



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

STUDIUM TEPELNÝCH A FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ SKLADOVACÍCH KONTEJNERŮ PRO POUŽITÉ JADERNÉ PALIVO

SPENT FUEL STORAGE CASKS THERMAL AND PHYSICAL PROPERTIES INVESTIGATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. PAVEL HLATKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. HUGO ŠEN

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Pavel Hlatký

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Studium tepelných a fyzikálních vlastností skladovacích kontejnerů pro použité jaderné palivo

v anglickém jazyce:

Spent fuel storage casks thermal and physical properties investigation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Studujte vlastnosti skladovacích a transportních kontejnerů pro použité jaderné palivo z tlakovodních jaderných reaktorů, zejména s ohledem na vnitřní stavbu kontejneru. Studujte vliv použité mříže na teplofyzikální charakteristiky uvnitř kontejneru. Proved'te výpočet určených profilů teplotního pole reálného kontejneru z dat získaných z JE Dukovany. Diskutujte výsledky, proved'te obecnou odbornou rešerši problematiky a studujte materiálové problémy skladovacích kontejnerů. Použijte výpočetní nástroje dostupné na OEI EÚ, zejména ANSYS, MAPLE, MATLAB apod.

Cíle diplomové práce:

- Zpracovat rešerši problematiky skladovacích kontejnerů se zaměřením na použité materiály vnitřních vestaveb.
- Vytvořit model vnitřní části kontejneru pro účely výpočtu tepelného a fyzikálního výpočtu.
- Analyzovat vliv materiálového a konstrukčního řešení mříže vnitřní vestavby na teplotní profily uvnitř kontejneru.
- Diskutovat výsledky a dát je do souvislosti z provozními zkušenostmi na EDU.

Seznam odborné literatury:

- Materiály IAEA
- Materiály SÚJB
- Materiály ŠKODA JS,a.s.
- Materiály ČEZ, a.s.
- výzkumné zprávy a diplomové práce FJFI

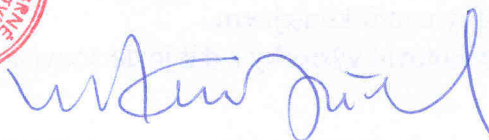
Vedoucí diplomové práce: Ing. Hugo Šen

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 4.10.2010



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou v oblasti tepelných a fyzikálních vlastností skladovacích kontejnerů pro použité jaderné palivo. Nedílnou součástí je matematický aparát potřebný pro popis teplotního pole. V další části práce je uvedeno výpočtové řešení, které je rozděleno do dvou skupin. První se zabývá zjednodušeným modelem řešeným analyticky, druhá, a to komplexnější metoda, řeší celý problém numericky.

ABSTRACT

This work deals with questions of spent fuel storage casks thermal and physical properties investigation. Foundations of mathematics which are necessary for describing field of temperature are included. The work itself contains calculation methods which are split into two parts. The first one deals with simplified analytic solution and the second part solves the whole problem by the numerical computation.

Klíčová slova

Přenos tepla, použití jaderné palivo, skladovací kontejner.

Key words

Heat transfer, spent nuclear fuel, storage cask.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HLATKÝ, P. *Studium tepelných a fyzikálních vlastností skladovacích kontejnerů pro použité jaderné palivo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 95 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Hugo Šen.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma „Studium tepelných a fyzikálních vlastností skladovacích kontejnerů pro použité jaderné palivo“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

27. května 2011

.....

Bc. Pavel Hlatký

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Hugovi Šenovi, vedoucímu diplomové práce, za odborné vedení, rady při návrhu geometrie modelu, jeho řešení a poskytnutou pomoc při zpracování této práce.

Také bych velmi rád poděkoval Ing. Karlu Katovskému, Ph. D. za poskytnuté rady, za vstřícné pozvání do místa jeho pracoviště a za zprostředkování kontaktu s lidmi, kteří se zabývají v praxi tématem mé diplomové práce.

A z celého srdce děkuji své krásné přítelkyni Ivaně za podporu, která mi byla vyjádřena, při tvorbě nejen této závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD	15
1 JADERNÁ PALIVA	16
1.1 PALIVA NACHÁZEJÍCÍ SE V PŘÍRODĚ	16
1.1.1 URAN	16
1.1.2 THORIUM.....	17
1.2 PALIVA UMĚLE PŘIPRAVENÁ	18
1.2.1 PLUTONIUM A URAN 233.....	18
2 OBOHACOVÁNÍ JADERNÉHO PALIVA	20
2.1 METODY OBOHACOVÁNÍ.....	20
2.1.1 PLYNNÁ DIFÚZE	21
2.1.2 ODSTŘEŽOVACÍ METODA	21
2.1.3 LASEROVÁ IONIZACE	23
2.1.4 ELEKTROMAGNETICKÁ A DÝZOVÁ SEPARACE.....	23
3 PALIVOVÝ CYKLUS	24
3.1 PŘEDNÍ ČÁST PALIVOVÉHO CYKLU.....	24
3.2 ČINNÁ ČÁST PALIVOVÉHO CYKLU	24
3.3 ZADNÍ ČÁST PALIVOVÉHO CYKLU	24
4 PŘEPRACOVÁNÍ	27
4.1 PALIVO MOX	27
5 MOŽNOSTI SKLADOVÁNÍ VYHOŘELÉHO (POUŽITÉHO) JADERNÉHO PALIVA	28
5.1 ZÁKLADNÍ ZPŮSOBY MEZISKLADOVÁNÍ VYHOŘELÉHO PALIVA	29
5.1.1 SUCHÁ METODA.....	29
5.1.2 MOKRÁ METODA.....	31
5.2 SKLADOVÁNÍ POUŽITÉHO JADERNÉHO PALIVA V ČR	32
5.2.1 VÝVOJ NA ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY.....	33
5.2.2 VÝVOJ NA ELEKTRÁRNĚ TEMELÍN.....	37
5.3 MEZISKLADOVÁNÍ POUŽITÉHO JADERNÉHO PALIVA V ZAHRANIČÍ.....	40
5.3.1 MAĎARSKÁ REPUBLIKA.....	40
5.3.2 SLOVENSKÁ REPUBLIKA	41
5.3.3 UKRAJINA – UKLÁDÁNÍ JADERNÉHO PALIVA V LOKALITĚ ČERNOBYL	43

6	ZÁKLADY TEORIE TEPELNÉHO VÝPOČTU	45
6.1	FOURIERŮV ZÁKON	45
6.2	ZJEDNODUŠENÁ DIFERENCIÁLNÍ ROVNICE ENERGIE	46
6.3	TEORIE PŘENOSU TEPLA	49
6.3.1	TEPLOTNÍ PROFIL VE VÁLCOVÉ STĚNĚ.....	49
7	VÝPOČTOVÝ MODEL	55
7.1	ANALYTICKÁ VÝPOČTOVÁ ÚLOHA.....	58
7.2	NUMERICKÁ VÝPOČTOVÁ ÚLOHA.....	63
8	VARIANTY NUMERICKÉHO ŘEŠENÍ	69
8.1	MĚĎ A MĚĎENÉ SLITINY	70
8.2	HLINÍK A HLINÍKOVÉ SLITINY	74
8.3	UHLÍKOVÁ A NEREZOVÁ OCEL.....	78
	ZÁVĚR.....	80
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	83
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	87
	SEZNAM TABULEK	88
	SEZNAM OBRÁZKŮ	89
	SEZNAM GRAFŮ	91
	SEZNAM PŘÍLOH.....	92
	PŘÍLOHY	93

ÚVOD

Jaderná energie představuje pro dnešní svět a jeho populaci nezadržitelně se blížící počtu sedmi miliard lidí velkou šanci, jak z podstatné části zabezpečit vlastní energetické potřeby. Množství energie vzniklé z hmotnostní jednotky v případě jaderného štěpení je totiž o několik řádů vyšší, než energie uvolněná při spalování klasických fosilních paliv.

Před více než šedesáti lety byl objev štěpení atomu přivítán s velkým nadšením, které krátce na to vystřídaly obavy z jaderných zbraní či možného zneužití teroristickými skupinami. Tyto jistě oprávněné obavy trvají dodnes, a proto i z těchto důvodů je bezpodmínečně nutné zajistit řádnou kontrolu jaderného paliva během celého palivového cyklu.

V současné době je převážná většina použitého jaderného paliva ukládána do hermeticky uzavřených schránek k tomu určených - tzv. kontejnerů a ponechána v meziskladech. Přeprocessing použitého paliva se ukazuje z dnešního ekonomického pohledu stále nevýhodné. Drahé, energeticky i časově náročné technologie zvládají pouze některé vyspělé státy jako Francie, Japonsko, Rusko a Velká Británie. V letošním roce Čína oznámila po čtyřiaadvaceti letech vývoje zvládnutí této technologie také, zatímco v USA a Německu bylo přeprocessing před lety zakázáno díky obavám z možného zneužití.

Zkušenosti však ukazují, že použité palivo bude s rostoucí cenou uranu a jiných štěpitelných materiálů stále výhodnější recyklovat. V příštích desítkách či stovkách let to lze dokonce považovat za nutnost, jelikož těžitelné zásoby těchto materiálů jsou omezené. V současných reaktorech jsme schopni využít sotva pět procent energie obsažené v palivu, proto lze se vzrůstajícími náklady na těžbu očekávat první komerční projekty rychlých reaktorů, které budou schopny plně využít potenciál jaderného štěpení.

Do příchodu této ekonomicky a technologicky vyzrálé doby je však nutné použité palivo skladovat bezpečným způsobem. To znamená zabezpečit jak podkritičnost soustavy, aby nemohlo dojít k rozvoji samovolné štěpné reakce, tak odvod zbytkového tepla a zároveň i radiační stínění, které chrání před vlivy ionizujícího záření. K tomuto účelu slouží skladovací kontejnery, jež jsou jedny z nejvíce testovaných technických aplikací ve světě vůbec.

1 JADERNÁ PALIVA

Palivový materiál jaderných reaktorů lze rozdělit na primární – vyskytující se v přírodě a sekundární – vznikající při provozu v aktivní zóně. Jisté procento umělých paliv se tvoří při provozu každého reaktoru a také se částečně spotřebovává.

