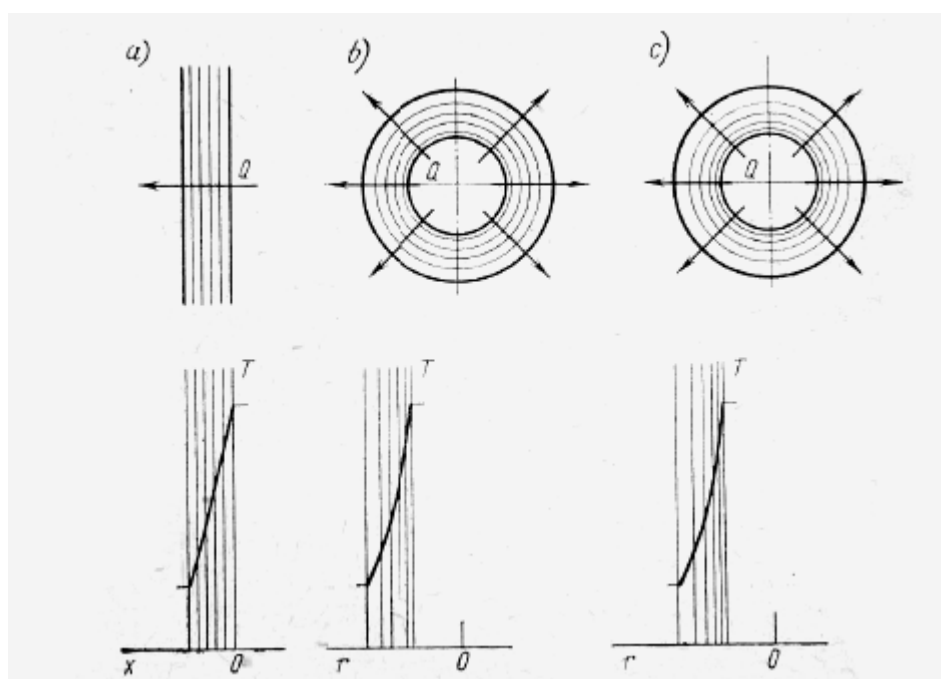
kde:

λ	součinitel tepelné vodivosti tělesa (nebo prostředí)
∇T	gradient teploty

Pro ilustraci uveďme, že ke špatným vodičům tepla, tepelným izolátorům patří materiály, které mají součinitel tepelné vodivosti $\lambda < 0,2W/mK$, na příklad vzduch, který se nepohybuje při pokojové teplotě, má $\lambda = 0,02W/mK$. Dobrými tepelnými

vodiči jsou materiály, především kovy, u nichž $\lambda > 20W/mK$, na příklad měď, která má $\lambda = 400W/mK$.

Rozložení teplot v tělese nalzáme při řešení úlohy vedení tepla ve tvaru funkce $T(x, y, z, \tau)$, kde x, y, z jsou kartézské souřadnice bodů v prostoru a τ je čas. Pro stanovení teplotního pole na vyšetřovaném tělese se užívá izotermických ploch, čili ploch se stejnou teplotou. Na obrázku 3.1. jsou znázorněny izotermické plochy pro vedení tepla v rovinné stěně, v trubce a v duté kouli.



Obrázek 3.1: Rozložení teploty při vedení tepla

Šíření tepla v libovolném místě tělesa probíhá ve směru normály k izotermické ploše. Měrný tepelný tok tedy určíme výrazem:

$$\dot{q}_{ved} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (5)$$

kde $\frac{\partial T}{\partial n}$ je teplotní gradient ve směru normály k izotermické ploše.

Obalové křivky normál k izotermickým plochám vytvářejí čáry tepelného toku. Souhrn těchto čar tedy udává *tepelný tok*. Tepelná bilance jednotkového objemu tělesa při vedení tepla vede k diferenciální rovnici:

$$\frac{\partial}{\partial T} (\rho \cdot c_p \cdot T) + \text{div } \dot{q}_{ved} = \dot{q}_{zdr} \quad (6)$$

kde:

ρ měrná hmotnost
 c_p měrná tepelná kapacita látky.

Zavedením změn teplot můžeme rovnici (3.3.) zapsat ve tvaru:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_{zdr} \quad (7)$$

kde \dot{q}_{zdr} je tepelný tok vnitřních zdrojů tepla v uvažovaném tělese. Pro případ bez vnitřních tepelných zdrojů lze diferenciální rovnici vedení tepla v tělese zapsat ve tvaru:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (8)$$

a zůstane-li výraz $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ konstantní,⁸ můžeme rovnici napsat:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

nebo:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \Delta T \quad (10)$$

kde $\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ je Laplaceův diferenciální operátor.

Součinitel teplotní vodivosti materiálu vyjadřuje schopnost materiálu měnit rovnoměrně teplotu ve vrstvách. Například stříbro má asi 2000x vyšší vodivost než dřevo. V praxi to znamená, že při rovnoměrném působení tepelného zdroje se za nějaký čas ve stříbře rovnoměrně rozloží teplota v celém objemu tělesa, zatímco ve dřevě se na teplotu zdroje ohřeje za stejný nebo podobný čas pouze první vrstva u tepelného zdroje, zatímco ostatní vrstvy materiálu zůstanou na teplotě původní, nebo se změní jen velmi málo. To může působit tepelná napětí v materiálu a vést k jeho porušení.

⁸Veličinu a [$m^2 \cdot s^{-1}$] nazýváme teplotní vodivost tělesa.

Laplaceův diferenciální operátor ΔT má fyzikální smysl, je-li $\frac{\partial T}{\partial \tau} > 0$, potom výraz odpovídá ohřevu, je-li $\frac{\partial T}{\partial \tau} < 0$, potom odpovídá ochlazování tělesa v libovolném místě. Pokud je $\Delta T = 0$ a stacionární tepelné podmínky $\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0$, potom zůstává rozložení teplot časově neproměnné:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (11)$$

je tedy diferenciální rovnicí stacionárního vedení tepla v tělese, jejíž integrací nalezneme funkci rozložení teplot, která představuje stacionární teplotní pole v tělese. Pro válec je příhodné používání cylindrických souřadnic, jimiž jsou poloměr r , polohový úhel φ a souřadnice bodu ve směru osy válce x . S těmito souřadnicemi lze vyjádřit diferenciální operátor teploty válce vyjádřit:

$$\Delta T_{cyl} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (12)$$

3.2 Řešené typy úloh vedení tepla

V praxi se řeší několik typů úloh vedení tepla, které lze rozdělit do tří skupin:

- Stacionární vedení tepla v tělesech
- Nestacionární vedení tepla v tělesech
- Teplotní a tepelné vlny

Úlohy se řeší pomocí integrace diferenciální rovnice vedení tepla, jež popisuje libovolné případy šíření tepla. Pro nalezení rozložení teplot v tělese při konkrétních podmínkách je nutné znát *okrajové podmínky*.

K okrajovým podmínkám patří:

- a) *Počáteční rozložení teplot v tělese*
- b) *Okrajová podmínka pro tepelné působení na těleso*

Počáteční rozložení teplot v tělese může být různé. Nejjednodušším případem je rozložení stejné počáteční teploty v celém objemu tělesa:

$$T(x, y, z, \tau_0) = T_a \quad (13)$$

Různá může být také hraniční podmínka tepelného působení. Rozlišuje se pět různých hraničních podmínek:

1) Na povrchu tělesa se udržuje dané rozložení teplot: $T(R_{out}) = T_{out}$

2) Na povrchu tělesa se udržuje dané rozložení měrných tepelných toků:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_{int}} = \frac{\dot{q}}{\tau}$$

3) Povrch tělesa je obklopen prostředím o dané teplotě a s danými součiniteli přestupu tepla: $-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_{int}} = \alpha(T_{out} - T_{\infty})$

4) Povrch tělesa je podroben tepelnému působení vlivem vedení tepla při dotyku s jiným tělesem

5) Při působení tepla dochází k přeměně jeho hmotnosti a ke změně polohy povrchu v čase (odpovídá procesům tavení, sublimace, apod.)

3.3 Vedení tepla u válce s tepelnými zdroji

Ve válci neomezené délky působí rovnoměrně rozložené zdroje tepla o měrném výkonu \dot{q}_{zdr} [W/m^3]. Válec je obklopen prostředím o konstantní teplotě T_0 . Hledáme teplotní pole ve válci a přenos tepla ze zdrojů. Diferenciální rovnici v homogenním válci se zdroji tepla a konstantním součinitelem tepelné vodivosti můžeme psát ve tvaru:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\dot{q}_{zdr}}{\lambda} = 0 \quad (14)$$

Integrací této rovnice získáme rovnici:

$$T = -\frac{\dot{q}_{zdr}}{\lambda} \cdot \frac{1}{4} r^2 + C_1 \cdot \ln r + C_2 \quad (15)$$

Teplotní pole můžeme předpokládat souměrné, pro $r = 0$:

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$$

odkud plyne $C_1 = 0$.

Pro $r = \frac{d}{2}$ se určí přestup tepla z povrchu válce pomocí vzorce:

$$\dot{Q} = -\pi d \lambda \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=\frac{d}{2}} = \frac{1}{4} \pi d^2 \dot{q}_{zdr} \quad [W/m] \quad (16)$$

Vzhledem k okrajové podmínce 3. druhu platí:

$$\frac{1}{4} \dot{q}_{zdr} \cdot d = \alpha \left[C_2 - \frac{\dot{q}_{zdr}}{\lambda} \cdot \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 T_0 \right] \quad (17)$$

Odkud určíme integrační konstantu C_2 :

$$C_2 = T_0 + \frac{1}{4} \dot{q}_{zdr} \cdot d \cdot \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{\lambda} \right) \quad (18)$$

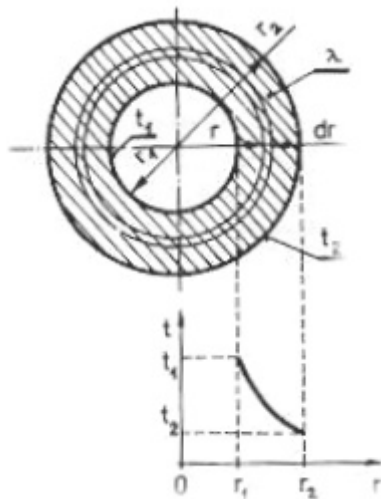
Rovnice rozložení teplot ve válci tedy je:

$$T(r) = T_0 + \frac{1}{4} \dot{q}_{zdr} \cdot d \cdot \left\{ \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{\lambda} - \left[1 - \left(\frac{r}{\frac{d}{2}} \right)^2 \right] \right\} \quad (19)$$

Pro teplotu na povrchu válce platí:

$$T_{\frac{d}{2}} = T_0 + \frac{1}{4} \dot{q}_{zdr} \cdot d \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (20)$$

3.4 Vedení tepla v izolovaném válci



Obrázek 3.2: Vedení tepla válcovou stěnou

Pro délkovou hodnotu tepelného toku \dot{q}_l platí vztah:

$$\dot{q}_l = -\lambda \frac{dt}{dr} \cdot 2\pi r \quad (21)$$

Po separaci a integraci:

$$\dot{q}_l \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -2\pi\lambda \int_{r_1}^{r_2} dt \quad (22)$$

Vyřešením rovnice získáváme délkovou hustotu tepelného toku:

$$\dot{q}_l = 2\pi\lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (23)$$

Integrujeme získaný vztah v mezích $\langle r_1, r \rangle$ a $\langle t_1, t \rangle$ a dostáváme vztah popisující průběh teploty ve válcové stěně:

$$t = t_1 - \frac{\dot{q}_l}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (24)$$

Nebo:

$$t = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \ln \frac{r}{r_1} \quad (25)$$

Pro tepelný odpor platí:

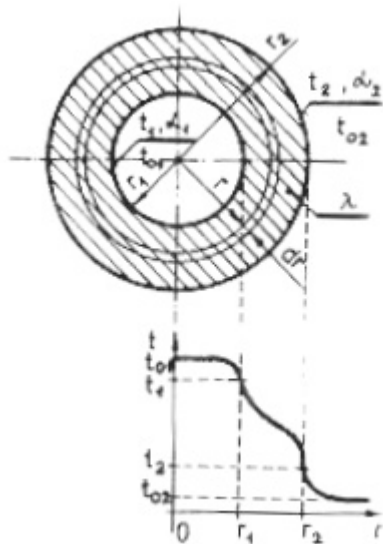
$$R_t = \frac{1}{2\pi\lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (26)$$

Při uvažování n vrstev s tepelnou vodivostí $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ poté pro délkovou hustotu tepelného toku \dot{q}_l :

$$\dot{q}_l = 2\pi\lambda_1 \cdot \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = 2\pi\lambda_2 \cdot \frac{t_2 - t_3}{\ln \frac{r_3}{r_2}} = \dots = 2\pi\lambda_n \cdot \frac{t_{n-1} - t_n}{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}}} \quad (27)$$

A pro tepelný odpor složené válcové stěny:

$$R_t = \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} \quad (28)$$



Obrázek 3.3: Vedení tepla složenou válcovou stěnou

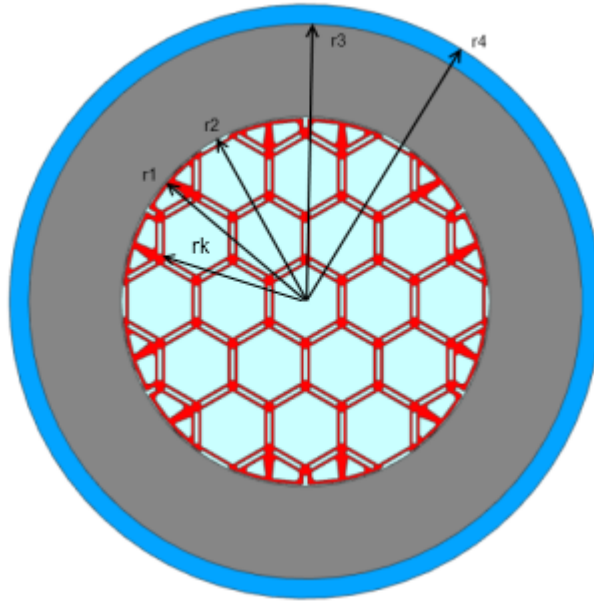
3.5 Aplikace na vlastní výpočet kontejneru

Předpokládáme znalost rozložení teplot, při výpočtu se neuplatňuje konvekce, tudíž je aplikována okrajová podmínka I. druhu (Dirichletova):

$$t_{int}(r_4) = t_{out} \quad (29)$$

kde

t_{int}	vnitřní teplota <i>koše</i>
t_{out}	vnější teplota <i>okolního vzduchu</i>
r_4	poloměr modelu



Obrázek 3.4: Schéma výpočtového modelu

Model je podrobně popsán v kapitole 4, sekci 4.4.4 Popis výpočtového modelu. Nastíháme pouze, že veškeré komponenty, z nichž je model složen, jsou pevné látky. Uplatňuje se pouze vedení tepla, z čehož vyplývá, že použitým součinitelem bude pouze součinitel vedení tepla λ . Tyto součinitele jsou pro konkrétní materiály uvedeny v tabulce 4.1 níže. Dodejme, že materiály odpovídají těmto komponentám modelu:

- Komponenta *koš* – materiál AlMg1,8
- Komponenta *hélium* – materiál hélium
- Komponenta *těleso* – materiál GGG 40 (tvárná litina)
- Komponenta *vzduch* – materiál vzduch

Aplikací vztahu (27) můžeme psát pro konkrétní model:

$$\begin{aligned}
 \dot{q}_l &= 2\pi\lambda_{koš} \cdot \frac{t_{int} - t_1}{\ln \frac{r_1}{r_k}} = 2\pi\lambda_{hélium} \cdot \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \\
 &= 2\pi\lambda_{těleso} \cdot \frac{t_2 - t_3}{\ln \frac{r_3}{r_2}} = 2\pi\lambda_{vzduch} \cdot \frac{t_3 - t_{out}}{\ln \frac{r_4}{r_3}}
 \end{aligned} \tag{30}$$

Kde součinitele λ jsou popsány výše a vyplývají z tabulky materiálů 4.1. v kapitole 4. Hodnoty r_k, r_1, r_2, r_3, r_4 jsou poloměry jednotlivých komponent modelu. Teplota t_{int} je vnitřní teplota komponenty *koš*, teplota t_{out} je teplota komponenty *vzduch*. Mezi nimi jsou další teploty odpovídající ostatním komponentám.

Odpovídající tepelný odpor by vzešel ze vztahu (28):

$$R_t = \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} \\ = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{\lambda_{koš}} \cdot \ln \frac{r_1}{r_k} + \frac{1}{\lambda_{hélium}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_{těleso}} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_{vzduch}} \ln \cdot \frac{r_4}{r_3} \right] \quad (31)$$

Teplotní pole by se řešilo v intervalech daných rozměry mezi jednotlivými teplotami komponent a je řešeno numerickým výpočtem v kapitole 4.

3.6 Zbytkový výkon palivových kazet

Tato část souvisí s částí 2.3.2 pojednávající o obalových souborech. Zbytkový výkon palivové kazety se určí ze vztahu [8]:

$$N_d(t) = 0,066 \cdot N_t \cdot [t^{-0,2} - (t + T)^{-0,2}] \quad (32)$$

kde

N_d	dodatečný vývin tepla štěpných produktů
N_t	ustálený tepelný výkon kazety před zastavením
t	čas po zastavení reaktoru
T	doba práce kazety na ustáleném výkonu N_t

Pracovala-li tedy palivová kazeta pro VVER440, která má výkon 4,4 MW, na tomto výkonu po dobu 1500 dnů, její zbytkový výkon bude 10 letch po vyjmutí z aktivní zóny:

$$N_d(10let) = 0,066 \cdot N_{10let} \cdot [10let^{-0,2} - (10let + T)^{-0,2}] \quad (33)$$

tedy v sekundách

$$N_d(10let) = 0,066 \cdot 4,4 \cdot \left[(3,1536 \cdot 10^8)^{-0,2} - (3,1536 \cdot 10^8 + 1,296 \cdot 10^8)^{-0,2} \right] \quad (34)$$

$$N_d(10let) = 11\,209\,W_t \quad (35)$$

3.7 Teplotní roztažnost materiálů

[31] Přivedením tepla (za konstantního tlaku) vytknutému objemu materiálu způsobíme vzrůst teploty o dT a objemu o dV . Původní objem označme V_N . Přírůstek objemu vyjádříme:

$$dV = \gamma \cdot V_N dT \quad (36)$$

poté integrací dostáváme:

$$\gamma = \frac{1}{V_N} \cdot \left(\frac{dV}{dT} \right)_p = \frac{1}{V_N} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \cdot \frac{1}{v_N} \cdot \frac{v - v_N}{T - T_N} \quad (37)$$

kde

γ	izobarický součinitel objemové roztažnosti
V_N	původní objem
T_N	původní teplota

Ze (37) plyne

$$v = v_N \cdot [1 + \gamma \cdot (T - T_N)] \quad (38)$$

Pro hodnoty γ můžeme uvažovat přibližnou hodnotu $\gamma = 3\alpha$, kde α je součinitel teplotní délkové roztažnosti. Viz tabulka 3.1.

Pro délkovou roztažnost můžeme obdobně psát:⁹

$$l = l_N \cdot \alpha(T - T_N) \quad (39)$$

kde

⁹Pro malé teplotní rozdíly takové, aby mohla být zanedbána změna měrné hmotnosti materiálu.

l_N původní délka
 α součinitel délkové roztažnosti

Pro ilustraci uvedme hodnoty délkové teplotní roztažnosti některých materiálů [32]:

Materiál	Součinitel délkové teplotní roztažnosti [$\cdot 10^{-6} K^{-1}$]
Hliník	23,8
Ocel (1,8% C)	11
Zlato	18,8
Měď	16,7
Bronz	17,9
Sklo	8,5

Tabulka 3.1: Součinitele délkové teplotní roztažnosti některých materiálů

4 Praktická část práce

Dle zadání diplomové práce se jedná o MKP výpočet teplotního zatížení koše kontejneru CASTOR určeného pro palivo typu VVER440. Zároveň mají být stanoveny dilatace koše způsobené vlivem teplotního zatížení. Výpočet měl být proveden výpočtovým softwarem CFD FLUENT. Tento však nedisponuje moduly pro výpočty strukturálních analýz, které jsou nutné pro stanovení dilatací. Po probrání problému s konzultantem práce byl zvolen software Siemens NX v9.0, který ve své nadstavbě obsahuje množství modulů pro řešení různých inženýrských problémů. Termální analýza je provedena v modulu NX Thermal a strukturální část v modulu NAS-TRAN. Termální analýza by byla v softwaru FLUENT proveditelná, avšak následné přenášení výsledků do dalšího řešiče by se mohlo stát problematickým. V systému NX je možné provést práci celou – od modelování součástí, přes tvorbu sítě, po použití více řešičů.

4.1 Stručný popis problému

Jedná se odvod tepla vytvářeného zbytkovým výkonem palivových souborů do okolí kontejneru. Cílem je získat teplotní pole na koši a vzniklé dilatace koše. Taková úloha svou komplexností a složitostí přesahuje rozsah diplomové práce. Bylo tedy zavedeno několik zjednodušení: sdílení tepla je pro potřeby výpočtu realizováno pouze kondukcí (vedením), vedení tepla je stacionární, součinitel vedení tepla je považován v materiálech za konstantní, helium, jímž je plněn kontejner, je považováno za pevnou látku, stejně jako okolní vzduch. Model je realizován pouze pro střední (výškově) část kontejneru, přestup tepla víkem a dnem se do výpočtu nepromítá a není v úloze řešen. Uspořádání koše nepočítá s 85 buňkami pro kazety, jak je typické pro CASTOR 440/84, ale pouze s 19. Výpočtový model rovněž nepočítá se žebry na povrchu kontejneru. V modelu také nejsou zahrnuty polyetylénové stínící elementy po obvodu tělesa. Zahrnuto také není niklové pokrytí vnitřní stěny tělesa kontejneru a vnější epoxidový nátěr.

4.2 Materiály

Ve výpočtovém modelu figurují čtyři materiály. Nádoba je z tvárné litiny s kuličkovým grafitem GGG 40, koš ze slitiny AlMg1,8, vnitřní heliová náplň je považována pro potřeby výpočtu za pevný materiál, stejně tak i okolní vzduch. [33]

Materiál	E [Mpa]	R_m [Mpa]	$R_{p0,2}$ [Mpa]	ν	λ [W/m.K]	α [$\cdot 10^{-6} K^{-1}$]	c_p [kJ/kg.K]
GGG 40	$1,4 \cdot 10^5$	570	345	0,25	52	10,8	0,447
AlMg1,8	$2,7 \cdot 10^4$	290	217	0,33	117	25	0,9
He (300°C)	-	-	-	-	252	-	5,193
Vzduch (25°C)	-	-	-	-	0,0262	-	1,007

Tabulka 4.1: Mechanické, fyzikální a teplofyzikální vlastnosti materiálů

4.3 Metodika výpočtu, použité programy

V posuzované oblasti je těleso kontejneru namáháno teplotním polem. Pro výpočet teplotního zatížení byla zvolena metoda konečných prvků (MKP), realizovaná v programu NX Thermal. Řešení teplotních polí bylo získáno na prostorovém modelu střední části kontejneru. Vzhledem k charakteru úlohy byla zvolena výška modelu 100 mm, protože výsledky pro šíření tepla v radiálním směru by při zanedbání tepelného přenosu víkem a dnem nádoby měly být stejné po celé délce koše. Původní délka 2000 mm byla redukována z důvodu úspory výpočetního a grafického výkonu PC. Výška modelu na výsledky v radiálním směru nemá vliv. Teplotní pole byla získána řešením úlohy přenosu tepla vedením.

Získané výsledky termální analýzy byly importovány na výpočetní síť modelu v programu NX NASTRAN, v němž byla prováděna stacionární analýza. Matice výsledků vázaná na souřadnice modelu ve tvaru (x, y, z, T) je použita na modelu,¹⁰ na němž je vytvořena nová síť pro strukturální úlohu.

¹⁰Výsledky jsou vázané na souřadnice modelu, nikoliv sítě. Výpočtové sítě v obou analýzách mohou tedy být rozdílné dle vhodnosti pro strukturální nebo termální analýzu

4.3.1 Charakteristika programu NX Thermal

[34] Programový systém NX Thermal, modul vytvořený firmou Unigraphics, je určený pro numerickou analýzu tepelných jevů na modelech a konstrukcích.

Modely jsou diskretizovány s využitím MKP. Na vytvořené nebo importované geometrii se vytvoří vhodná výpočetní síť, kdy jsou geometrické útvary vyplněny zvoleným typem elementů. Tím je vytvořena tzv. síť MKP. Každému elementu (resp. uzlu na elementu) je přiřazena sada reálných konstant a sada materiálových vlastností. Elementům a uzlům se přiřadí okrajové podmínky a definuje se zatížení a typ úlohy. Řešení takto vzniklého výpočtového modelu vede na soustavu lineárních algebraických rovnic (dle typu úlohy), která je řešena obvyklými postupy.

Výsledné vektory je možné zobrazovat formou izobar a barevných ploch a příslušné hodnoty pak lze odečítat z barevné škály s číselnými hodnotami. Je možné řešit také nelineární a nestacionární úlohy, kdy tepelné zatížení je závislé na čase. Poněkud uživatelsky slabší je tento modul v případech proudění a nucené konvekce, především kvůli přednastaveným možnostem, které nelze na uživatelské úrovni měnit. Dodejme však, že s každou další verzí systému NX je modul NX Thermal propracovanější a v budoucnu by mohl dohnat i velmi adaptabilní FLUENT. Pro daný typ úlohy však program je uživatelsky poměrně přátelský.

4.3.2 Charakteristika programu NX NASTRAN

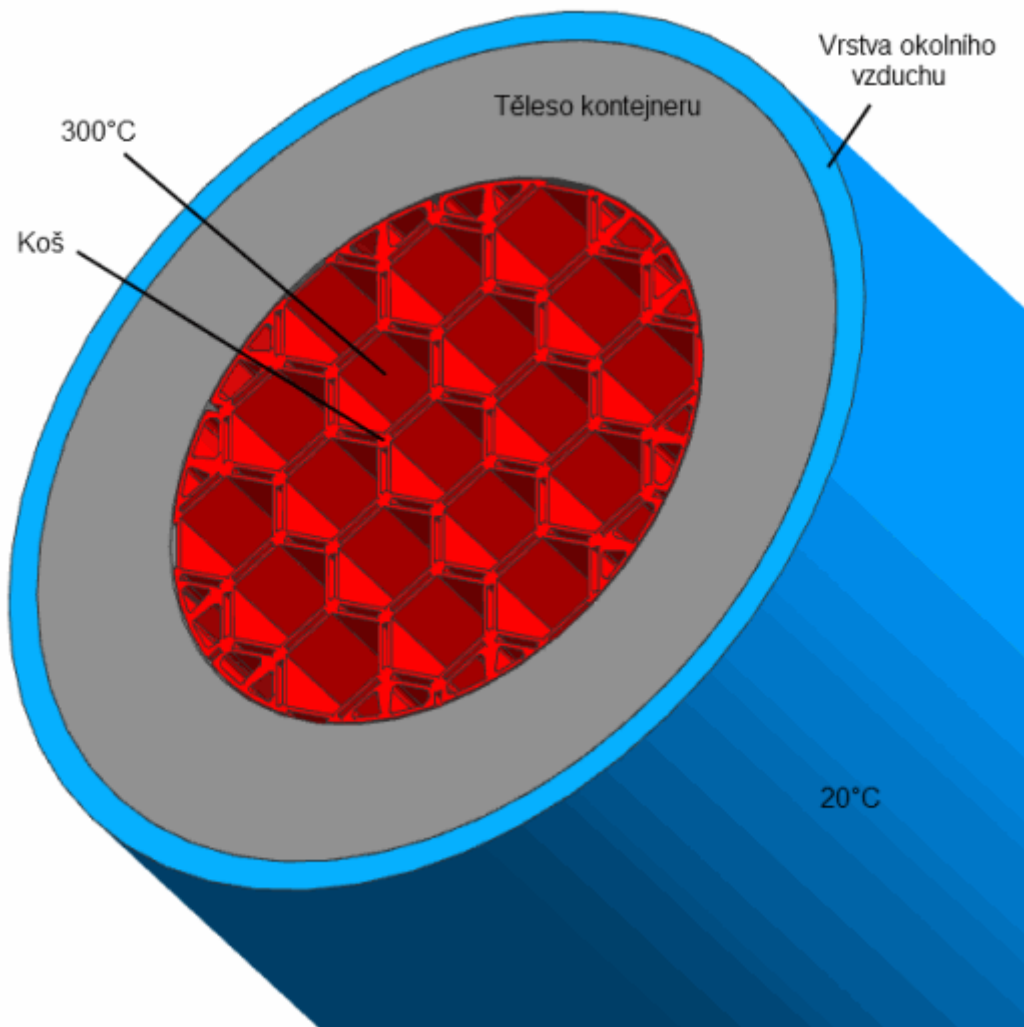
[35] NASTRAN je MKP řešič (NAsa STRuctural ANalysis) původně vyvíjený NASA od 60. let. Může být spouštěn na široké škále operačních systémů a počítačů – od PC až po velké superpočítače. Program se skládá z množství modulů, které odpovídají vykonávání specifických operací (aplikace okrajových podmínek, generování matic, vlastní řešení, atd.) Moduly jsou kontrolovány pomocí vnitřního jazyka DMAP. Program samotný neposkytuje grafické rozhraní, vstupy a výstupy jsou realizovány pomocí textových souborů. V případě NX NASTRAN jsou prvky systému NASTRAN implementovány do CAD/CAE systému NX a práce v něm probíhá na grafické úrovni, a to včetně zobrazování výsledků na modelech v barevných škálách.