1.1 PALIVA NACHÁZEJÍCÍ SE V PŘÍRODĚ

1.1.1 URAN

Uran je radioaktivní kovový prvek patřící mezi aktinoidy. V roce 1789 jej objevil Martin Heinrich Klaproth, v čisté formě jej izoloval roku 1841 Eugene Melchior Peligot a za radioaktivní jej označil Henri Becquerel roku 1896.

Přírodní uran se vyskytuje v uranových rudách, v České republice (např. ve smolinci) dříve těžených v Jáchymově, Příbrami i jiných lokalitách. V současnosti je získáván těžbou pouze v Dolní Rožínce. Dalšími zdroji jsou uranové břidlice, jíly a uhlí. Velmi opomíjeným zdrojem je mořská voda, která obsahuje přibližně $4 \cdot 10^9$ tun uranu, ale dosud se průmyslově nevyužívá. V zemské kůře je prvek hojně rozšířen po celém světě, celkové zásoby ve svrchních vrstvách se odhadují na 10^{15} tun, což je přibližně tisíckrát více jak zlata. Jeden kilogram zemského povrchu obsahuje průměrně 3 mg uranu. [1]

Uran se vyskytuje v přírodě jako směs tří izotopů:

- U238 99,280 %
- U235 0,715 %
- U234 0,005 %

V čistém stavu má stříbrobílou barvu, na vzduchu se pozvolna pokrývá vrstvou oxidů. Lze jej za běžné teploty kovat či válcovat, vzhledem k vysoké hustotě (19 g/cm^3) se využívá i v nejaderných aplikacích např. při vyvažování. Pro energetické účely je díky svým vlastnostem vhodnější keramický dioxid uranu UO_2 .

Obrázek 1 Minerál uranit [2]



1.1.2 THORIUM

Thorium je druhým členem z řady aktinoidů. Roku 1828 jej objevil Jöns Jacob Berzelius. Jedná se o radioaktivní kovový prvek, který díky velmi dlouhému poločasu rozpadu ($1,39 \cdot 10^{10}$ let) svých jader nacházíme v horninách zemské kůry. Je potenciálním palivem v jaderné energetice. Na vzduchu se pomalu pokrývá vrstvou šedého oxidu. Zahřátím na vzduchu vyniká riziko jeho vznícení.

V zemské kůře je poměrně silně zastoupeno v koncentraci okolo 10 mg/kg, v mořské vodě okolo 7 $\mu\text{g/l}$.

Thorium nachází budoucí využití v jaderné energetice, a to jako potenciální zdroj štěpného materiálu. Samo o sobě je $\text{Th}232$ pouze α -zářič, a proto se nemůže zapojit do spontánní štěpné reakce. Záchytem neutronu se ale může měnit na uran $\text{U}233$, jenž je vynikajícím jaderným palivem a také silným zdrojem neutronů. Myšlenka na jeho energetické využití je lákavá především kvůli tomu, že se v přírodě vyskytuje přibližně třikrát častěji nežli uran. Je přítomno v monazitových pískách a např. v minerálu euxenit. [1]

Thorium se vyskytuje v přírodě jako směs dvou izotopů:

- $\text{Th}232$ 99,99999999 %
- $\text{Th}228$ $1,35 \cdot 10^{-8}$ %

Výzkum v oblasti využití thoria je v současné době prováděn např. v Indii převážně z důvodu odhadu tamních největších světových zásob. Mezi další velká naleziště patří Brazílie, Kanada, USA či Egypt.

Obrázek 2 Monazit obsahující thorium [3]



1.2 PALIVA UMĚLE PŘIPRAVENÁ

Tato paliva vznikají samovolně záchytem neutronů na jádrech vybraných nuklidů, které se neštěpí. Nuklidy jsou již součástí primárního paliva – uranu v lehkovodních reaktorech nebo jsou záměrně přidávány do plodivé zóny v reaktorech rychlých.

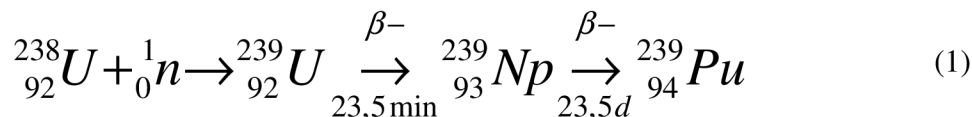
Mezi další uměle připravená paliva lze zařadit izotopy tzv. minoritních aktinidů, které vznikají štěpením primárního paliva. Jako příklad lze uvést americium, curium či neptunium. Tyto nuklidy se však jako případná paliva běžně nevyužívají.

1.2.1 PLUTONIUM A URAN 233

Plutonium je silně radioaktivní a toxický kovový prvek, uměle připravovaný v jaderných reaktorech. 23. února 1941 se uskutečnila izolace čistého kovu v Berkeley, a to bombardováním uranu jádrem deuteria v cyklotronu. Za autory je označován Glenn T. Seaborg, Edwin McMillan, J. W. Kennedy a A. C. Wahl.

Barva plutonia je stříbřitě bílá, která se působením vzdušného kyslíku mění na šedavou. Čistý kov je možné připravit redukcí fluoridu plutonia kovovým lithiem nebo baryem a to při teplotě cca 1200 °C.

Jak bylo zmíněno výše, plutonium patří mezi uměle připravené prvky, nicméně je možné se s ním v ultrastopovém množství setkat také v přírodě, a to v uranových rudách, kde mohou jednotlivé atomy vzniknout z U^{238} po záchytnu neutronu a následných dvou rozpadech β^- např. dle následující rovnice.

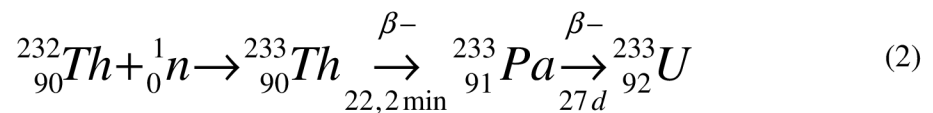


Každý z izotopů má svůj poločas rozpadu, nejdůležitější izotop $Pu239$ se rozpadá s poločasem 24 100 let, $Pu240$ 6500 let, $Pu241$ 14 roků, $Pu242$ 373 000 let a $Pu238$ má poločas rozpadu 88 let. Existuje ovšem celá řada dalších izotopů. Všechny uvedené izotopy jsou zářiče α , jen $Pu241$ je jako jediný zářič β . [4]

Obrázek 3 Plutonium [5]



Podobně jako v případě zachytu neutronu na jádru $U238$ a vzniku plutonia vzniká po zachytu z $Th232$ a následných dvou rozpadech β^- $U233$ dle rovnice uvedené níže.



Velkou výhodou použití thoria jako prvotního paliva je skutečnost, že produkty štěpení mají výrazně kratší poločasy rozpadů než v případě uranu.

2 OBOHACOVÁNÍ JADERNÉHO PALIVA

Poměr jednotlivých izotopů paliva má velký vliv na celkovou koncepci jaderné elektrárny. V případě uranu hovoříme o obohacování při zvyšování poměru U_{235} ku U_{238} .

Tento poměr je nutné zvýšit z důvodu dlouhodobého fungování tlakovodních reaktorů, u kterých probíhá výměna části paliva zpravidla kampaňovitě jedenkrát ročně. Protože je v těchto elektrárnách použita normální demineralizovaná lehká voda jako moderátor a zároveň i jako chladicí médium, vychází rozložení paliva do úzké palivové mříže. Použitím daného typu moderátoru se štěpí pouze U_{235} termálními neutrony. Při jeho přírodním obsahu 0,715 % by tak pravděpodobně nebylo možné štěpnou reakci rozběhnout a udržet, nemluvě o nutnosti určité roční zásoby paliva v reaktoru. Ten je totiž nutné kvůli každé výměně paliva vychladit, odtlakovat a poté teprve otevřít. Proto je nezbytné nejen v případě lehkovodních reaktorů palivo obohatit na 2 – 5 % U_{235} dle konkrétního projektu.

Koncepce fungující na přírodní uran byly navrženy a odzkoušeny, dlouhodobě se však prosadily pouze v případě kanadského Candu, kde tento typ pracuje s kontinuální výměnou paliva, která je realizovatelná právě díky použitému moderátoru a tím větší rozteči palivové mříže. Jako moderátor i chladivo zde slouží finančně nákladná těžká voda ve vzájemně oddělených pracovních komorách.

2.1 METODY OBOHACOVÁNÍ

Vzájemné oddělení izotopů jednoho prvku je obtížnou záležitostí. Chemicky jsou izotopy naprosto identické, a proto se dají oddělit pouze metodami založenými na fyzikálních principech využívajících rozdílných hmotností jader.

V případě uranu se vytěžená ruda mechanicky a chemicky upraví na dusičnan uranylu, příp. diuranát amonný nazývaný žlutý koláč. Ten obsahuje přibližně dvě třetiny uranu, dále se čistí a přeměňuje na fluoridy uranu UF_4 a UF_6 . Fluorid uranový (UF_6) lze za zvýšené teploty a tlaku snadno přeměnit do plynného skupenství, které je nejvhodnější pro oddělení různě těžkých izotopů. Plyn je poté vhnán do separačních kaskád. [9]

Způsoby obohacování jaderného paliva: plynná difúze, metoda odstředivací, metoda laserová, elektromagnetická a dýzová separace.

2.1.1 PLYNNÁ DIFÚZE

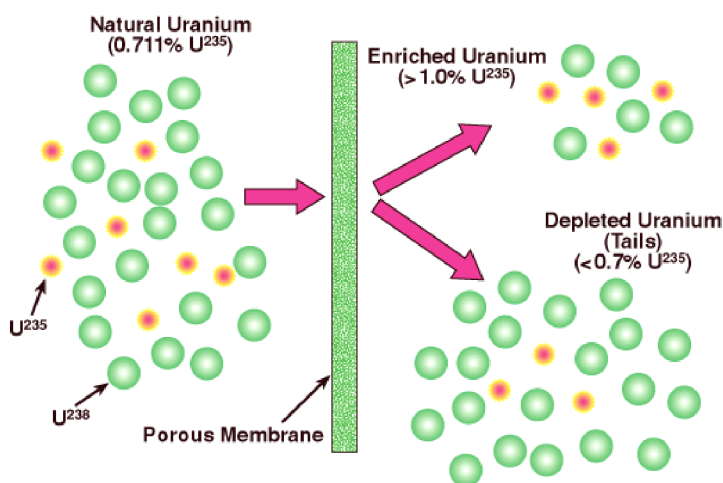
Plyn pod tlakem prochází porézní keramickou přepážkou, která více zpomaluje těžší atomy. Lehčí atomy jsou nepatrně rychlejší, a proto prochází snadněji. Rozměr póru přepážek je řádově 0,01 μm . Celý proces je nutno opakovat mnohokrát za sebou (stokrát až tisíckrát), aby bylo dosaženo potřebných koncentrací. Přitom je technologie velmi energeticky a časově náročná, plyn je třeba ohřívat a stlačovat kompresory.

Této metody bylo využito také ve 40. letech minulého století v americkém projektu Manhattan, který nakonec vedl k výrobě prvních atomových zbraní.

Obdobně lze teoreticky využít i kapalnou difúzi, platí zde podobné principy, avšak navržená technologie je mimořádně energeticky náročná, jelikož by bylo nutné ji provozovat za ještě vyšších teplot. Z těchto důvodů se průmyslově nevyužívá.

Obrázek 4 Porézní membrána [7]

Gaseous Diffusion Uranium Enrichment Process



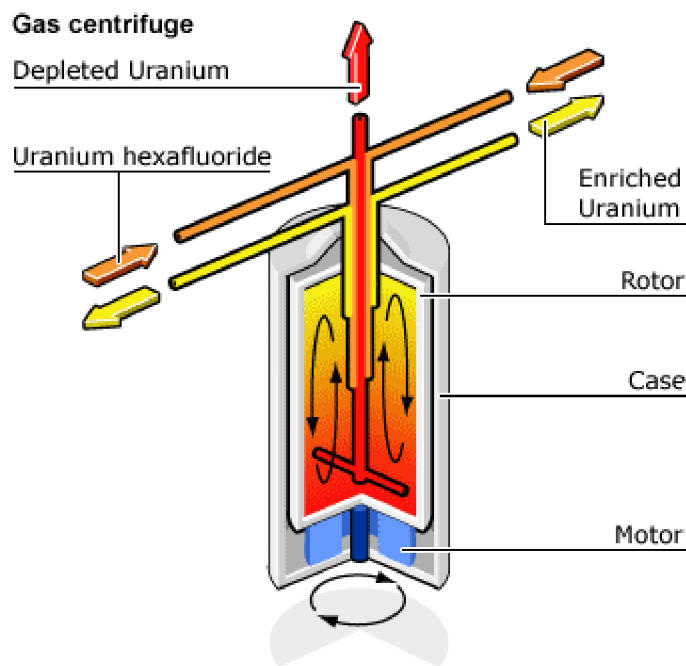
2.1.2 ODSTŘEĐOVACÍ METODA

V odstředivkách o vysokých otáčkách působí na molekuly plynu odstředivé síly, těžší molekuly se tak hromadí u vnější stěny, zatímco lehčí se shromažďují více u osy rotace. Tento způsob pracuje s podstatně menší spotřebou energie nežli difúzní metoda, účinnost je závislá především na otáčkách centrifugy. Tento systém byl zaveden v 70. letech, kdy se používaly rotačky s ocelovými lopatkami, a limit otáček byl dán rychlostí zvuku. Dnes se díky zavádění

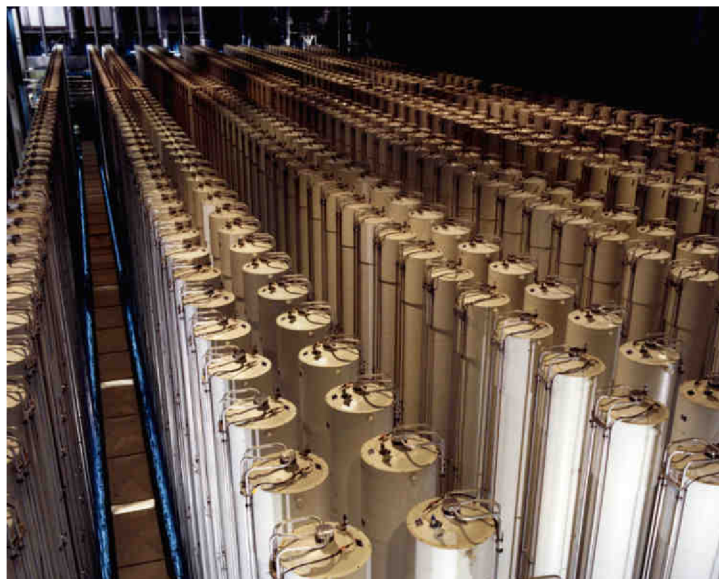
nových materiálů z uhlíkových vláken a případně kevlaru dá teoreticky dosáhnout rychlosti až 1100 m/s. [8]

Pro potřebné obohacení se použijí technologické celky s několika tisíci odstředivkami. Slučujeme je do stupňů paralelně – pro zvýšení produkce a do kaskád sériově – pro zvýšení stupně obohacení.

Obrázek 5 Centrifugální separace [9]



Obrázek 6 Paralelní zapojení odstředivek [7]

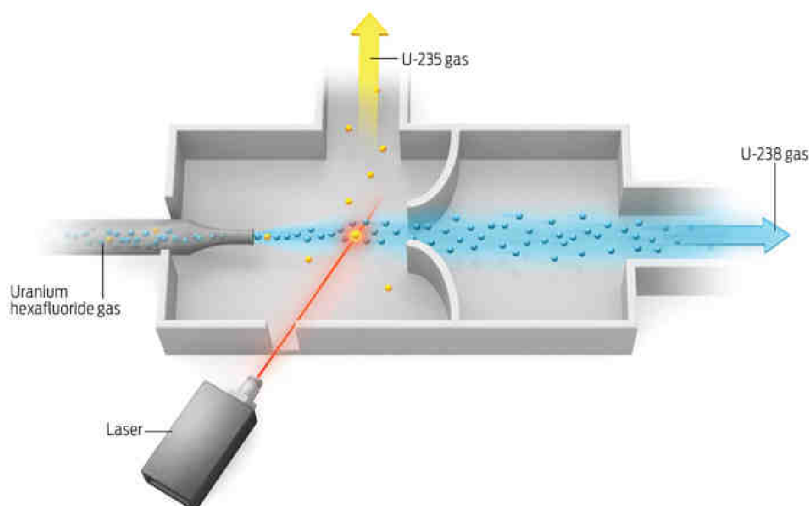


2.1.3 LASEROVÁ IONIZACE

Princip spočívá ve skutečnosti, že laser naladěný na konkrétní energetickou hladinu má schopnost excitovat pouze plynné atomy jednoho izotopu, zatímco ostatní zůstávají v původním stavu. Ionizované izotopy poté lze elektromagneticky nebo chemicky oddělit.

Vývoj zařízení byl zahájen v 70. letech, praktické zkoušky pro průmyslové využití byly ovšem uskutečněny až o třicet let později. Do budoucna se jeví tento způsob jako velice nadějný pro svou relativně nízkou energetickou náročnost, menší zastavěnou plochu zařízením a schopnost dosáhnout vyššího obohacení v porovnání s předchozími metodami. [10]

Obrázek 7 Fotoionizace [11]



2.1.4 ELEKTROMAGNETICKÁ A DÝZOVÁ SEPARACE

Jiné metody jako elektromagnetická separace či dýzová se příliš nepoužívají. První z nich má výborné separační schopnosti avšak účinnost je příliš nízká. Při porovnání s komerčně užívanými metodami vychází časově i energeticky náročnější na jednotku produkce. Dýzová metoda je ve stádiu počátečního výzkumu. Její nasazení se v nejbližší době neplánuje a ani ji nelze předpokládat.

3 PALIVOVÝ CYKLUS

Palivový cyklus představuje souhrn všech činností od těžby přírodních zdrojů, zpracování přes jejich energetické využití až po nakládání s použitým jaderným palivem.

Lze jej dělit na tři základní části:

- přední část (front-end),
- činnou část,
- zadní část (back-end).

3.1 PŘEDNÍ ČÁST PALIVOVÉHO CYKLU

Do přední části palivového cyklu v případě uranu spadá:

- těžba rudy,
- mechanická a chemická úprava na žlutý koláč,
- procesy rafinace a konverze na hexafluorid uranu,
- obohacování uranu,
- zpětná konverze na kovové nebo oxidické palivo, příp. přimíchání vyhořivacích absorbátorů,
- výroba kompletních palivových souborů.

3.2 ČINNÁ ČÁST PALIVOVÉHO CYKLU

Zahrnuje veškeré činnosti související s energetickým využitím paliva v jaderném reaktoru.

3.3 ZADNÍ ČÁST PALIVOVÉHO CYKLU

Týká se veškerých činností spojených s nakládáním použitého jaderného paliva po vyjmutí z jaderného reaktoru.

Dle způsobu nakládání s použitým jaderným palivem lze cyklus považovat za *otevřený* nebo *uzavřený*. Toto rozhodnutí je podstatné z hlediska budoucího fungování jaderné energetiky daného státu.