Funkce systému NASTRAN je velmi podobná jako u modulu NX THERMAL. Opět jde o diskretizaci těles na konečné prvky – elementy. V našem případě je diskretizace prováděna obecným prostředím systému NX Advanced Simulation pro síťování modelů. Zde závisí na uživatelské volbě vhodného tvaru elementů pro danou úlohu. Dalším krokem je formulace chování jednotlivých elementů, tedy formulace okrajových podmínek (*constrains*) v daném souřadném systému. Souřadné systémy je možné posouvat a nahrazovat. Například v tomto konkrétním případě byl kvůli geometrii nahrazen kartézský souřadný systém systémem cylindrickým při podmínkách $X \approx R$, $Y \approx T$, $Z \approx Z$. Po nastavení působení na model, v našem případě teplotní pole, se přechází k samotnému řešení systému lineárních algebraických rovnic. Zde se jedná o deformační variantu MKP a počítá se s posuvy. Po ukončení výpočtů se získávají dodatečné výsledky, jako například rozložení napětí, tlakové působení v kontaktech a další. Souhrn výsledků je poté zobrazován v modulu NX Advanced Simulation Results opět v grafické podobě s barevnými škálami na modelu, případně je možné tvořit grafy závislostí různých veličin a výsledků.

4.4 Vlastní výpočet

4.4.1 Vstupní parametry výpočtu

Vzhledem k požadavku stacionární úlohy byly vstupní parametry výpočtu definovány ve formě zatěžujících teplot jednotlivých částí obalového souboru. Vnitřní teplota na stěnách buněk pro palivové soubory je určena na 300°C a teplota okolního vzduchu je 20°C. Teplota byla zadávána na každou plochu, o niž se „opírá“ palivová kazeta za předpokladu dokonalého kontaktu.

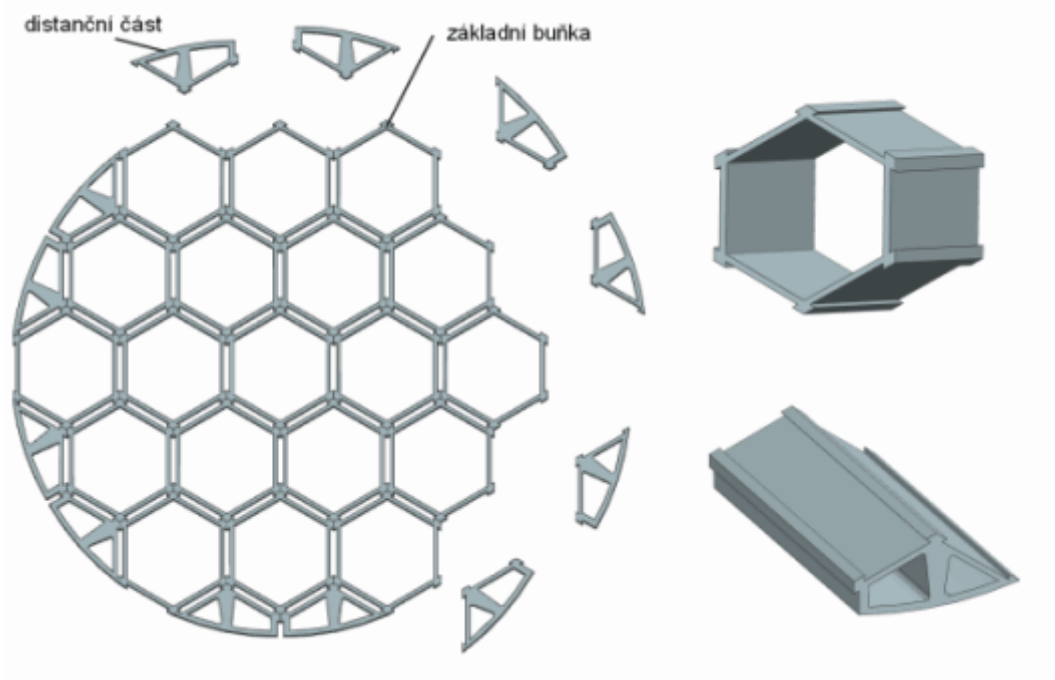


Obrázek 4.1: Vstupní teploty

Pro zadání výpočtu strukturální analýzy s termálním zatížením je zapotřebí vložit nejprve původní teplotu. Úvaha byla taková, že montáž kontejneru probíhala za teploty 20°C. Rozměry, které měly komponenty obalového souboru při montáži, jsou tedy brány v úvahu pro tvorbu modelu (a poté i výpočtového FEM modelu). Jedná se především o původní distanci koše od vnitřní stěny tělesa kontejneru. Po vložení vyhořelých palivových souborů do kontejneru, vyčerpání vody a napuštění kontejneru héliem začne teplota koše stoupat až na 300°C. Koš bude podle teploty dilatovat. Vstupními parametry pro strukturální analýzu jsou výsledky termální analýzy, tedy teplotní pole na koši.

4.4.2 Model kontejneru

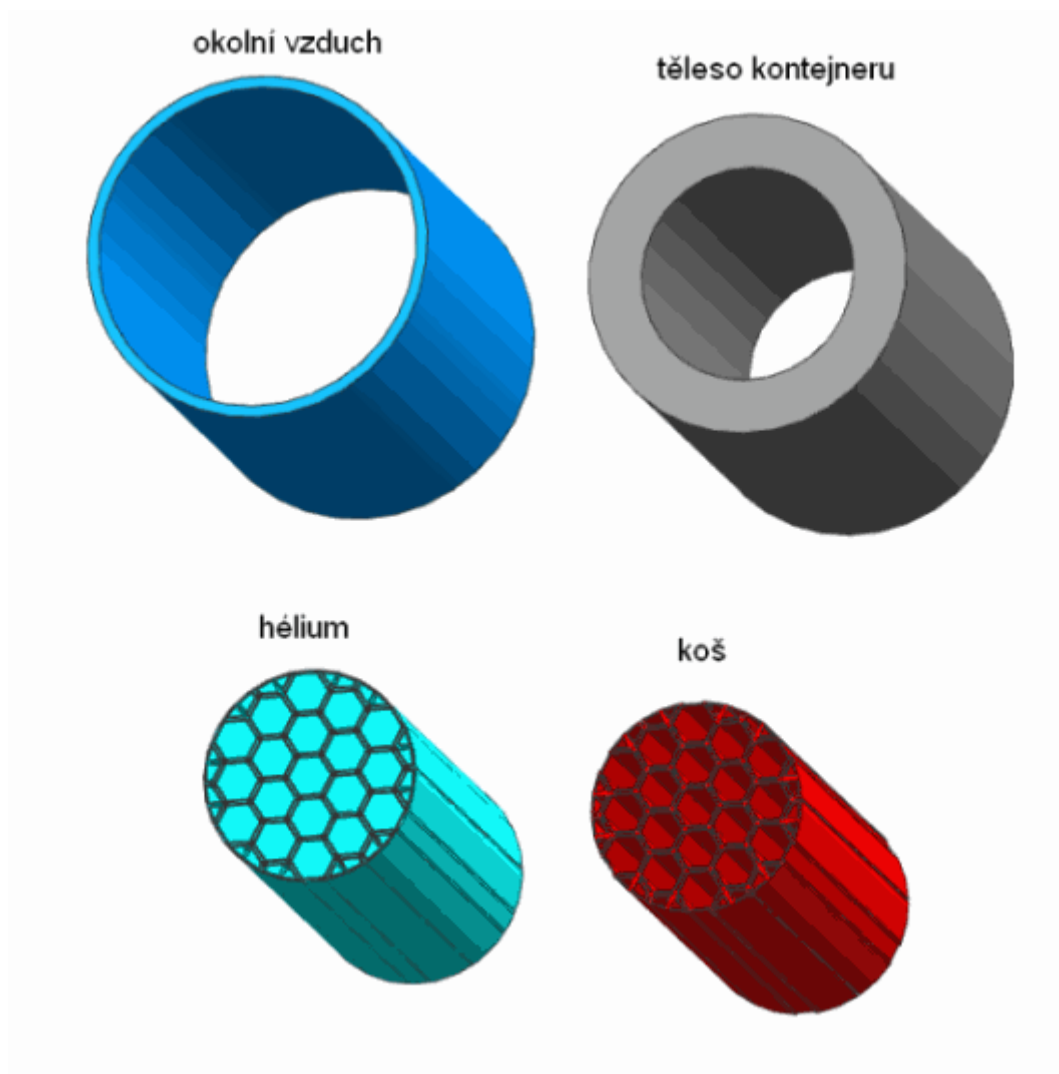
Detailní výkres modelu je možné si prohlédnout ve volně vložené příloze. Model kontejneru je vytvořen v CAD/CAE systému NX 7.5. Pro potřeby budoucího výpočetního modelu je vytvořen každý komponent modelu jako jednotlivá součást, tedy i plynné helium a vzduch je v modelu zastoupeno *solidem*. *Koš* se skládá z 19 základních šestiúhelníkových buněk, které jsou opatřeny 12 distančními částmi stejné geometrie. Distanční části mají za úkol doplnit tvar koše do tvaru kruhového.



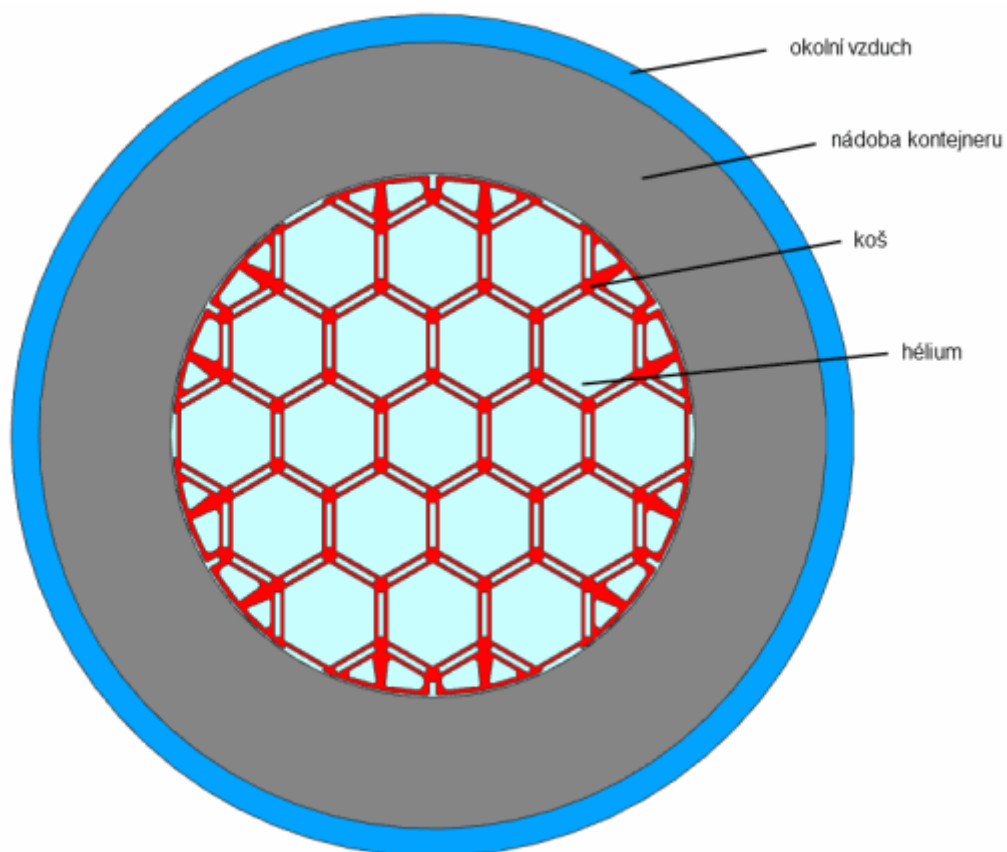
Obrázek 4.2: Konstrukce koše, základní buňka a distanční část

Celý *koš* je poté vložen do *tělesa*.¹¹ Z důvodů výpočtu jsou vytvořena i *těla vzduchu* a *hélia*. Rozdělená sestava kontejneru je na obrázku 4.3 a sestava v půdorysu na obrázku 4.4.

¹¹Model kontejneru je prakticky tvořen pouze *košem* a *tělesem* – nádobou



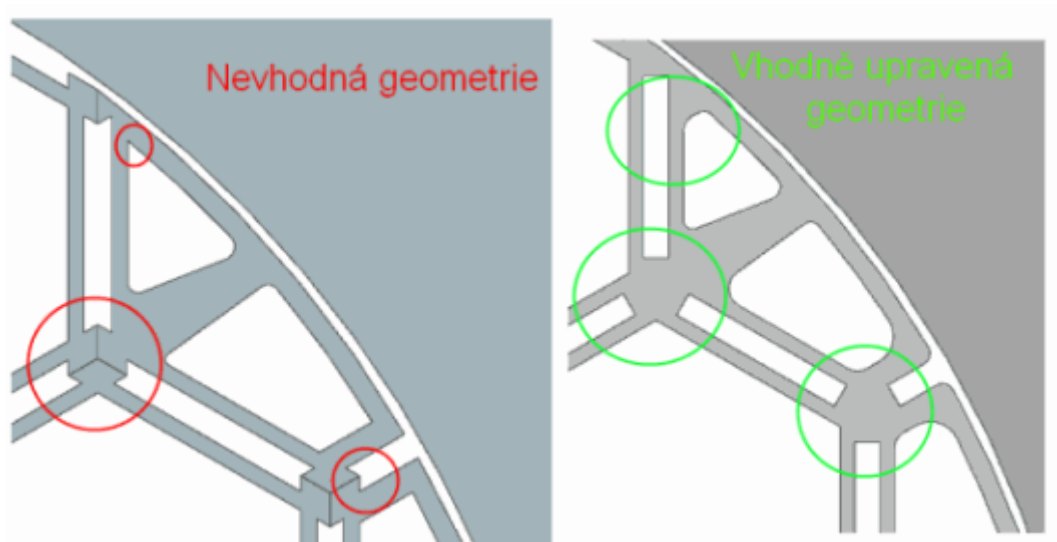
Obrázek 4.3: Rozdělená sestava těl částí kontejneru, hélia a vzduchu



Obrázek 4.4: Složená sestava

4.4.3 Úprava modelu na vhodný tvar výpočtového modelu

Pro správnou funkci modelu je třeba se vyhnout některým geometrickým útvarům, které by mohly způsobovat nefunkčnost nebo kolaps sítě modelu. Jedná se především o geometrické prvky s ostrým úhlem nebo kontakt dvou křivek, kdy jejich průsečík je intuitivně nejednoznačný. Tyto části se řeší zkoseními s tupými úhly nebo radiusy. Provedené úpravy ilustruje obrázek 4.5.



Obrázek 4.5: Úpravy nevhodných geometrických tvarů modelu

4.4.4 Popis výpočtového modelu

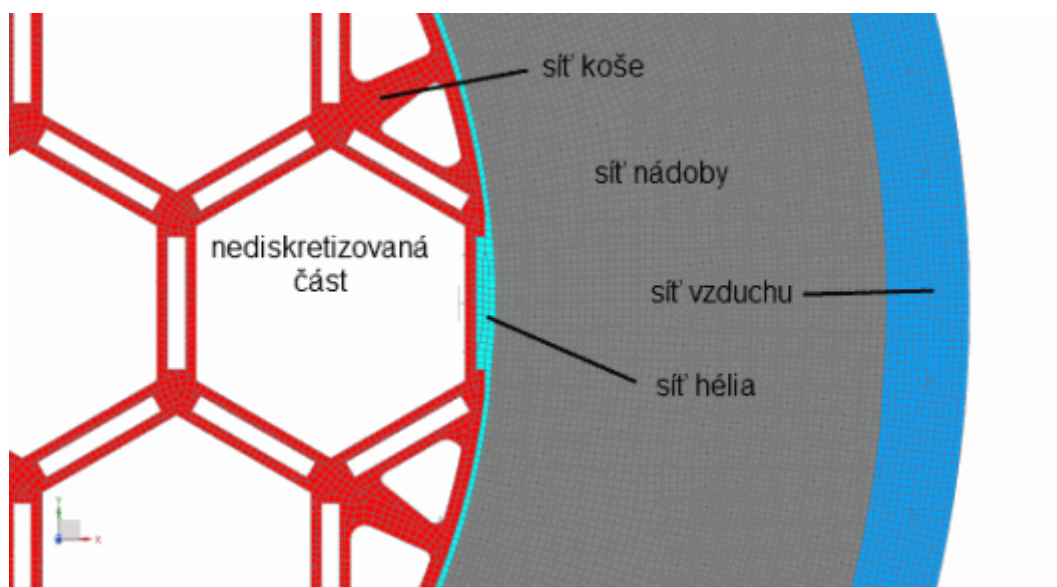
Výpočtový model je tvořen pro termální analýzu a strukturální analýzu zvlášť. Pro potřeby této úlohy jsou však zvoleny pro moduly NX Thermal a NX NASTRAN stejné diskretizační prvky. Vzhledem k charakteru úlohy nehraje významnou roli výška modelu a byla zvolena na hodnotu 100 mm z původních 2000 mm, a to především kvůli úspoře počtu elementů a tedy i výpočtového času.

4.4.4.1 Zadávání geometrických charakteristik modelu

Dle zadání práce jsou všechny výpočtové komponenty (tzn. *koš*, *helium*, *těleso*, *vzduch*) považovány za pevné látky. Jejich síť je tedy vytvářena pomocí elementů typu SOLID. Jako diskretizační segmenty jsou zvoleny 20-uzlové šestistěny (*hexahedral mesh*) o velikosti 4 mm. Výpočtová síť je tvořena funkcí *3D Swept Mesh*, která namodeluje na ploše komponenty dvourozměrnou síť a následně přidá třetí rozměr vytažením podle směru souřadnice Z. Sítě jsou na komponentech vytvářeny zvlášť. Jejich propojení pro následný výpočet je zajištěno funkcí *Mesh Mating*, která zajistí návaznosti jednotlivých uzlů (*node*) dotýkajících se elementů.

Celková kvalita sítě z hlediska stability výpočtu je kontrolována funkcí *Element Quality*. Tato funkce kontroluje hodnoty geometrických charakteristik jed-

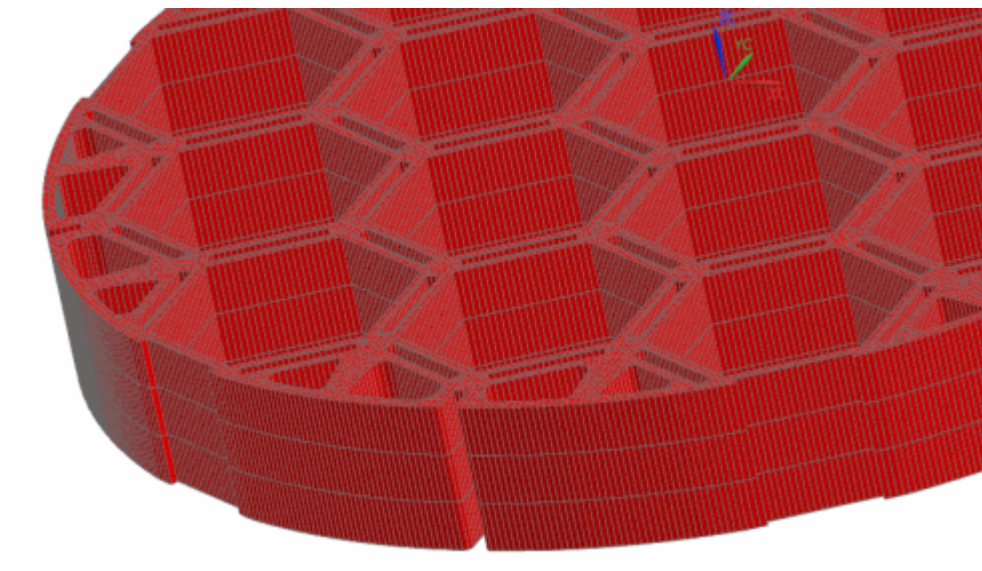
notlivých elementů na síťovaných plochách a porovnává je s povolenou hodnotou uloženou v systému pro daný typ elementu. Jmenujme například úhel zkosu (*skew angle*), jakobián (*jacobian ratio*), zúžení (*taper*), vnitřní úhly elementu (*interior angle*) nebo distorsi elementu (*warp*). V případě, že *Element Quality* hlásí chybné elementy, je možné je manuálně upravit na hranách i plochách modelu. Na následující sekvenci obrázků jsou v detailech zobrazeny jednotlivé sítě komponentů.



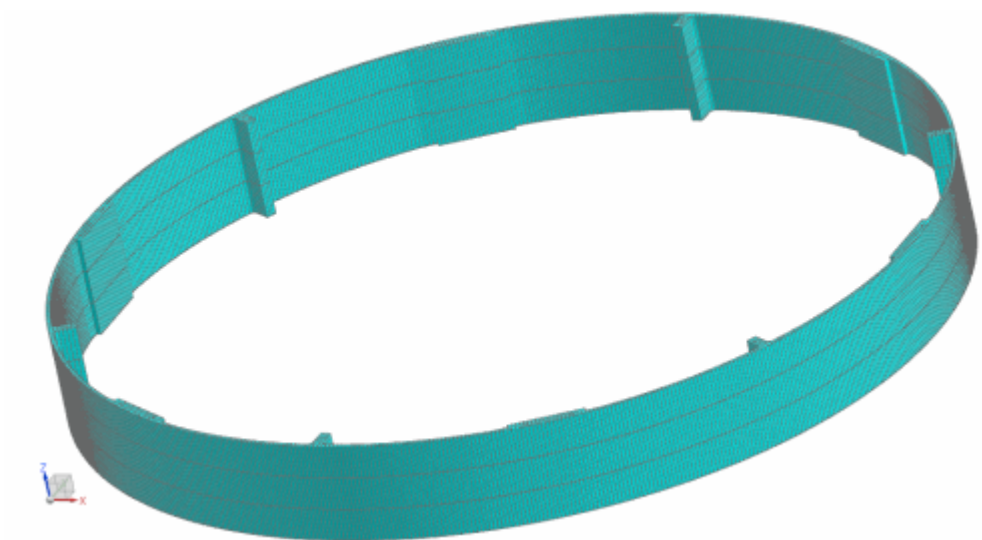
Obrázek 4. 6: Detail sítě na okraji koše

Na obrázku 4.6 vidíme uvnitř koše části, které nejsou síťovány. Toto je provedeno z důvodu úspory elementů. Na výpočet toto opomenutí nemá vliv, protože tyto plochy se prakticky nezúčastňují vedení tepla, protože jsou ohraničeny elementy s konstantní teplotou. Toto bylo zjištěno odlaďováním modelu, kdy se ve zmíněných plochách vyrovnala teplota na úroveň okolního ohraničení. Toto je logickým důsledkem zadání úlohy, kdy není zohledňována konvekce hélia v příslušných místech, která v místech probíhá.¹² V takovém případě by teplota samozřejmě byla rozdílná.

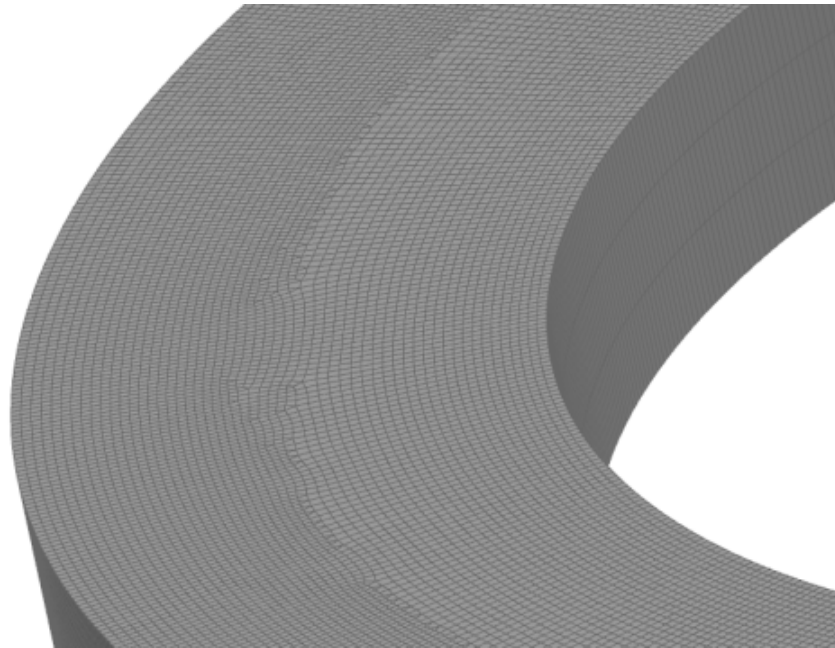
¹²V buňkách jsou ve skutečnosti umístěny kazety, okolo kterých cirkuluje hélium přirozenou konvekcí. To samé platí o obdélníkových mezerách, v nichž jsou umístěny ocelové spojovací členy.