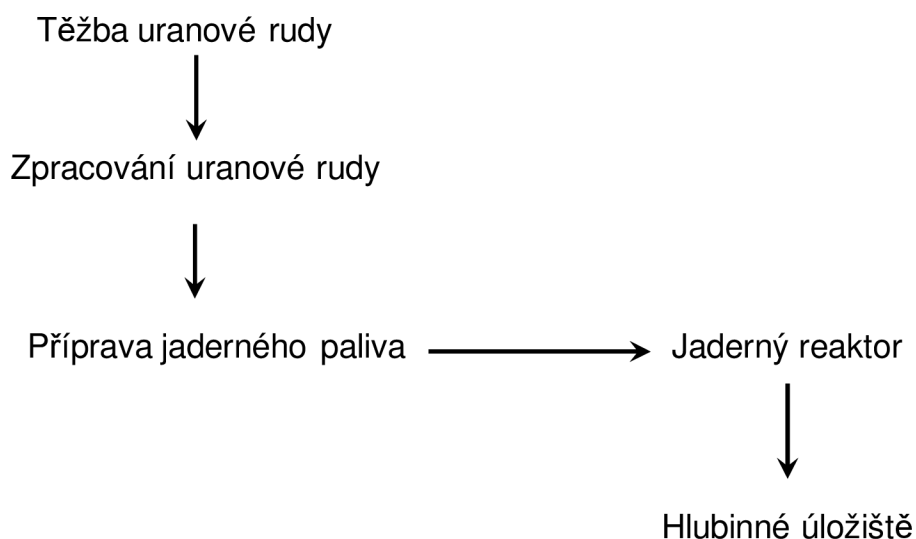
OTEVŘENÝ PALIVOVÝ CYKLUS

V případě otevřeného palivového cyklu se použité palivo dále nevyužívá jako energetický zdroj a již se nezpracovává. Po přibližně 6 letech strávených v reaktoru je přesunuto do bazénu vyhořelého paliva, kde chladne dalších cca 6 let. Poté se kazety s palivem přemísťují do obalových souborů (kontejnerů) pro skladování a přepravu, ve kterých dále chladnou a ztrácí svoji aktivitu před konečným uložením. Tyto kontejnery se nachází v meziskladech často umístěných na území jaderných elektráren.

Výše uvedený postup je momentálně aplikován u českých jaderných elektráren. Bude-li vybudováno hlubinné úložiště na území České republiky, palivové kazety stráví v kontejnerech odhadem 50 let, po této době je čeká přesun na místo úložiště. Následně se přeloží do příslušných úložných obalových souborů pro trvalé uložení a nakonec se transportují do podzemních komor.

Tento způsob zacházení s jaderným palivem je s přihlédnutím ke zbývajícimu energetickému obsahu nevhodný, avšak v současné době díky cenám primární suroviny (uranu) hojně využíváný.

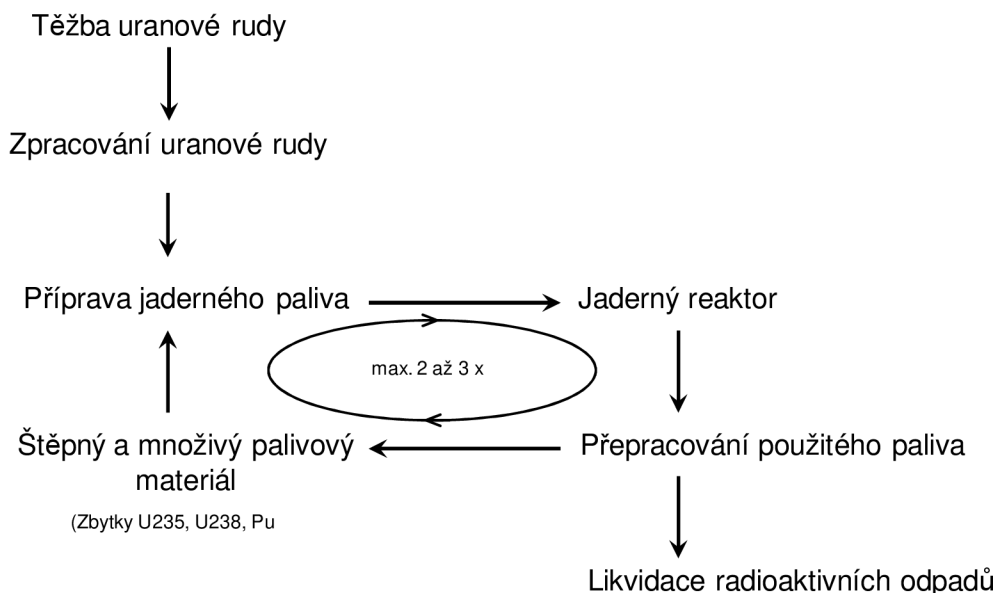
Obrázek 8 Schéma otevřeného palivového cyklu [5]



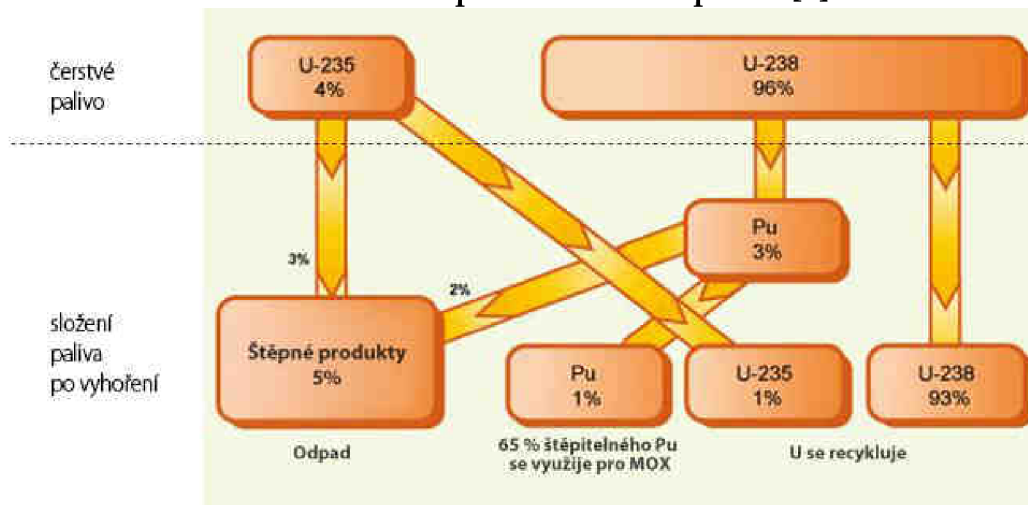
UZAVŘENÝ PALIVOVÝ CYKLUS

Je palivový cyklus, kdy je na použité palivo nahlíženo jako na zdroj další využitelné energie. K dosažení tohoto cíle je nutné palivo přepracovat, tj. oddělit využitelné štěpitelné materiály, které lze začlenit do výroby čerstvého paliva, od ostatních neštěpitelných zbytků – radioaktivních odpadů. Pouhým přepracováním lze snížit množství jaderných odpadů, které je třeba trvale uložit, na jednu třetinu. Procentuelní složení obohaceného paliva po vyjmutí z reaktoru je názorné na obrázku 10.

Obrázek 9 Schéma uzavřeného palivového cyklu [5]



Obrázek 10 Štěpení uranového paliva [4]



4 PŘEPRACOVÁNÍ

Přepracovat použité jaderné palivo umí jen některé vyspělé země s rozsáhlým jaderným programem. Smyslem přepracování je oddělit štěpitelné – dále využitelné materiály (uran a plutonium). Princip přepracování je znám již 70 let, přičemž původně byl vyvinutý pro vojenské účely. Výstupem měla být a také byla plutoniová nukleární zbraň svržena za druhé světové války na město Nagasaki v Japonsku.

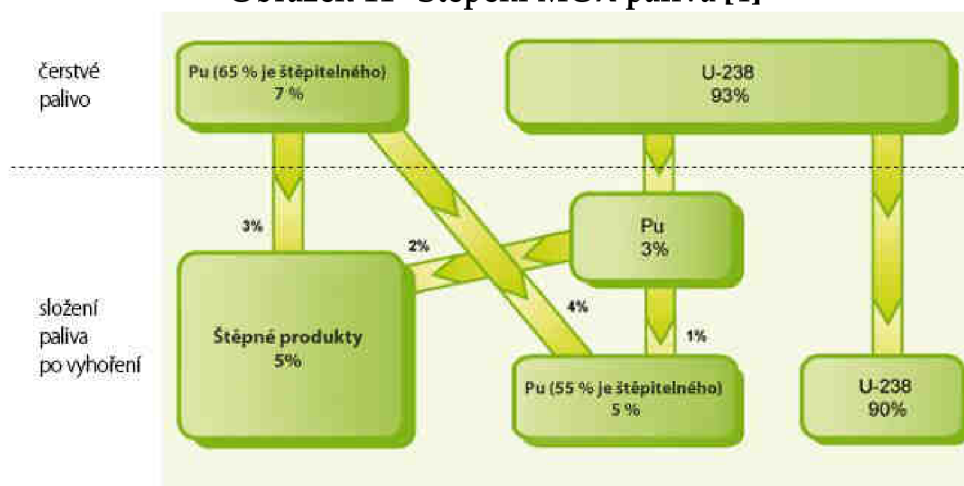
Tento způsob recyklace jaderných paliv je nezbytný v energetice s plánovanými rychlými reaktory a umožňuje energetickou soběstačnost pro následující tisíciletí.

4.1 PALIVO MOX¹

Je relativně nový typ paliva, který se skládá ze směsi UO_2 a PuO_2 . Je tedy produktem vzniklým přepracováním použitého paliva. MOX palivo je také možné vyrobit z hlavic nepoužitých jaderných zbraní, tudíž je zlikvidovat obecně přínosným způsobem. [4]

Celosvětově dnes MOX představuje přibližně 2 % nového paliva zaváženého do provozovaných reaktorů. Obvykle tvoří třetinu vsázky v aktivní zóně, je ale možný provoz i s nadpolovičním poměrem za současného použití většího počtu řídicích tyčí. 5% obohacení U^{235} je možné nahradit 7 % směsí plutonia získaného z vyhořelého paliva viz obrázek 11.

Obrázek 11 Štěpení MOX paliva [4]



¹ MOX – Mixed oxide fuel

5 MOŽNOSTI SKLADOVÁNÍ VYHOŘELÉHO (POUŽITÉHO) JADERNÉHO PALIVA

Jak již bylo zmiňováno v předchozí části, je nutné použité palivo lehkovodních reaktorů skladovat po vyjmutí z reaktoru po dobu 6 let v bazénu vyhořelého paliva. Tento časový úsek se může měnit v závislosti na vyhoření, to lze určit dle vzorce (3).

$$A_v = \frac{E_n}{M_p} \quad [\text{MWd/kg}] \quad (3)$$

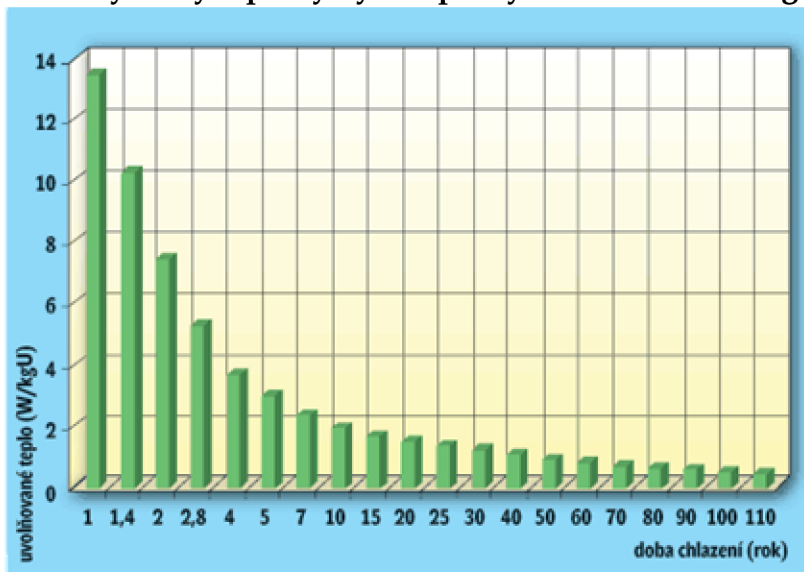
kde E_n energetická zásoba jaderného reaktoru [J]
 M_p množství paliva v aktivní zóně reaktoru [kg]

Dle použité formy paliva (popř. koncepce) určujeme hloubku vyhoření následovně:

- přírodní kovový uran 3 – 3,5 MWd/kg,
- obohacený uran (UO₂) 26 – 45 MWd/kg,
- vysokoteplotní reaktory 100 MWd/kg.

V současnosti existuje snaha zvyšovat hranici vyhoření u stávajících projektů, např. nové palivo pro VVER 440 původně plánované na vyhoření 28,6 MWd/kg se díky vyššímu obohacení dostává na hranici 45 MWd/kg (Dukovany).

Graf 1 Zbytkový tepelný výkon při vyhoření 50 MWd/kg [13]



Exponenciální závislost množství tepla uvolňovaného z použitého paliva v čase znázorňuje obrázek uvedený výše.

5.1 ZÁKLADNÍ ZPŮSOBY MEZISKLADOVÁNÍ VYHOŘELÉHO PALIVA

Používané postupy se liší způsobem odvodu zbytkového tepla – chladícím médiem.

5.1.1 SUCHÁ METODA

K odvádění zbytkového tepla, které vzniká především rozpadem štěpných produktů, slouží okolní vzduch, který přirozeně cirkuluje a ochlazuje povrch kontejneru. Jeho stěny mohou být buď hladké, nebo pro zvýšení přestupu tepla může být povrch žebrován (obrázek 12).

Obrázek 12 Rozdílná struktura povrchu u typů CONSTOR a CASTOR [19]



Na kontejnery jsou kladeny vysoké nároky, a proto jsou podrobovány četným zkouškám před uvedením do provozu. Musí splňovat tyto požadavky [14]:

- hermetická těsnost – bariéra zamezující úniku radioaktivních látek,
- stínění – omezuje ionizující záření na přijatelnou hodnotu,
- podkritičnost – konstrukce zamezuje za všech okolností rozvoji štěpné řetězové reakce,
- odvod tepla – zajišťuje stálost vlastností použitého materiálu a neměnné geometrické uspořádání,
- mechanická odolnost – omezuje závažné deformace při havarijních stavech.

Na tyto obalové soubory jsou kladeny velké nároky z hlediska nestandardních situací. Musí odolat pádu z několikametrové výšky, dočasnému teplotnímu zatížení při možném požáru nebo ponoření do hloubky 200 metrů, aniž by došlo k nesplnění některého z výše uvedených požadavků. Často jsou provedeny jako dvouúčelové - slouží zároveň jako přepravní boxy.

Extrémní testování kvality kontejnerů [1]

Ve Velké Británii byla provedena zkouška, při které dieselelektrická lokomotiva narazila rychlostí 160 km/hod na přepravní kontejner, který tento náraz vydržel, a nebyla zjištěna žádná netěsnost.

V Německu byl simulován pád letadla na skladovací kontejner, při kterém byl vystřelen rychlostí zvuku tunu vážící projektil délky 5 metrů do oblasti těsnícího víka. Kontejner zůstal těsný, zdeformováno bylo pouze vnější žebrování.

Kontejnery jsou skladovány ve větraných halách, zabetonovávány do jímek nebo umístěny samostatně na otevřené ploše. Standardní typy kontejnerů pro skladování suchou metodou jsou obvykle železobetonové či litinové konstrukce s případným zesílením potřebného stínění látkami s dobrými absorpčními vlastnostmi záření jako olovo, polyetylén aj.

Suchá metoda skladování se využívá např. v USA, kde jsou často kontejnery umístěny na volném prostranství, bez jakékoli ochrany před vnějšími vlivy (obrázek 13). Jedinou „bariérou“ oddělující území skladu je drátěný plot. Další země skladující suchou metodou jsou např. Kanada, Německo, Švýcarsko, Belgie, Švédsko, Velká Británie, Japonsko či Litva.

Obrázek 13 Betonové kontejnery - USA [27]



5.1.2 MOKRÁ METODA

Jedná se o nejpoužívanější způsob skladování použitého jaderného paliva. Jako chladicí médium je využívána obyčejná demineralizovaná voda. Palivo je skladováno v pouzdrech z nerezavějící oceli a ponořeno v hlubokých vodních nádržích. Tyto bazény mohou být situovány přímo u reaktoru v jednotlivých elektrárnách, nebo jak tomu bývá častěji v samostatných skladech vyhořelého paliva. [14] Voda obklopující palivo spolehlivě zajišťuje odvod zbytkového tepla, její vrstva k vodní hladině vykonává tak dobrou ochranu před zářením, že se personál může pohybovat podél bazénu bez jakýchkoli zdravotních rizik.

K nasazení této metody i pro dlouhodobé použití vedly mnohaleté zkušenosti s provozem bazénu pro dochlazování vyvezeného paliva z reaktoru. Toto řešení zajišťuje oproti suché metodě účinnější odvod tepla a dobrou možnost vizuální kontroly obalu paliva. Nevýhodná je stálá potřeba energie na chlazení vody ve výměnících a na čištění. Velké jsou také investiční náklady na výstavbu, protože musí být zabezpečena vysoká kvalita těsnosti bazénu z důvodu vzniku kapalných radioaktivních látek.

Tento způsob je rozšířen zejména v přímořských zemích, kde mezisklady leží v blízkosti pobřeží a přebytečná tepelná energie se tedy odvádí do moře. Jeho teplota ovšem není negativně ovlivňována a roste jen o zlomky °C. Dané metody se využívá ve Švédsku, Francii, Velké Británii, Rusku ale také na Slovensku.

5.2 SKLADOVÁNÍ POUŽITÉHO JADERNÉHO PALIVA V ČR

Do roku 1991 bylo použité jaderné palivo vyváženo mimo území České republiky na základě mezistátní smlouvy se Sovětským svazem. Po vzniku Ruské federace byl vývoz zakázán a bylo nutné najít způsob a místo pro jeho uložení. Situace byla zprvu řešena zvětšováním kapacity bazénu vyhořelého paliva u reaktorů, což poskytlo určitý časový interval k výběru, licencování a samotnému vybudování vlastních mezikladů. V České republice se nakládání s použitým jaderným palivem řídí zákonem č. 18/1997 Sb. ve znění pozdějších předpisů (tzv. atomový zákon). Bližší informace jsou obsaženy níže:

Převzato z [12].

„Vláda ČR schválila dne 15. 5. 2002 dokument nazvaný Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR. Nakládání s radioaktivními odpady v ČR bude probíhat podle dlouhodobé strategie. Vládní dokument předpokládá vybudování hlubinného úložiště“.

„Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) jakožto subjekt, který z pověření státu odpovídá za bezpečné ukládání radioaktivních odpadů na území ČR, koncepci velmi vítá. Koncepce je SÚRAO považována za stěžejní strategický dokument, který vytvoří základní rámec pro všechny činnosti, které SÚRAO vykonává. Povaha práce SÚRAO vyžaduje, aby existoval určitý dlouhodobý výhled, kterému by jednotlivé kroky nakládání s radioaktivními odpady byly podřízeny“.

„Koncepce doporučuje pokračovat v dosavadní praxi ukládání nízko a středně aktivních odpadů do stávajících přípovrchových úložišť (Richard u Litoměřic, Bratrství u Jáchymova a Dukovany) provozovaných SÚRAO“.

„Pro vysoceaktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo bude podle tohoto vládního dokumentu připravováno hlubinné úložiště, jehož zprovoznění se předpokládá kolem roku 2065. Až do té doby bude vyhořelé palivo z jaderných elektráren skladováno v transportně-skladovacích kontejnerech umístěných v samostatných skladech vybudovaných přímo v areálech obou jaderných elektráren“.

„Koncepce připomíná, že veškeré náklady na vyřazování jaderných zařízení a ukládání radioaktivních odpadů nesou provozovatelé těchto zařízení a původci radioaktivních odpadů. Stát prostřednictvím SÚRAO kontroluje a řídí tvorbu zdrojů vytvořených na speciálních vázaných účtech u bank či na jaderném účtu tak, aby byl zajištěn dostatek finančních prostředků na výše uvedené činnosti“.

„Koncepce dále říká, že bude dále sledován a podporován rozvoj nových technologií, které by v budoucnosti mohly umožnit využití vyhořelého jaderného paliva například v novém typu jaderných reaktorů“.

ČR tedy nyní využívá suchých metod skladování vyhořelého paliva v nadzemních skladech stojících v areálech jaderných elektráren Dukovany a Temelín. Pro tyto účely byly zvoleny obalové soubory pro přepravu a skladování CASTOR od německé firmy GNS (Gesellschaft für Nuklear- Service mbH Essen). Vzhledem k rozdílným konstrukcím paliva v obou jaderných elektrárnách jsou zvoleny různé typy obalových souborů (kontejnerů).

Aby bylo palivo v kontejnerech správně umístěno, je potřeba vymezit určitý prostor pro každý palivový soubor (palivovou kazetu). K tomuto účelu slouží vnitřní vestavby, tzv. koše, které vytváří potřebné schránky pro jednotlivé kazety. Koše jsou navrženy s ohledem na zajištění podkritičnosti a dobrého odvodu tepla. Těchto vlastností se dosahuje vhodnou geometrií a použitím vhodného materiálu.