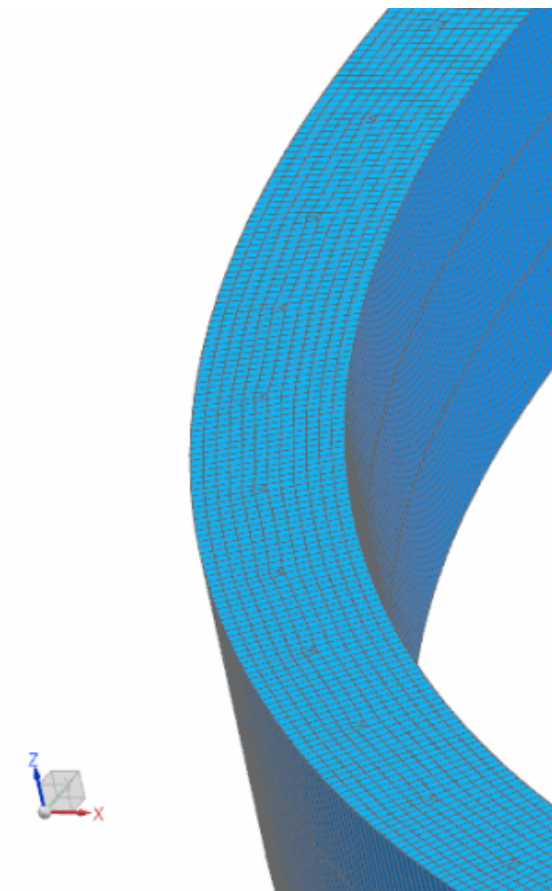
Obrázek 4.7: Síť koše



Obrázek 4.8: Síť hélia

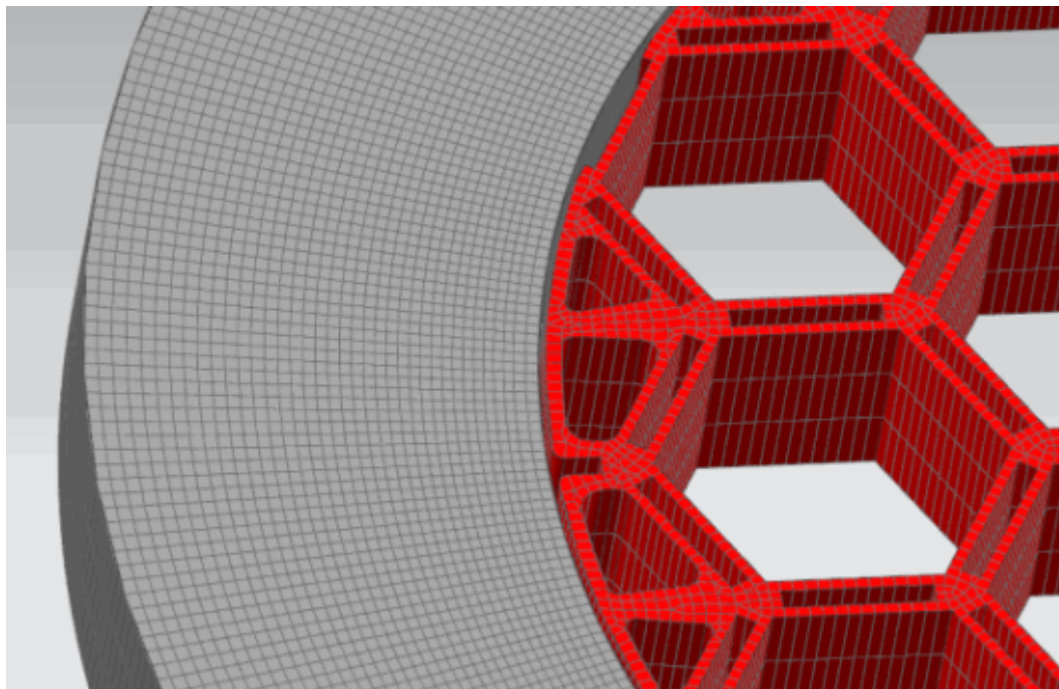


Obrázek 4.9: Síť tělesa kontejneru



Obrázek 4.10: Síť okolního vzduchu

Zobrazené sítě všech komponent jsou využity u termální analýzy. U strukturální analýzy jsou komponenty *vzduch* a *hélium* nepotřebné. Na obrázku 4.11 je detailní zobrazení okraje modelu pro strukturální analýzu.



Obrázek 4.11: Diskretizovaný model pro potřeby strukturální analýzy

4.4.4.2 Zadávání materiálových charakteristik modelu

Jednotlivým modelům komponent se udělují teplofyzikální a mechanické vlastnosti již ve fázi tvorby sítě. Používá se k tomu poměrně rozsáhlá knihovna materiálů, v níž jsou zaznamenány potřebné hodnoty pro následný výpočet. Pro tuto úlohu musela být vytvořena vlastní knihovna konkrétních materiálů. U hélia a vzduchu šlo o přeprogramování původních hodnot na tvar izotropního materiálu, aby se ve výpočtu mohly chovat jako pevné látky. U materiálů GGG 40 a AlMg1,8 se jednalo o vytvoření nových záznamů. Knihovny, které systém používá, jsou psány v obecném značkovacím jazyce XML. Pro naprogramování materiálů byla použita standardní syntaxe XML.

```

- <Material>
- <BulkDetails>
  <Name>Helium_Gas_solid</Name>
  - <Class>
    <Name>OTHER</Name>
  </Class>
  <Source source="" />
  - <PropertyData property="Material Type">
    <Data format="string">Isotropic</Data>
  </PropertyData>
  - <PropertyData property="Version">
    <Data format="string">2.0</Data>
  </PropertyData>
  - <PropertyData property="Category">
    <Data format="string">OTHER</Data>
  </PropertyData>
  - <PropertyData property="Mass Density (RHO)_1">
    <Data format="exponential">-1.730000e+002 , -1.530000e+002 , -1.330000e+002 ,
    1.270000e+002 , 2.270000e+002 , 4.270000e+002 , 7.270000e+002</Data>
    <Qualifier>temperature</Qualifier>
  - <ParameterValue parameter="Mass Density (RHO)_P1" format="exponential">
    <Data>4.871000e-010 , 4.060000e-010 , 3.481000e-010 , 2.708000e-010 ,
    6.969000e-011 , 4.879000e-011</Data>
  </ParameterValue>
  </PropertyData>
  - <PropertyData property="Thermal Conductivity (K)_2">
    <Data format="exponential">-1.730000e+002 , -1.530000e+002 , -1.330000e+002 ,
    1.270000e+002 , 2.270000e+002 , 4.270000e+002 , 7.270000e+002</Data>
    <Qualifier>temperature</Qualifier>
  - <ParameterValue parameter="Thermal Conductivity (K)_P2" format="exponential">
    <Data>7.300000e+001 , 8.190000e+001 , 9.070000e+001 , 1.072000e+002 ,

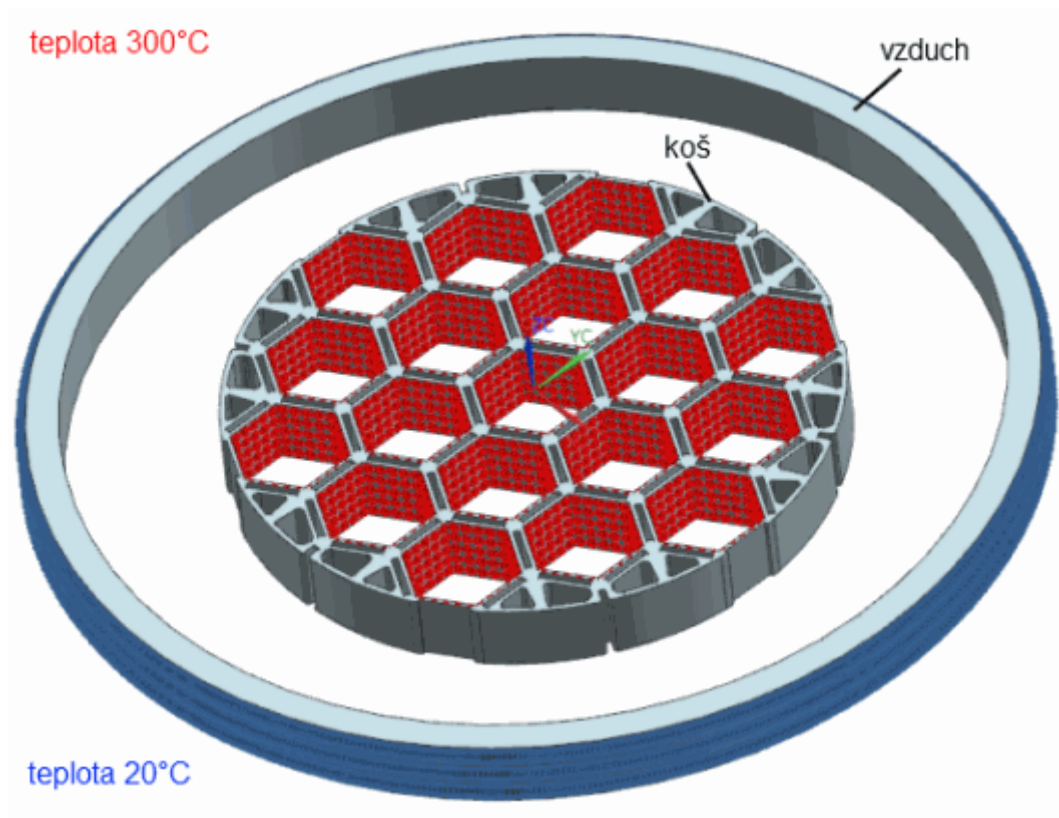
```

Obrázek 4.12: Příklad tvorby specifických materiálů

Přehled zadávaných materiálů je v tabulce 4.1 v podkapitole 4.2.

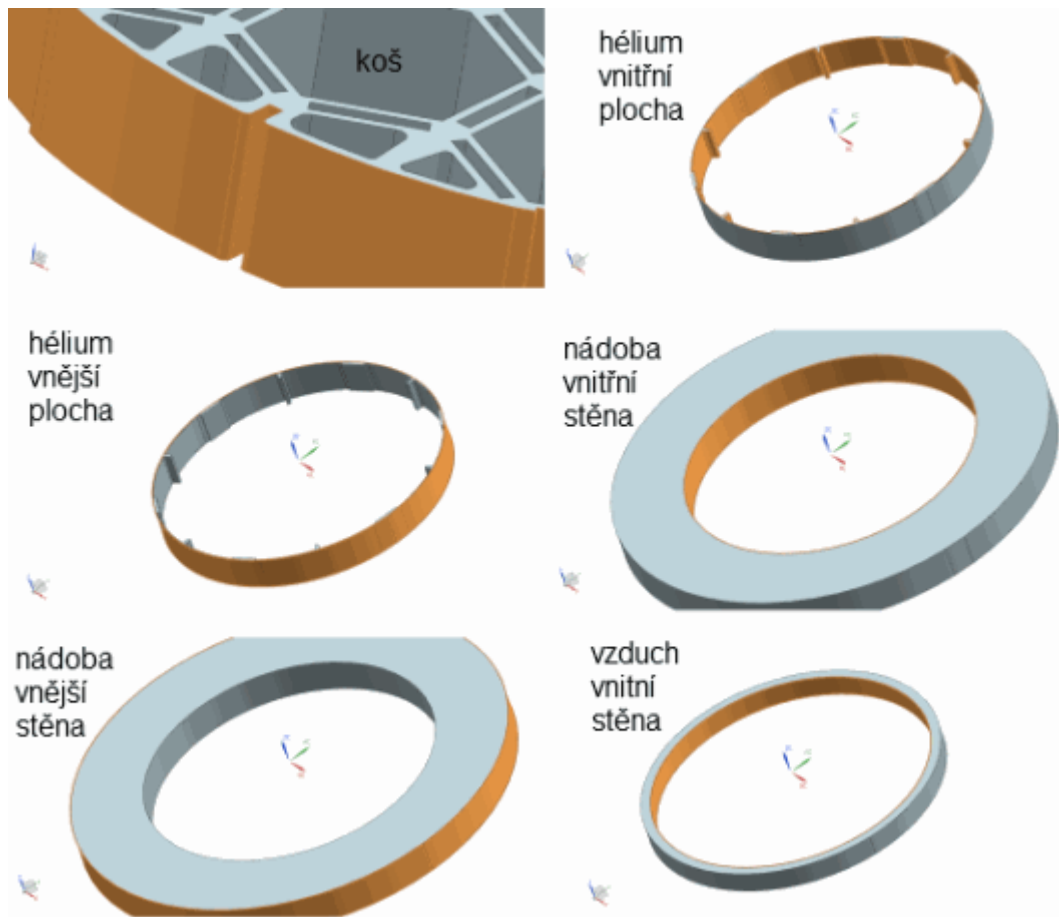
4.4.5 Výpočet – termální analýza

Výpočet termální analýzy je proveden na výpočtovém modelu popsáném v sekci 4.4.4. Proveden je v programu NX Thermal, který je popsáný v podsekcí 4.3.1. Jedná se o stacionární úlohu. Na vnitřní stěny buněk byla zadána teplota 300°C. Na komponentu *vzduch* je nastavena teplota 20°C. Na obrázku 4.13 jsou plochy zatížené teplotou označeny červenou (100°C) a modrou (20°C) barvou.



Obrázek 4.13: Zadání teplotního zatížení modelu

Jednotlivé komponenty jsou propojeny funkcí *Thermal Coupling*, která na vytvořených kontaktních plochách provede vzájemnou korelaci součinitelů vedení tepla. Dle zadání DP jsou komponenty *hélium* a *vzduch* nastaveny jako pevný materiál (*solid isotropic*). Výsledné teplotní pole je poté vyobrazeno v sekci *Results* pomocí obrázku modelu a izoploch dle odpovídající škály teplot. Na obrázku 4.14 jsou oranžově zvýrazněny vzájemné kontaktní plochy komponent. Tyto plochy jsou definovány vždy po celém obvodu komponenty.



Obrázek 4.14: Kontaktní plochy jednotlivých komponent

4.4.6 Výpočet – strukturální analýza

Strukturální analýza je provedena na modelu, který odpovídá obrázku 4.11. Jsou tedy pomínuty komponenty *vzduch* a *hélium*, v softwaru NX NASTRAN, který je popsán v podsekcí 4.3.2. Nejprve byly na výpočtovém modelu zavedeny vazby pro strukturální analýzu pomocí funkce *Surface-to-Surface Contact*. Opět jde o dotykové plochy modelu, v našem případě *koš* a *těleso*. Jedná se o stejné kontaktní plochy jako u nastavení termální analýzy. Na obrázku 4.14 jde o plochy „*koš*“ a „*nádoba vnitřní stěna*“.

Ke geometrii je nutné zavést okrajové podmínky pro budoucí posuvy. Vzhledem k tomu, že se v tomto případě pohybujeme v cylindrických souřadnicích, na *koši* se bude jednat o podmínku nulového posuvu v tečném směru, resp. v tečném směru

a ose Z. Volný je radiální posuv. U *tělesa* budou fixovány veškeré stupně volnosti, protože s deformacemi tělesa kontejneru není počítáno.