5.2.1 VÝVOJ NA ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY

Za dobu fungování jaderné elektrárny Dukovany bylo provedeno mnoho technických změn v její jaderné i nejaderné části. Hlavní snahou provozovatelů elektrárny byl a stále je růst efektivity výroby elektrické energie.

Díky značným výkonovým rezervám v samotném projektu dochází za použití moderních metod ke zvedání výkonu reaktorů, účinnosti dalších zařízení apod. Původní elektrický výkon jednoho bloku je navyšován o 13,6 % ze 440 MWe na 500 MWe. Kontinuálně s tímto procesem je obměňováno během odstávek i jaderné palivo za nové s vyšším obohacením. V návaznosti na tyto změny bylo nutno uvažovat o důsledcích jeho vyššího vyhoření. Proto došlo k použití nového typu kontejneru s lepším radiačním stíněním a vylepšenou schopností odvodu zbytkového tepla.

Kontejnery CASTOR jsou vyrobeny z tlustostěnného tělesa ze speciální tvárné litiny. Tloušťka stěny tělesa je 410 mm, vnitřní povrch je chráněn niklovou vrstvou proti korozi, vnější je opatřen snadno dekontaminovatelným epoxidovým nátěrem. Ve stěnách jsou po celé jejich výšce vyvrtány svislé dutiny vyplněné polyetylénem posilujícím stínění neutronů. Kontejner se plní palivem přímo v reaktorovém sále ponořený pod vodou v části bazénu

použitého paliva. Po našroubování primárního a sekundárního víka se kontejner vyjme z nádrže, voda se přes ventily odsaje a kontejner se opakovaně vakuově suší, poté se napustí heliem o absolutním tlaku nižším než je atmosférický, prostor mezi víky se také plní heliem ale o absolutním tlaku 0,6 MPa. Tímto vzniknou dvě nezávislé ochranné bariéry. Hodnota tlaku mezi víky je neustále po dobu životnosti kontejneru monitorována elektronickým snímačem, který je přímo napojen na signalizační systém pro případ poklesu. Pokud by přestalo i přes vysoký kroutící moment šroubového spojení (více než 1200 Nm) jedno z vík těsnit, dojde ke snížení přetlaku a helium mezi víky začne proudit do prostoru s palivem nebo v případě netěsnosti sekundárního víka do atmosféry. Za všech okolností nedojde při selhání těsnosti jednoho z vík k úniku radioaktivních látek mimo kontejner. Při vzniku takovéto situace by musel být kontejner doplněn třetím víkem nebo otevřen a vybaven novým těsněním.

Základní údaje o vlastnostech obou typů obalových souborů jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 Technické údaje CASTOR®440/84 a CASTOR®440/84M [16]

Veličina	CASTOR® 440/84	CASTOR® 440/84M
Hmotnost prázdného OS ²	94 700 kg	93 700 kg
Hmotnost OS zaplněného palivem	116 300 kg	112 000 kg
Počet uskladněných kazet VVER 440	84 ks	84 ks
Výška kontejneru	4 080 mm	4 290 mm
Průměr kontejneru včetně žebrování	2 660 mm	2 660 mm
Max. počáteční obohacení U235	3,87 hm. %	4,38 hm. %
Celková aktivita paliva	2,7·10 ¹⁷ Bq	-
Max. teplota povrchu OS	85 °C	120 °C
Minimální životnost OS	60 let	60 let
Hmotnost primárního víka	7 400 kg	7 400 kg
Hmotnost sekundárního víka	3 650 kg	3 650 kg

² Obalový soubor

**Obrázek 14 První dukovanský mezisklad - již zaplněný kontejnery
CASTOR®440/84 [15]**



Obrázek uvedený výše zobrazuje uspořádání šedesáti kontejnerů CASTOR®440/84 v prvním dukovanském skladu, který je v současné době již zaplněn. Obrázek 15 znázorňuje umístění koše uvnitř kontejneru.

Obrázek 15 Pohled do otevřeného OS CASTOR [23]



Vnitřní vestavbu kontejneru typového označení 440/84M tvoří koš ŠKODA 440/84M, který je sešroubován z šestihranných profilů ze slitiny hliníku, mezi něž jsou vloženy stínící ocelové plechy z materiálu Atabor. Náročnost úspěšné

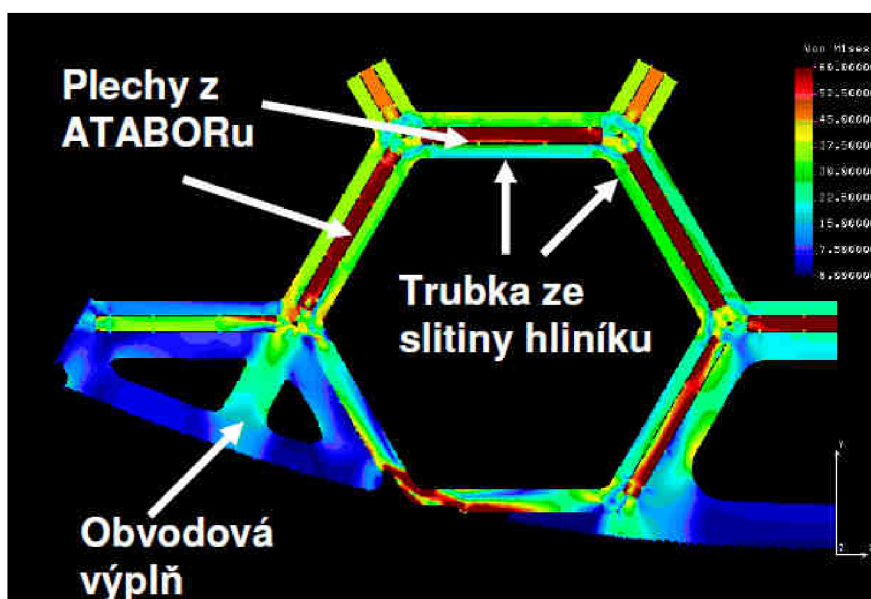
konstrukce spočívá mimo jiné v tom, že musí být zaručena mechanická celistvost pro projektované zátěžné stavy, jako např. vodorovný pád z výšky 9 metrů na tuhou podložku. Je důležité zaručit omezené deformace koše, aby nebyly poškozeny palivové soubory a aby je bylo možné z koše později vytáhnout. Sestavení jednotlivých šestihránných profilů je patrné z obrázku 16.

Obrázek 16 Detail koše ŠKODA pro OS VVER 440 [17]



Ukázka z napěťové analýzy v počítačovém modelu řešena metodou konečných prvků (MKP) viz níže.

Obrázek 17 Výpočtový model MKP [23]



5.2.2 VÝVOJ NA ELEKTRÁRNĚ TEMELÍN

Jaderná elektrárna Temelín je mladší z dvojice českých atomových elektráren. Je postavena dle současné koncepce moderních tlakovodních reaktorů, které podstatně snižují počet funkčních celků. Provozováno je jen jedno turbosoustrojí na výrobní blok, počet parogenerátorů byl snížen z 6 na 4. aj.

Původně sovětský projekt byl částečně přepracován především kvůli požadavkům ekologických organizací, ale také mezinárodních agentur. Elektrárna byla dokončena a uvedena do provozu s velkým zpožděním, a místo původně zamýšlených 4 bloků byly dokončeny pouze 2. Další dva bloky momentálně čekají na vítěze výběrového řízení, který stavbu dokončí.

Roku 2010 byl v areálu elektrárny dokončen suchý mezisklad použitého jaderného paliva. Prozatím do něj byl umístěn první obalový soubor s vyhořelým palivem, a probíhá zkušební provoz. Z důvodu odlišné konstrukce reaktoru je použit jiný typ kontejneru německé firmy GNS, a to CASTOR®1000/19. Principiálně se jedná o příbuzný typ obalového souboru používaného v EDU³. Na první pohled zaujme nezvyklým závěsným systémem čtyř čepů v jeho horní části. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu obtížné manipulace s kontejnerem při transportu z reaktorového sálu. Základní údaje jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2 Technické údaje CASTOR®1000/19 [24]

Veličina	CASTOR® 1000/19
Hmotnost OS zaplněného palivem	116 000 kg
Počet uskladněných kazet VVER 1000	19 ks
Výška kontejneru	5 500 mm
Průměr kontejneru včetně žebrování	2 330 mm
Max. počáteční obohacení U235	5 hm. %
Minimální životnost OS	60 let
Max. tepelný výkon	17 kW

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

³ Jaderná elektrárna Dukovany

**Obrázek 18 První temelínský mezisklad zaplněný jedním kontejnerem
CASTOR®1000/19 [22]**



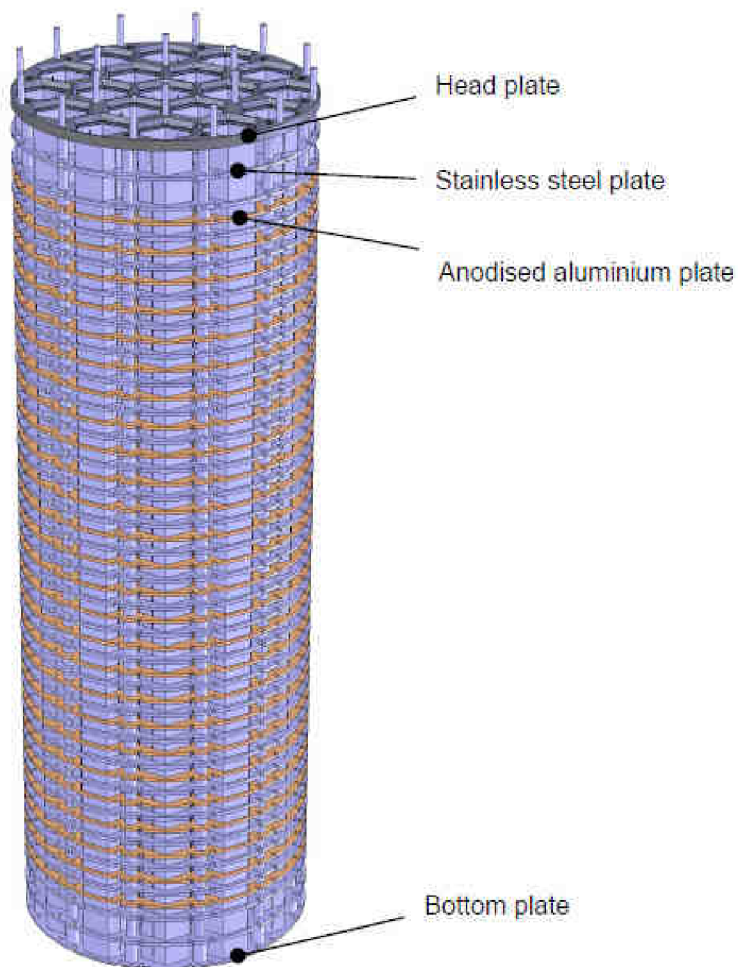
Hlavní odlišnost kontejneru oproti jeho předchůdci se nalézá v jeho nitru. Jedná se o novou konstrukci koše, která již není tvořena pouze prizmatickými profily, nýbrž obsahuje po výšce prostrádané prvky z dvou různých materiálů. Nerezové plechy plní požadavek na mechanickou odolnost, zatímco ty hliníkové spolehlivě odvádí teplo ze středu do stěn. 19 šestihranných trubek tvořících kapsy pro palivové soubory je vyrobeno z nerezové oceli s příměsí bóru, který plní funkci absorbátoru neutronů. Ve stěnách jsou po celé jejich výšce vyvrtány svislé dutiny ve dvou soustředných kružnicích vyplněné polyetylénem posilujícím stínění neutronů.