U tohoto řešení hypoteticky mohou vzniknout dvě možnosti deformace:

1) dilatace koše nepřekročí na poloměru hodnotu 2,8 mm, což je mezera mezi vnitřní stěnou tělesa kontejneru a okrajem koše

2) dilatace koše překročí na poloměru hodnotu 2,8 mm a koš narazí do vnitřní stěny tělesa

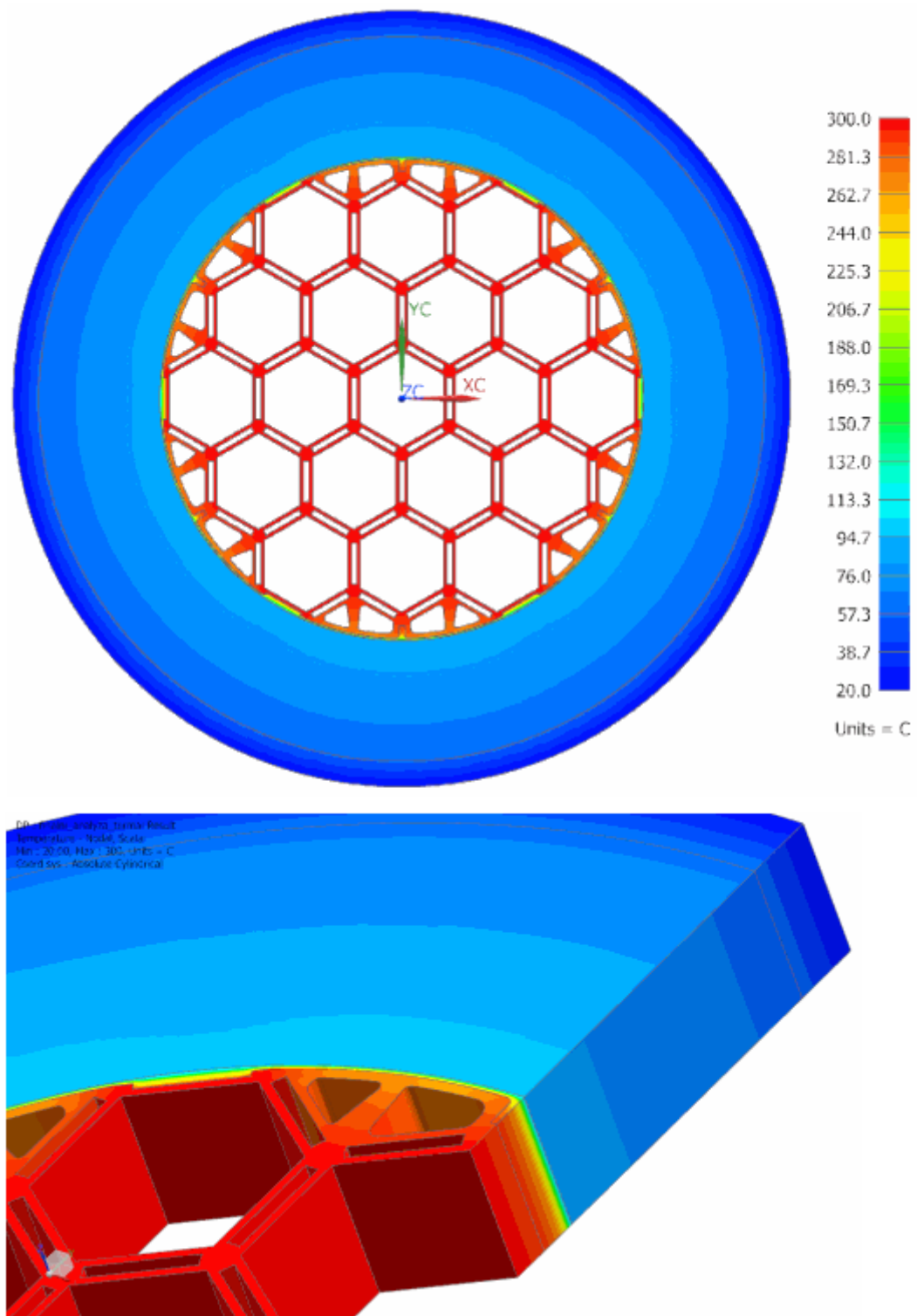
V prvním případě se nebude koncentrovat napětí vzniklé zabráněním dilataci koše, výsledky jsou tedy poskytnuty pouze ve formě dilatací koše. V případě druhém bude maximální dilatace známá a bude právě oněch 2,8 mm na poloměru koše. Výsledkem poté bude napěťové pole na koši vzniklé omezením dilatace.

V práci jsou uvedeny oba případy, přestože k dotyku *koše* a *tělesa* kontejneru vlivem teplotní dilatace nedošlo. Dosaženo toho bylo pomocí zadání okrajové podmínky pro radiální směr, která byla zadána na pevnou hodnotu délky mezery mezi košem a vnitřní stěnou tělesa, tedy 2,8 mm.

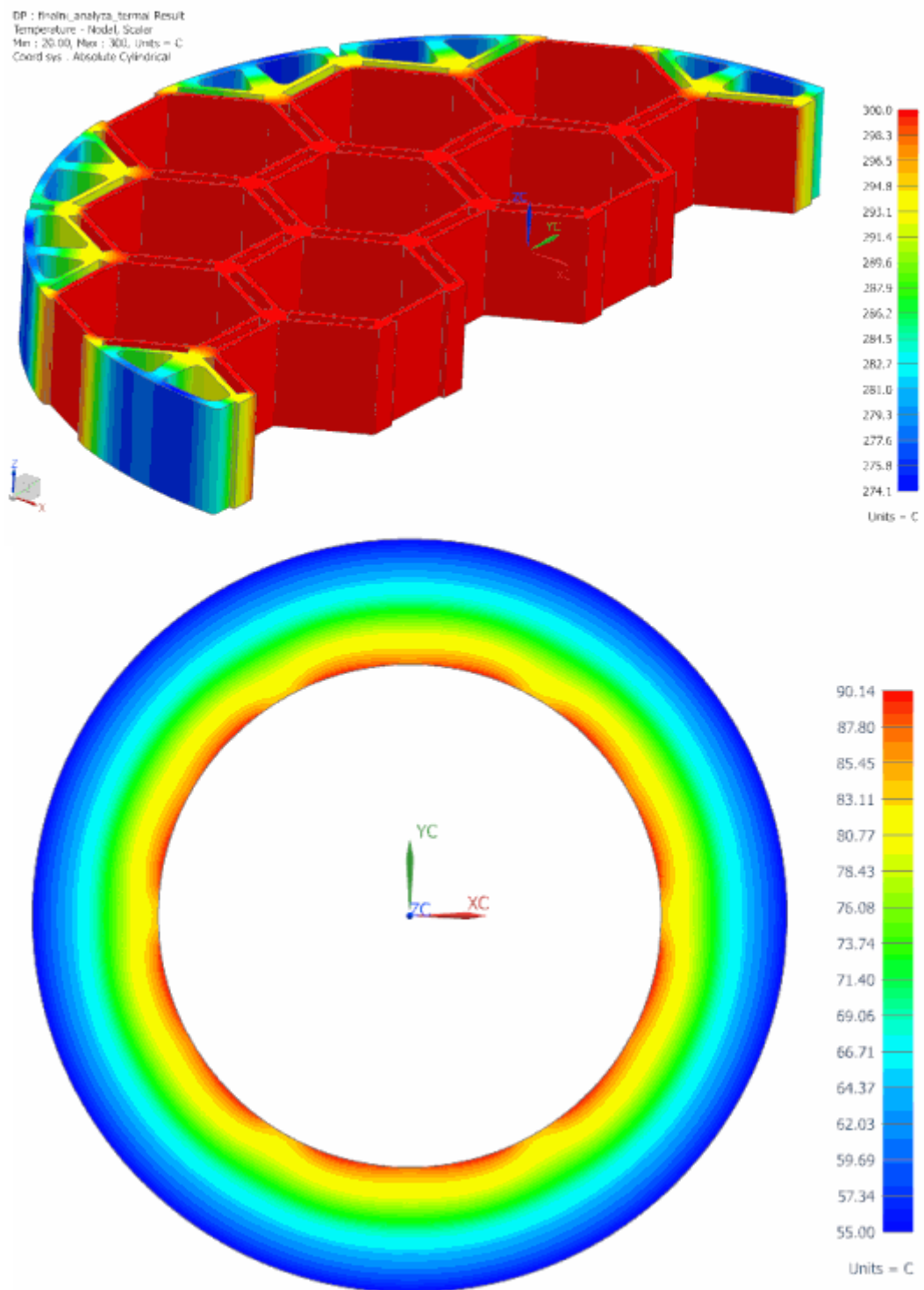
4.5 Výsledky

Výsledky jsou tvořeny formou izoploch s barevnými škálami určujícími hodnoty získaných veličin. Veškeré obrázky výsledků jsou přiloženy v elektronické podobě na přiloženém CD v plné kvalitě. Do diplomové práce jsou obrázky komprimovány, což poněkud zhoršuje jejich přehlednost a vypovídací hodnotu.

4.5.1 Výsledky termální analýzy



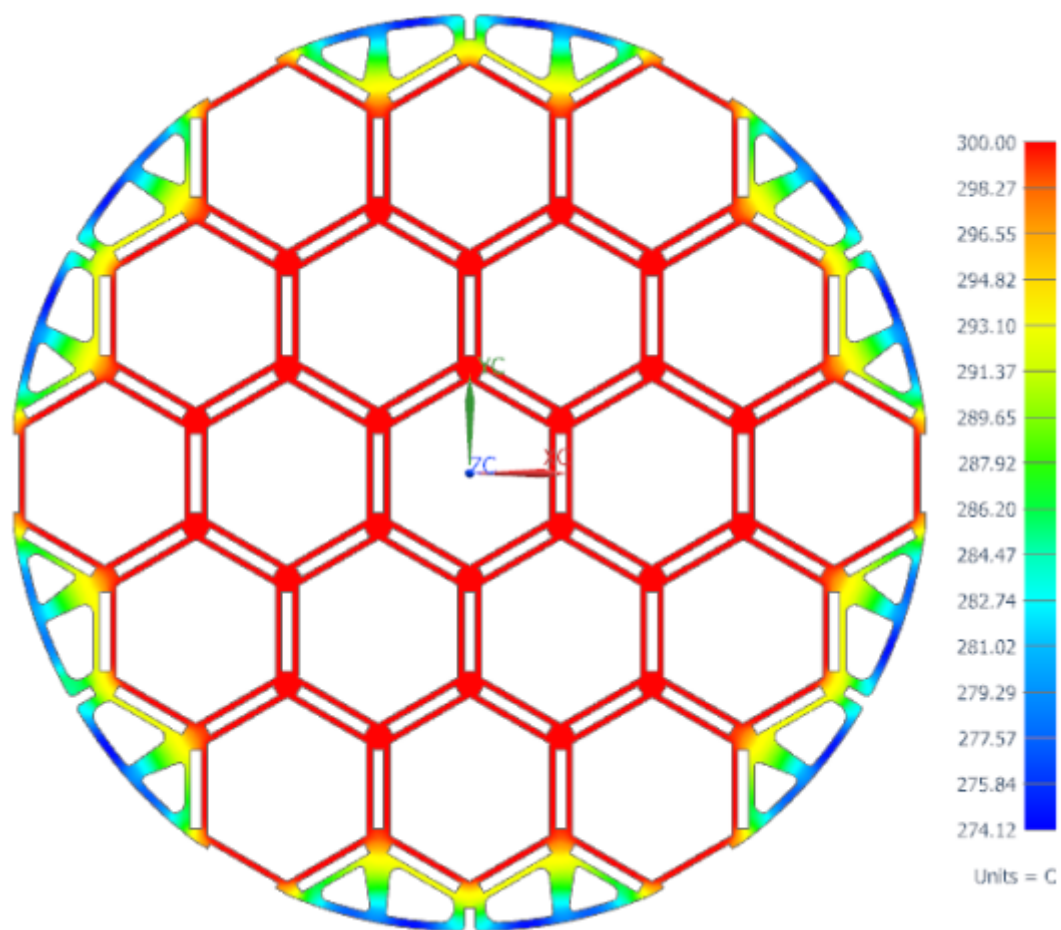
Obrázek 4.15: Rozložení teploty po celém kontejneru v řezu kontejnerem



Obrázek 4.16: Teplotní pole koše a tělesa kontejneru

Na izoplochách teploty *koše* je patrné, že nejnižší dosažená teplota na *koši* je 274,1°C. Tyto hodnoty jsou klíčové pro výpočet dilatací *koše*. Teplota *tělesa* kontejneru klesá směrem od středu kontejneru z teploty 90°C až na teplotu 55°C. Na

obrázku 4.15 je patrné rozložení teploty. Podstatná část *koše* je prohřátá na maximální teplotu 300°C, teplota se snižuje především na distančních kusech *koše*. To je způsobeno prohřátím veškerých buněk, od potenciálně vložených kazet. Maximální teplotní rozdíl je okolo 25°C, a to právě na okraji *koše* v místě distanční části. Lépe patrné je teplotní pole *koše* na obrázku 4.16 a 4.17.