Ponořený pod vodou v reaktorovém sále se kontejner plní palivem obdobně jako u staršího typu na EDU. Po našroubování primárního víka se vyjme z nádrže, voda se přes ventil odsaje a kontejner se opakovaně vakuově suší, poté se napustí heliem o absolutním tlaku nižším než je atmosférický, našroubuje se sekundární víko a prostor mezi nimi se taktéž plní heliem o absolutním tlaku 0,6 MPa. Tímto vzniknou dvě nezávislé ochranné bariéry. Hodnota tlaku mezi víky je neustále po dobu životnosti kontejneru monitorována.

Celý proces je z důvodu opakovaného sušení časově náročný, po jeho dokončení je nutné počkat na ustálení teplot, které jsou měřeny a srovnávány s předpokládanými hodnotami. Současně je sledováno také záření vyzařující

z kontejneru. Model sestavy je vyobrazen v příloze 1. Obrázek 19 ukazuje inovativní konstrukci koše – pláty jsou odlišeny barvami.

Obrázek 19 Koš kontejneru CASTOR®1000/19 [24]



5.3 MEZISKLADOVÁNÍ POUŽITÉHO JADERNÉHO PALIVA V ZAHRANIČÍ

5.3.1 MAĎARSKÁ REPUBLIKA

Podobně jako ostatní východoevropské státy uvedlo do provozu i Maďarsko v 80. letech reaktory sovětského typu VVER. Po vzniku ruské federace muselo také řešit problém s uskladněním vyhořelého paliva. Bylo rozhodnuto o výstavbě suchého meziskladu, který byl roku 1997 uveden do provozu a který by měl fungovat minimálně po dobu 50i let. Stavba je důmyslně umístěna nedaleko jediné maďarské jaderné elektrárny Paks, která dodává více jak třetinu elektrické energie ve státě.

Byla zvolena netradiční koncepce suché metody bez masivních kontejnerů, ale tenkých pouzder – kobek. Samotné kobky jsou umístěny ve vzduchovém tunelu, jež využívá komínového efektu (obrázek 20 – kobky znázorněny modře). Se vzrůstajícím vývinem tepla v palivu se samovolně vlivem vztlakových sil proudění vzduchu urychluje a dochází tak k lepšímu chlazení, které je v tomto provozním režimu více než žádoucí. Každá palivová kazeta se zasune do jedné kobky, poté je odčerpán vzduch a přiveden dusík, který chrání před nežádoucí oxidací. Kobky jsou hermeticky těsné, vyrobené z uhlíkové oceli. Všechny vnější plochy jsou opatřeny hliníkovou povrchovou úpravou, vnitřní jsou mořeny. [25] Výkres sestavení viz příloha 2.

Obrázek 20 Svislý řez modelem skladu Paks [25]



5.3.2 SLOVENSKÁ REPUBLIKA

Jako v mnoha jiných zemích bylo pravděpodobně na základě dobrých zkušeností s dochlazováním paliva v bazénech u reaktorů i u našich východních sousedů zvoleno meziskladování použitého jaderného paliva mokrou metodou.

I první české použité jaderné palivo bylo skladováno v mokřém meziskladu vybudovaném roku 1987 v Jaslovských Bohunicích. Původně mělo směřovat do Sovětského svazu, ale s jeho zánikem musel být tento plán přehodnocen. Po vybudování prvního meziskladu v EDU se české palivo dovezlo po částech zpět. Poslední transport se uskutečnil v roce 1997. [26]

Komplex je tvořen čtyřmi skladovacími bazény, přičemž tři jsou pracovní a jeden je prázdný sloužící jako rezerva. Teplota chladiva je udržována pod hranicí 50°C pomocí tepelných výměníků a výkonných čerpadel. Původní projekt se sovětským designem byl modernizován mezi roky 1996 a 1999. Došlo k seizmickému z odolnění celé stavby a podstatnému rozšíření skladovací kapacity.

Obrázek 21 Nerezový koš pro vyhořelé palivo [26]



Jeden kompaktní zásobník (obrázek 21) pojme při stejném objemu 48 palivových kazet namísto původních 30 kusů. Této výrazné změny bylo dosaženo změnou rozteče obalových souborů v zásobníku. Do každého bazénu může být vloženo 98 kompaktních mříží, což při třech plně obsazených bazénech činí celkem 14 112 palivových kazet. Tato kapacita plně dostačuje pro skladování všech palivových souborů vzniklých v budoucnu při provozu EBO⁴ do konce její uvažované životnosti. [26]

Z bazénu vyhořelého paliva jsou obalové soubory transportovány uvnitř kontejnerů (obrázek 22; vpravo lze vidět 9 nových kompaktních mříží) opakovaně sloužících k přepravě do meziskladů.

Obrázek 22 Interní přepravní kontejner [26]



Na druhé slovenské elektrárně Mochovce je v plánu výstavba obdobného skladu pro pokrytí současných i budoucích nároků na skladovací kapacitu.

⁴ Jaderná elektrárna Jaslovské Bohunice

5.3.3 UKRAJINA – UKLÁDÁNÍ JADERNÉHO PALIVA V LOKALITĚ ČERNOBYL

V lokalitě nechvalně proslulé jaderné elektrárny Černobyl bylo vybudováno dočasné úložiště vyhořelého paliva systémem betonových sil, která jsou vidět na obrázku 23. Do těchto sil jsou horizontálně zasouvány kontejnery s vyhořelým palivem. Sklad bude sloužit pro palivo z odstavených bloků 1, 2, 3.

Po Černobylské havárii byly tyto sousední bloky typu RBMK provozovány dále. Odstavování bloků probíhalo postupně do roku 2000.

Obrázek 23 Mezisklad Černobyl, Ukrajina [32]



Hlavní částí tohoto projektu za 1,54 mld. EUR je výstavba nového krytu nad havarovaným čtvrtým blokem. Zbudovaný sarkofág, který byl stavěn v zoufalé situaci mezi lety 1986 – 1988, již přestává navzdory průběžným opravám těsnit, a proto je nutné jeho nahrazení. Střecha nové stavby bude vztyčena v těsné blízkosti a následně po kolejích přesunuta nad starý kryt. V další fázi bude kryt dokončen a utěsněn. Celé dílo bude dle harmonogramu dokončeno v roce 2015.

KONSTRUKČNÍ ROZDÍLY V GEOMETRII MŘÍŽE DANÉ TVAREM PALIVOVÝCH KAZET PRO „ZÁPADNÍ A VÝCHODNÍ“ SMĚRY

Během vývoje jaderných elektráren byly navrženy a zrealizovány různé geometrie palivových kazet. V návaznosti na to musí být řešeny také koše pro ukládání těchto souborů. Typickým tvarem pro východní koncepci je šestiúhelník, zatímco ta západní je charakteristická čtvercovým profilem. Patrné rozdíly je možné spatřit na následujících dvou obrázcích.

Obrázek 24 Koš kontejneru VPVR/M [17]



Obrázek 25 Vnitřní koš kontejneru CASTOR 440/84 [17]



6 ZÁKLADY TEORIE TEPELNÉHO VÝPOČTU

Pro výpočet přenosu tepla a jeho šíření v materiálech je nutné znát konkrétní materiálové vlastnosti, jejich průběh při změně teploty a mechanismus, jakým se teplo šíří.

6.1 FOURIERŮV ZÁKON

Pojednává o teorii vedení tepla.