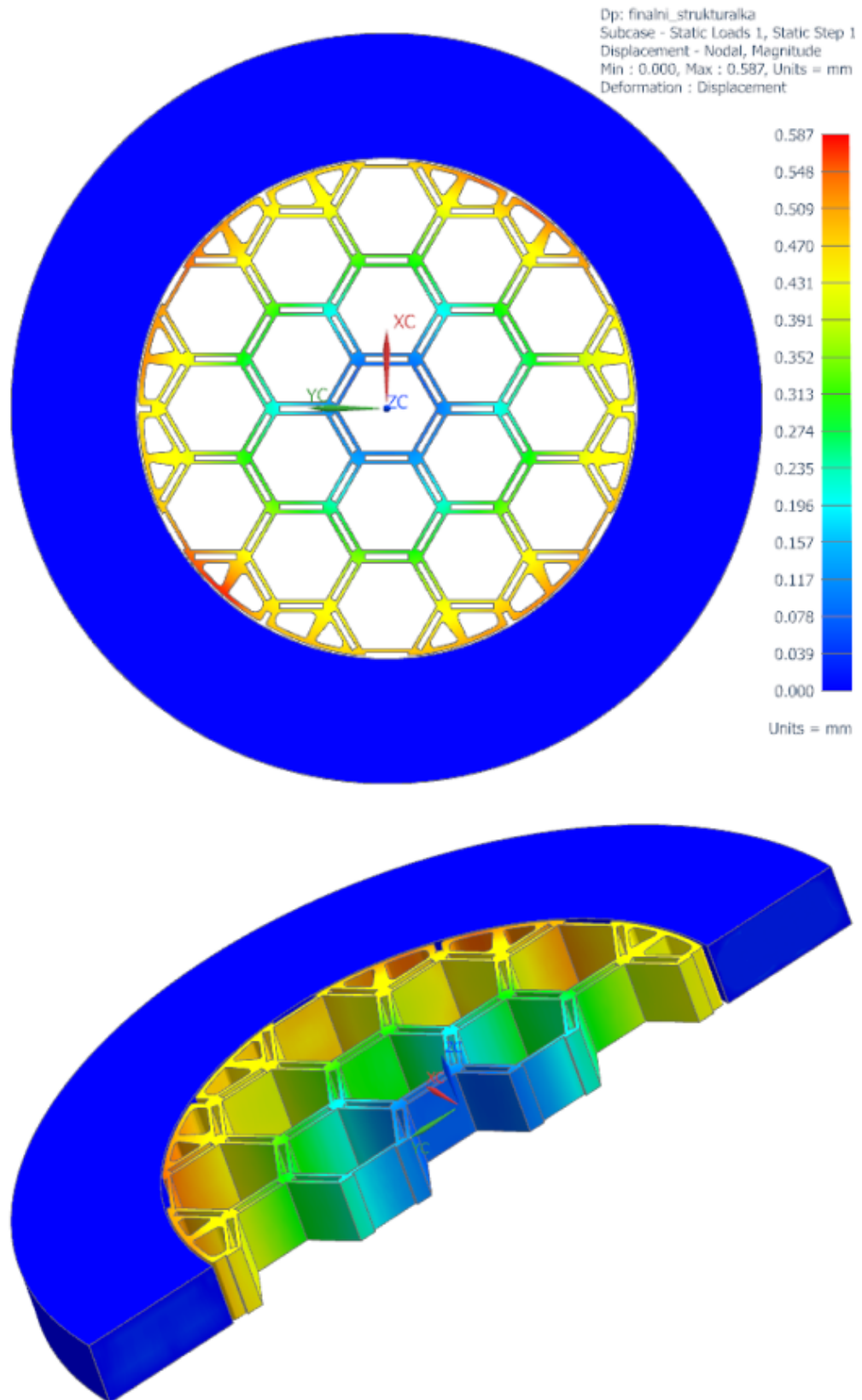


Obrázek 4.17: Teplotní pole na koši

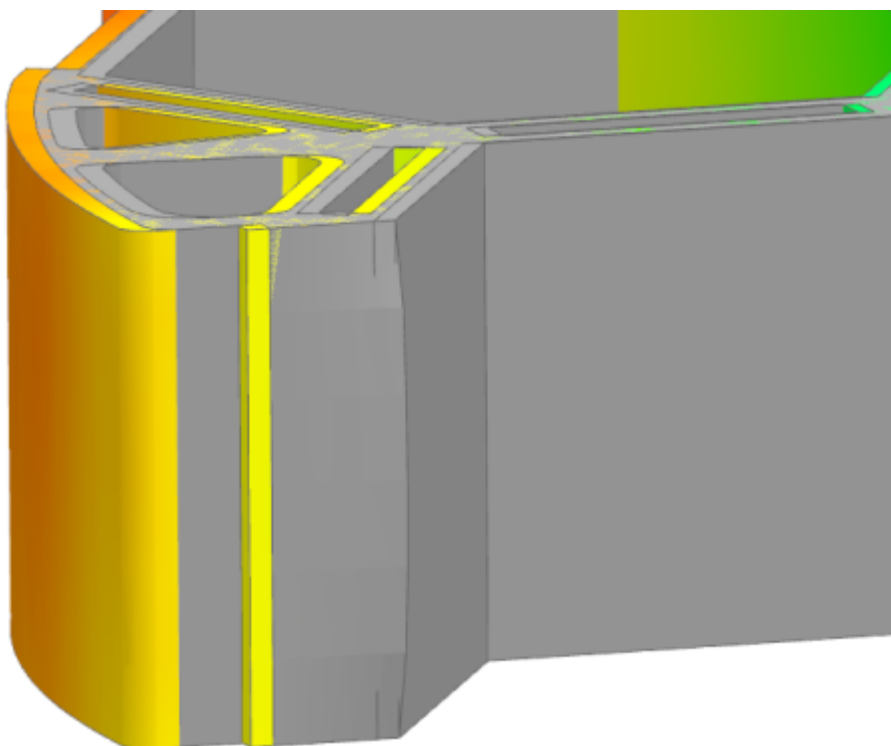
Komponent	Max. teplota [°C]	Min. teplota [°C]	Počet elementů
Koš	300	274,15	29 370
Hélium	296,67	84,31	2 946
Těleso	90,14	55,00	141 702
Vzduch	55,00	20,00	38 484

Tabulka 4.2: Souhrn maximálních a minimálních teplot elementů

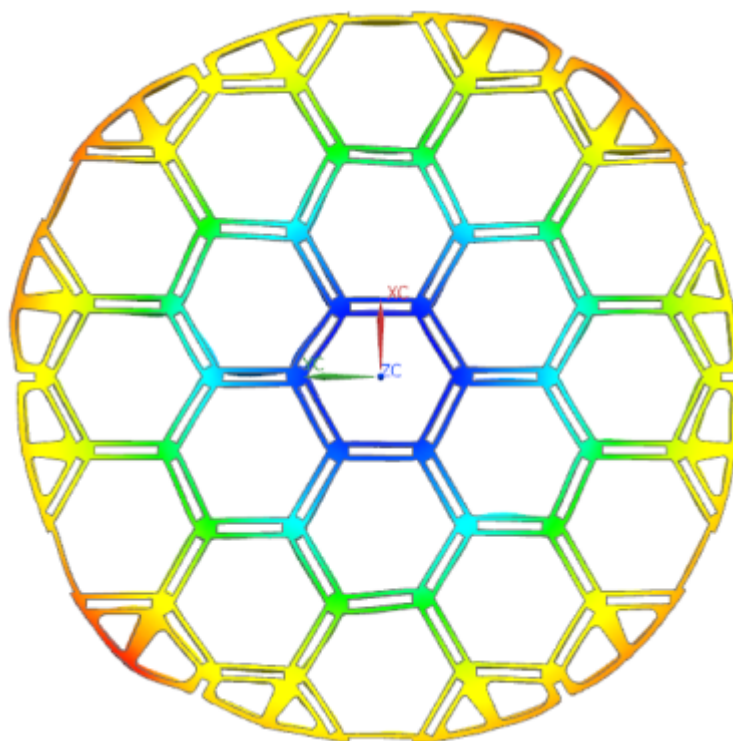
4.5.2 Výsledky strukturální analýzy



Obrázek 4.18: Deformace koše s nedeformovaným tělesem kontejneru

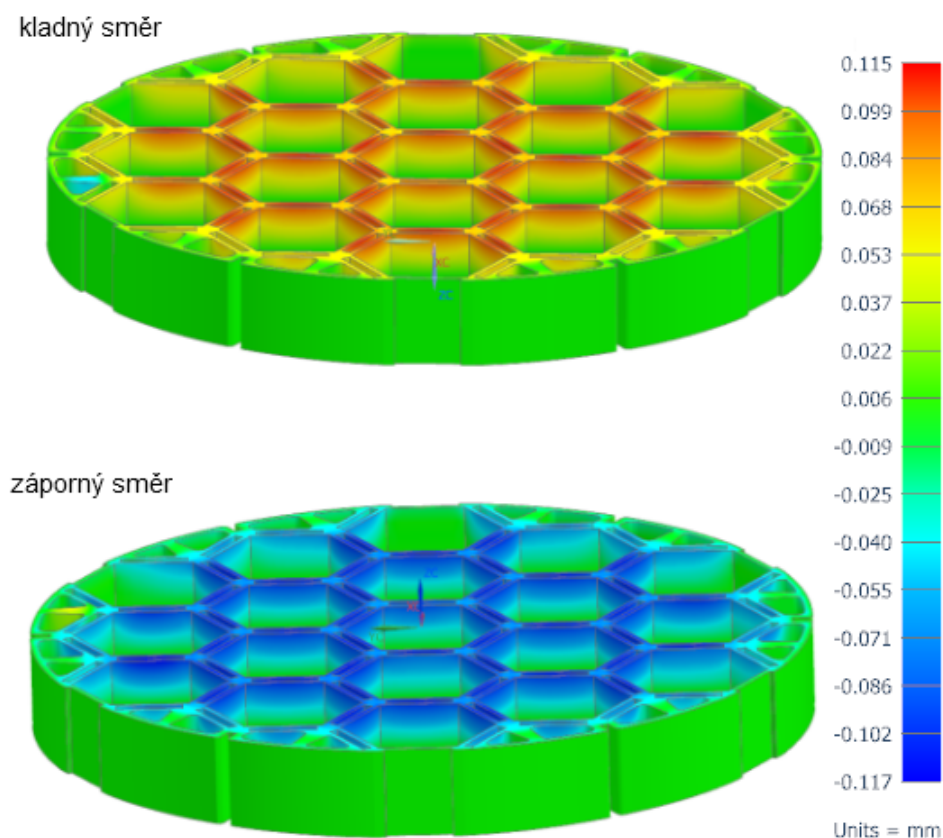


Obrázek 4.20: Zvýrazněné deformace vůči nedeformovanému koši (M 10:1)



Obrázek 4.21: Zvýrazněné deformace koše (M 50:1)

Deformace v ose Z je znázorněna na obrázku 4.22. Lze vyčíst, že deformace v tomto směru probíhá symetricky a má přibližně stejnou hodnotu v obou směrech. Celkovou teplotní dilataci ve vertikálním směru můžeme vyčíslit přibližně na 0,23 mm. Vzhledem k lineárnímu průběhu deformace ve směru Z můžeme tuto hodnotu zobecnit na různé délky koše. Například na koši CASTORu 440/84M by při jeho délce 3 300 mm vznikla deformace ve vertikálním směru přibližně 7,656 mm.



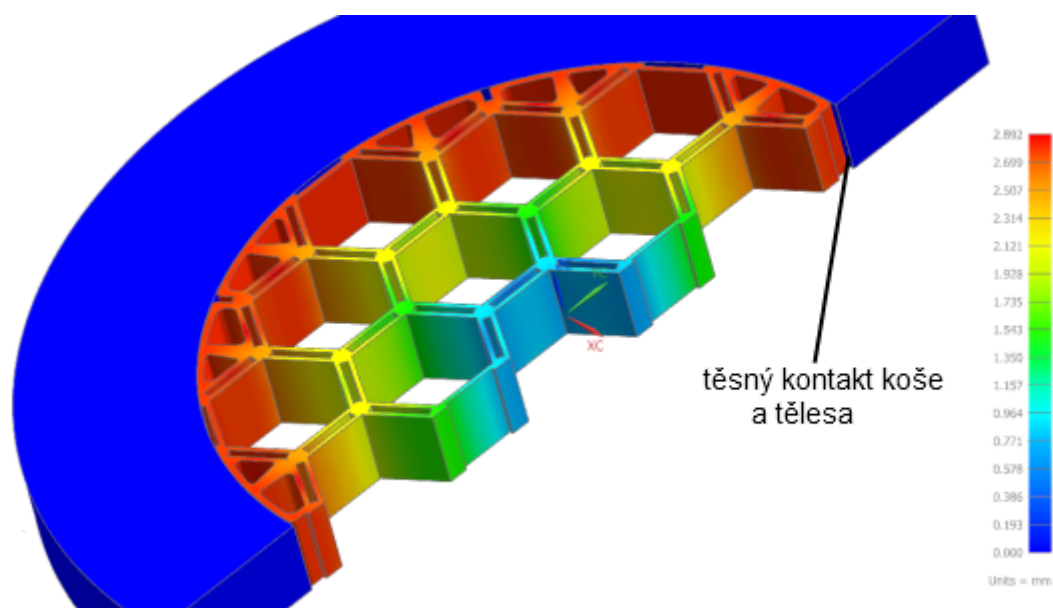
Obrázek 4.22: Deformace ve směru osy Z

Deformace koše	Maximální def. na poloměru [mm]	Max. def. celkem [mm]
Radiální směr	0,587	1,174 mm na průměru koše
Vertikální směr Z	-	0,232 mm na výšce modelu

Tabulka 4.3: Vypočtené deformace koše

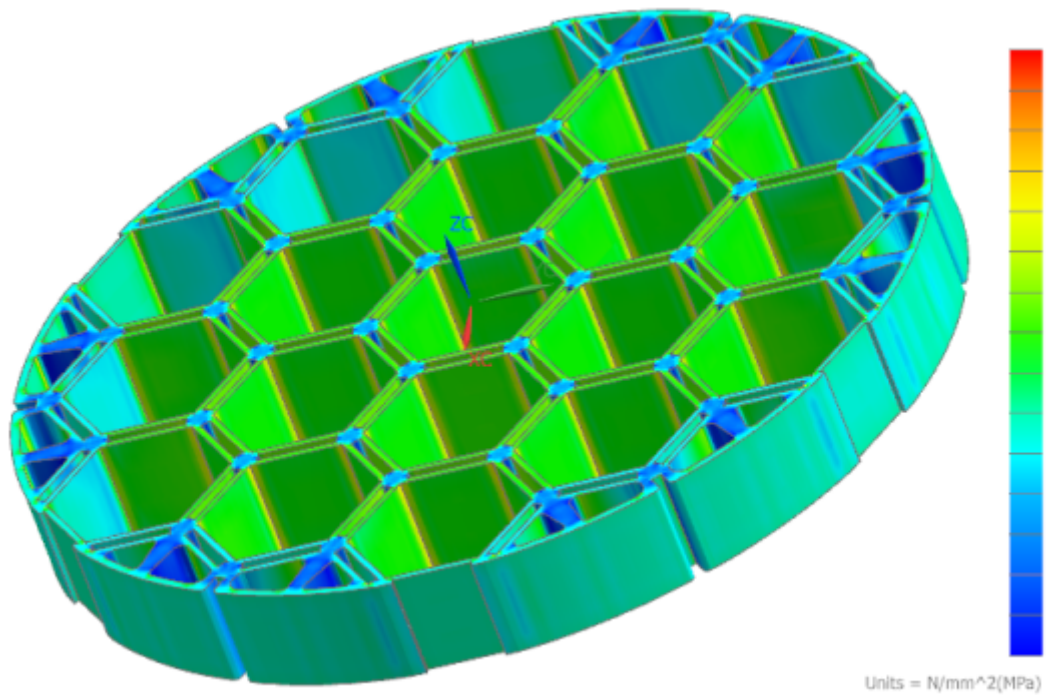
Při strukturální analýze *koše* na základě zatížení vypočteným teplotním polem nedošlo k takové deformaci, aby *koš* změnil rozměry natolik, aby se dotkl vnitřní stěny *tělesa* kontejneru. Simulován je však hypotetický případ, kdy je předpokládáno, že by k tomuto jevu došlo. Tohoto stavu bylo dosaženo tak, že *koši* byla zadána podmínka deformace v radiálním směru o vzdálenost větší než 2,82 mm, která odpovídá mezeře mezi komponenty. V momentě nárazu však další deformace není dovolena a roste napětí v konstrukci *koše*. Vzhledem k hypotetickému případu, kdy není známa definitivní hodnota dilatace, není možné vyčíslovat výsledky napětí. Rozložení napětí v konstrukci by však mělo odpovídat, ať již na jakékoliv hodnotě. Z tohoto důvodu ve výsledcích nejsou uváděna konkrétní napětí, pouze barevné odlišení jejich poměrů na konstrukci.

Na obrázku 4.23 vidíme deformaci *koše* při hypotetickém případě dilatace. Hodnota deformace dosahuje na poloměru 2,892 mm.



Obrázek 4.23: Nucená deformace koše pro hypotetický případ

O distribuci napětí v konstrukci při tomto hypotetickém případě si můžeme učinit představu na základě isoploch na obrázku 4.24. Na obrázku vidíme největší namáhání na hranicích buněk, menší po okrajích, kde jsou rozměry konstrukce distančních částí *koše* robustnější. Ostré hrany ve zlomech však působí jako koncentrátoři napětí.



!pouze pro ilustraci rozložení napětí, vyčíslení by pozbývalo smyslu!

Obrázek 4.24: Hypotetické rozložení napětí v konstrukci koše při zamezení posuvu

4.6 Hodnocení a diskuse výsledků

Výpočet termální analýzy byl proveden pomocí metody konečných prvků v modulu NX Thermal systému NX 9.0. Strukturální analýza byla zpracována v modulu NX NASTRAN, který je také součástí systému NX. Obě úlohy byly stacionární. Model střední části obalového souboru CASTOR 440/84 byl diskretizován 20-uzlovými šestistěnnými prvky typu SOLID o rozměru 4 mm. Výpočtové sítě pro obě řešení byly realizovány pomocí stejných elementů. Teplotní pole bylo řešeno na celém modelu, který se skládá ze 4 komponent: *koš*, *hélium*, *těleso* a *vzduch*. Přenos tepla byl realizován vedením. Získané výsledky teplotního pole vybraných komponent (*koš*, *těleso*) byly zadány jako zatížení pro strukturální analýzu. Numerické výpočty byly prováděny na standardním PC s 3GB RAM, dvoujádrovým procesorem o taktovací frekvenci 2,4GHz.

Výsledky termální analýzy jsou zobrazeny v sekci 4.5.1 na isomapách, a to buď u některých komponent modelu, nebo na konkrétních jednotlivě. Pro výpočet bylo

zadáno známé teplotní zatížení komponent *koš* a *vzduch*. Na *vzduch* byla teplota zadána v distanci od vnější stěny tělesa kontejneru proto, aby mohla být teplotou na vnější stěně ovlivněna i vrstva vzduchu. Změny teplot na *koši* byly indikovány především v místech distančních částí na periferiích, které nejsou zevnitř vyhřívány vloženými kazetami na zadanou teplotu. Centrální část *koše* s buňkami byla prohřátá celá na zadanou teplotu.

Získané teplotní pole bylo importováno do zatěžujících podmínek při strukturální analýze, která na jeho základě vyhodnotila změny rozměrů *koše* při zadaných fyzikálních omezeních deformací. Komponentu *těleso* byly zadány okrajové podmínky nulového posuvu ve všech osách, protože řešenou částí byl pouze *koš*. Ze dvou možných situací, kdy *koš* mohl, anebo nemusel, svým teplotním roztažením narazit do pevného *tělesa* kontejneru, nastala druhá možnost a *koš* nedosáhl stěny *tělesa*. Maximálně se *koš* na maximálním průměru 850 mm roztáhl o 1,174 mm. Předpokládaná symetrie dilatací po obvodu *koše* byla dodržena s malými odchylkami, které lze přičíst nedokonalostem poměrně jemné sítě. Maximální chyba na protilehlých bodech *koše* činí 0,02 mm, procentuálně vyjádřená chyba, která počítá i s kumulací chyb v teplotním poli, symetrie výsledků dilatací tedy činí 1,7 %. Výsledky strukturální analýzy jsou v části 4.5.2 na izomapách se škálou hodnot. Veškeré obrázky výsledků jsou v plné velikosti přiloženy na CD, protože komprimace do velikosti textu ubírá snímkům na přehlednosti.

Deformace *koše* ve vertikálním směru Z proběhla dle předpokladů souměrně v kladném a záporném směru a činí 0,232 mm na výšce 100 mm, jak je patrné z obrázku 4.22. Tuto hodnotu lze použít pro přepočet na různé délky *koše* kvůli její teoreticky lineární závislosti na délce. Tato délka by však v praxi nesměla překročit hodnotu, nad níž je teplotní pole *koše* významně ovlivňováno odvodem tepla víkem a dnem, které v této práci nejsou řešeny. U *koše* CASTOR 440/84M by tato dilatace dosahovala 7,656 mm při délce *koše* 3 300 mm okolo kazet.

Nastíněn je také hypotetický případ, kdy by *koš* do *tělesa* kontejneru narazil. Tento případ je nastíněn bez reálných hodnot, protože *koši* bylo zadáno blíže nespecifikované prodloužení o více než 2,82 mm, což je délka mezery mezi *košem* a

vnitřní stěnou *tělesa*. V okamžiku nárazu se deformace *koše* zastavila a začalo narůstat napětí v jeho konstrukci. Na obrázku 4.24 je znázorněna ilustrace poměrů napěťových polí rozdělených na *koši*.

Celkový souhrn výsledků ukazuje tabulka 4.4.

komponent	Termální analýza		Strukturální analýza	
	Max. teplota [°C]	Min. teplota [°C]	Max. deformace na průměru [mm]	Vertikální směr Z [mm]
koš	300	274,1	1,174	0,232
těleso kontejneru	90,14 na vnitřní stěně	55,0 na vnější stěně	-	-

Tabulka 4.4: Souhrn výsledků

5 Závěr

V práci jsou nastíněny všechny tři fáze palivového cyklu. Činná část palivového cyklu pojednává o problematice těžby, zpracování a přípravy uranu do podoby využitelné v energetických jaderných reaktorech. Kapitoly o činné a zadní části jsou cíleny na zařízení používaná v jaderných elektrárnách v ČR a na konkrétní zadání diplomové práce. V činné části jsou zmíněny základy z teorie štěpné reakce. Na ni navazuje popis konstrukce palivových kazet ETE a EDU. Zadní část palivového cyklu je namířena především na suché skladování vyhořelého paliva a s ním související popis konstrukce obalového souboru CASTOR 440/84M.

Rešeršní základ pro řešení samotného zadání diplomové práce je rozšířen v kapitole 3 o potřebné teoretické základy pro výpočet. Samotným řešením a postupem výpočtu se zabývá kapitola 4, v níž je podrobně popsána tvorba modelu, použitý software a jeho charakteristiky, nastavení řešičů, materiálové charakteristiky modelů, okrajové podmínky a nakonec jsou čtenáři předloženy výsledky jednotlivých numerických výpočtů a jejich hodnocení. V hodnocení jsou vyznačeny požadované nejvyšší teploty koše formou izomap se škálami. Dilatace koše jsou zobrazeny stejným způsobem.

Zadání práce je částí původního zadání od společnosti Škoda JS, které nakonec prošlo mnohými změnami a úpravami a rozdělilo se nakonec do více různých zadání. Omezena byla také participace společnosti na vedení diplomové práce, čímž byl znemožněn přístup k interním dokumentům společnosti o obalových souborech. Výpočtový model tedy konstrukcí a rozměry není shodný se zadaným kontejnerem CASTOR pro palivové soubory VVER 440, avšak jsou zachována funkční uspořádání a částečně použité materiály.

V zadání je provedeno mnoho zjednodušení reálného stavu, kdy jsou například plyny považovány za pevné materiály a součinitele vedení tepla jsou považovány za konstantní. Pro tuto úlohu by patrně bylo vhodnější modelování přestupů tepla konvekcí do okolního vzduchu a případně do vnitřní náplně inertního plynu. To by

umožnilo zadání zbytkových výkonů a jejich odvod. Toto by však vyžadovalo řešení nestacionární úlohy vedení tepla, což by při použití běžného PC značně zkomplikovalo časovou náročnost úlohy.

Změnou vůči zadání práce je i volba softwaru, jelikož v řešiči CFD FLUENT není řešení strukturálních úloh možné. Použit byl systém NX 9.0, který ve své nadstavbě obsahuje množství modulů pro řešení úloh. Podstatnou částí práce bylo seznámení se softwarem, který, ač uživatelsky poměrně přívětivý, je složitým systémem.

6 Seznam použité literatury

Publikace

- [1] BEČVÁŘ, J. a kol.: Jaderné elektrárny, SNTL Praha, 1981
- [2] ŠORIN, S. N. Sdílení tepla. SNTL, 1968
- [3] BEJAN, Adrian, et al. Heat transfer handbook. 2003
- [4] TESAŘ F., Odvod tepla a vývin tepla vyhořelého jaderného paliva v úložištích, Diplomová práce 2011, Masarykova univerzita, Fakulta pedagogická
- [5] ŠTAMBERG, K. Technologie jaderných paliv I. Praha: ČVUT, 1994. ISBN 80-01-01168-2
- [6] KOLAT, P. Úvod do jaderné energetiky, skriptum, e-learning, VŠB, 2012 dostupné na www1.vsb.cz/ke/vyuka/JE/JE%20fin.%202012.pdf
- [7] GLASSTONE, S. - EDLUND, M.C.: Základy teorie jaderných reaktorů, SNTL, Praha, 1959
- [8] WAGNER, K. Regulace jaderných reaktorů, skriptum, ZČU, Plzeň, 2010
- [9] SAMOILOV, O. B., KAIDALOV, V. B., FALKOV, A. A., BOLNOV, V. A., MOROZKIN, O. N., MOLCHANOV, V. L., & UGRYUMOV, A. V. (listopad 2010). TVSA-T fuel assembly for “Temelin” NPP. Main results of design and safety analyses. Trends of development. In Paper for the international conference “VVER-2010, Experience and Perspectives.
- [10] ŠIŠTÍK, L., ONČÁK, M., SLAVÍČEK, P., VŠCHT, Stručný úvod do teoretické a počítačové chemie, Příručka teoretické chemie, e-learning, VŠCHT, dostupné na www.vscht.cz/fch/cz/pomucky/Prirucka_TeorChem.pdf
- [11] MARKELOV, V. A., NOVIKOV, V. V., NIKULINA, A. V., KON'KOV, V. F., SABLIN, M. N., SHICHOV, V. N., ... & KOBLYANSKY, J. P. (září 2005). Application of E635 alloy as Structural Components of VVER–1000 Fuel Assemblies. In 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON WWER FUEL PERFORMANCE, MODELLING AND EXPERIMENTAL SUPPORT (pp. 19-23).

- [12] HEGYI, G., MARÁČZY, C., HORDÓSY, G., TEMESVÁRI, E. (září 2011) Calculations of a Postulated Stylized Small Region of a VVER-1000 Core by KARATE code system and MCNP, 20th INTERNATIONAL CONFERENCE NUCLEAR ENERGY FOR NEW EUROPE 2011 příspěvek, dostupné na www.djs.si/proc/nene2011/pdf/301.pdf
- [20] ZDEBOR, J., Podpurne materially pro studim predmetu KKE/JEP
- [23] GAGARINSKIY, A. A., & SAPRYKIN, V. V. Contemporary and prospective fuel cycles for vver-440 based on new assemblies with higher uranium capacity and higher average fuel enrichment. (RRC Kurchatov Institute) dostupné na <http://library.sinap.ac.cn/db/yuanjian201102/%25E5%2585%25A8%25E6%2596%2587/41035581.pdf>
- [25] OECD/NEA, Scientific Issues in Fuel Behavior, OECD documents, Jan. 1995 dostupné na <https://www.oecd-nea.org/science/docs/pubs/nea0213-fuel.pdf>
- [26] LAHS, W. R. (1987). Transporting Spent Fuel: Protection Provided Against Severe Highway and Railroad Accidents., U.S. Nuclear Regulatory Commission, March 1987
- [27] THOMAS, F., GNS Activities – Solutions for Russian Spent Fuel, Bulgarian nuclear energy – national, regional a and world energy safety conference – June 09-11 2010, Varna
- [28] CEKAN, P., Návrh koše kontejneru typu Castor pro palivo reaktoru typu VVER 1000, diplomová práce, FST ZČU Plzeň, 2013
- [31] LINHART, J. (2006). Mechanika tekutin I. Západočeská univerzita v Plzni
- [32] KITTEL, C. (1985). Úvod do fyziky pevných látek. Academia
- [33] ЧИРКИН В.С., Теплофизические свойства материалов ядерной техники, Atomizdat, Moskva 1968
- [34] NX Advanced Simulation User Guide
- [35] NX NASTRAN User Guide

Internetové zdroje

- [13] <http://www.urenc.com/page/24/SWU.aspx>
- [14] <http://fyzmatik.pise.cz/802-obohacovani-jaderneho-paliva.html>
- [15] <http://www.urenc.com/page/24/SWU.aspx>
- [16] <http://atominfo.cz>
- [17] <http://www.minerally.org>
- [18] <http://web.ead.anl.gov/uranium/index.cfm>
- [19] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Louzeni>
- [21] <http://www.sujb.cz>
- [22] <http://www.azom.com>
- [24] <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/>
- [29] <http://atominfo.cz/2013/08/americke-uloziste-jaderneho-odpadu-wipp-bylo-rozsireno/>
- [30] <http://www.jaderny-odpad.cz>

7 Seznam příloh

Příloha 1 - Výkres výpočtového modelu (volně vložené)

Příloha 2 - Snímky výsledků numerických výpočtů (na přiloženém CD)