„Měrný tepelný tok (to je tepelný tok \dot{Q} vztažený na jednotku plochy S) \vec{q} [W/m²] přenášený vedením v nějaké látce je přímo úměrný velikosti teplotního gradientu a má opačné znaménko než tento gradient.“[18]

$$\vec{q} = \frac{\dot{Q}}{S} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad [\text{W/m}^2] \quad (4)$$

Ve skalární formě:

$$\dot{q} = \lambda \frac{\Delta T}{\delta} \quad \text{nebo} \quad \dot{Q} = \lambda \cdot S \frac{\Delta T}{\delta} \quad (5)$$

kde: δ tloušťka tělesa ve směru tepelného toku [m]
 λ tepelná vodivost [W/mK]

Fourierův zákon pro 3D těleso lze zapsat ve tvaru:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \vec{\nabla} \cdot T = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (6)$$

kde $\vec{\nabla} T$ je gradient teploty ve tvaru:

$$\vec{\nabla} T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad (7)$$

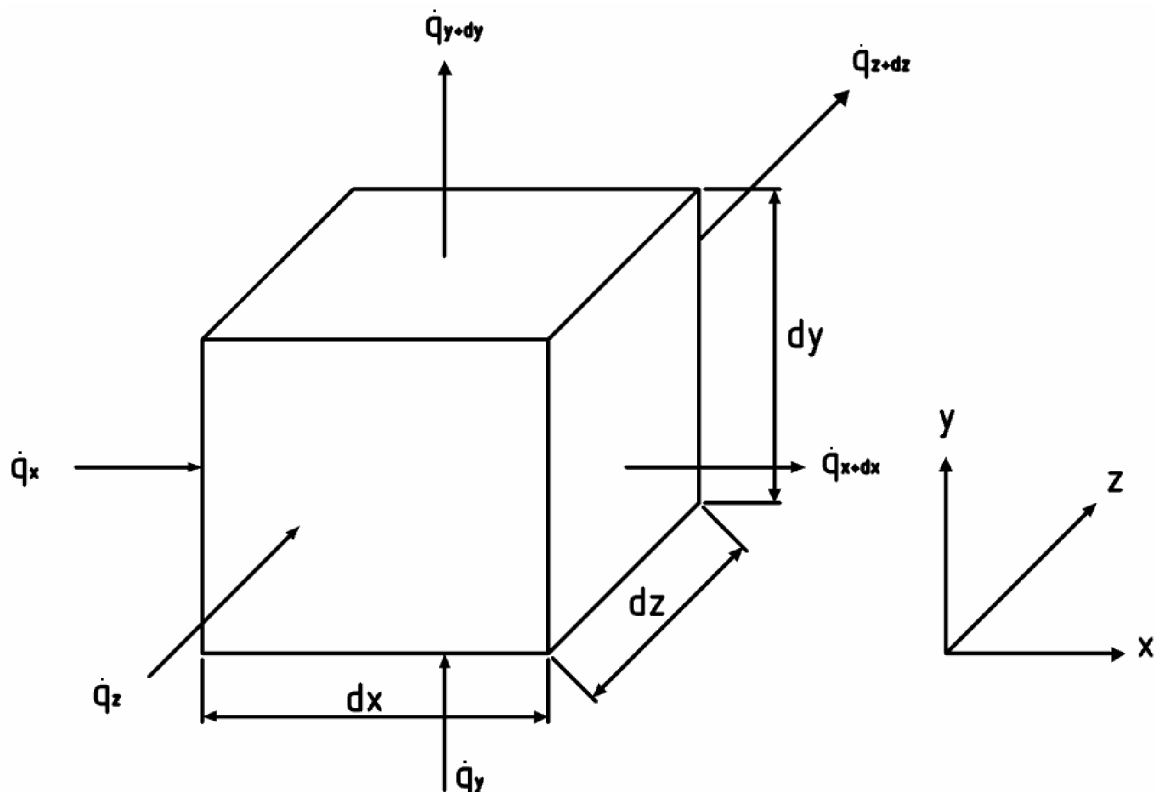
6.2 ZJEDNODUŠENÁ DIFERENCIÁLNÍ ROVNICE ENERGIE

Pro výpočet přestupu tepla v 3D tělese, je nutno ze všeho nejdříve provést odvození zjednodušené diferenciální rovnice energie. Odvození bude provedeno na 3D tělese dle [18] pro nestacionární případ (teplotní pole v tělese se mění v závislosti na čase). Mějme krychli, jak je uvedeno na obrázku 15, dále zapíšeme bilanci tepelných toků, které do tohoto objemového elementu vstupují stěnami, jejichž plocha je S , a které mají souřadnice x , y , z . Tepelné toky vystupují z objemového elementu stěnami, jejichž souřadnice jsou $x + dx$, $y + dy$, $z + dz$. Dále existuje předpoklad, že v objemu daného objemového elementu je zdroj tepelné energie.

Energetickou bilanci pro objemový zdroj je možné zapsat jako:

$$\left[\begin{array}{l} \text{tepelný tok} \\ \text{vstupující do} \\ \text{elementu} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{tepelná energie} \\ \text{generovaná v} \\ \text{elementu} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{změna vnitřní} \\ \text{energie} \\ \text{elementu} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{tepelný tok} \\ \text{vystupující z} \\ \text{elementu} \end{array} \right]$$

Obrázek 26 Elementární objem a tepelné toky v kartézském souřadnicovém systému [18]



Popis jednotlivých veličin:

- Tepelný tok vstupující do elementu levou stěnou ve směru x:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot S \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_x = \dot{q} \cdot S = \dot{q}_x \cdot dx \cdot dy \quad [\text{W}] \quad (8)$$

- Tepelná energie generovaná v objemu v elementu (vnitřní zdroj):

$$\dot{Q}'_{zdroj} = \dot{Q}_{zdroj} \cdot dV = \dot{Q}_{zdroj} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad [\text{W}] \quad (9)$$

- Změna vnitřní energie objemového elementu v čase:

$$\frac{dU}{dt} = m \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \rho \cdot c \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad [\text{W}] \quad (10)$$

- Tepelný tok vystupující z objemového elementu pravou stěnou ve směru x:

$$\dot{Q}_{x+dx} = -\lambda \cdot S \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x+dx} = \dot{q}_{x+dx} \cdot S = \dot{q}_{x+dx} \cdot dx \cdot dy \quad [\text{W}] \quad (11)$$

Zcela analogicky se definují tepelné toky vstupující a vystupující z objemového elementu ve směru y a tepelné toky vstupující a vystupující z objemového elementu ve směru z. Rovnice energetické bilance pro objemový element se přepíše do tvaru:

$$\dot{Q}_x + \dot{Q}_y + \dot{Q}_z + \dot{Q}'_{zdroj} = \frac{dU}{dt} + \dot{Q}_{x+dx} + \dot{Q}_{x+dy} + \dot{Q}_{x+dz} \quad (12)$$

Nyní se dosadí do rovnice vztah pro měrný tepelný tok pro 3D obecné těleso. Fourierův zákon pro 3D těleso je možné napsat ve tvaru:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \vec{\nabla} \cdot T = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (13)$$

Nebo po rozepsání do jednotlivých tří směrů (\vec{q} je vektor):

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \quad q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (14)$$

Vztahy (14) se dosadí do rovnice (12) a po jednoduché úpravě:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q}'_{zdroj} = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (15)$$

Rovnice (15) představuje rovnici **energie** nebo také rovnici **tepelné difúze**. Pokud se vezme v úvahu, že součinitel tepelné vodivosti je konstantní ($\lambda = \text{konst.}$), pak se rovnice zjednoduší na tvar:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{\dot{Q}_{\text{zdroj}}}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (16)$$

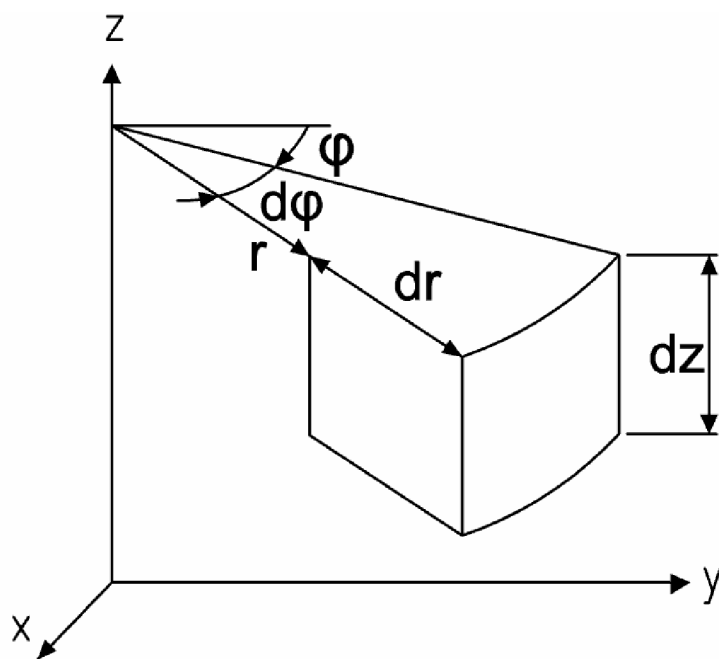
Veličina $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$ se nazývá teplotní vodivost.

Nyní se transformuje rovnice (16) do cylindrických souřadnic. Rovnice (17) je rovnice energie s vnitřním zdrojem v cylindrických souřadnicích.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{Q}_{\text{zdroj}}}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (17)$$

Rovnice (17) je vyjádření rovnice energie s vnitřním zdrojem v cylindrických souřadnicích. Zobrazení cylindrického souřadného systému s objemovým elementem zobrazuje obrázek 16 uvedený níže.

Obrázek 27 Elementární objem v cylindrickém souřadném systému [18]



6.3 TEORIE PŘENOSU TEPLA

Dříve než se vyjádří teplotní profil ve válcové stěně, aby vznikla představa, jak bude vypadat průběh teploty v závislosti na poloměru, formulujeme potřebné zjednodušující předpoklady pro analytické řešení.

1. Tepelný tok je veden pouze ve směru poloměru.

$$\dot{q} = f(R)$$

2. Gradient teploty po výšce a úhlu natočení bude nulový.

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0 \qquad \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

3. Tepelný výkon vyhořelého paliva s časem pozvolna klesá, pokud však vezmeme v úvahu diskrétní hodnotu lze úlohu řešit stacionárně za předpokladu nulové změny teploty.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

4. Součinitelé tepelných vodivostí se nebudou měnit s teplotou a budou ve všech směrech stejné (izotropní materiál).
5. Vzhledem ke složitosti vnitřní vestavby kontejneru zanedbáme objemový zdroj tepla. Rozložení teploty uvnitř kontejneru budeme zjišťovat na modelu pomocí výpočetní techniky a numerického řešení.

S uvážením těchto předpokladů se rovnice (17) podstatně zjednoduší:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \tag{18}$$

6.3.1 TEPLTNÍ PROFIL VE VÁLCOVÉ STĚŇE

Vzhledem k tomu, že výpočet teplotního pole je zaměřen na válcový kontejner, bude pro další odvozování a výpočty využit cylindrický souřadný systém, který je pro válcovou geometrii nejvhodnější.

Fourierova diferenciální rovnice ustáleného vedení tepla ve válcové stěně se zanedbaným axiálním vedením tepla a bez tepelných zdrojů (18) má pro cylindrický souřadný systém následující tvar:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (19)$$

Po integraci rovnice dostaneme tvar:

$$dT = \frac{C_1}{r} dr \quad (20)$$

Dalším integrováním rovnice vznikne předpis:

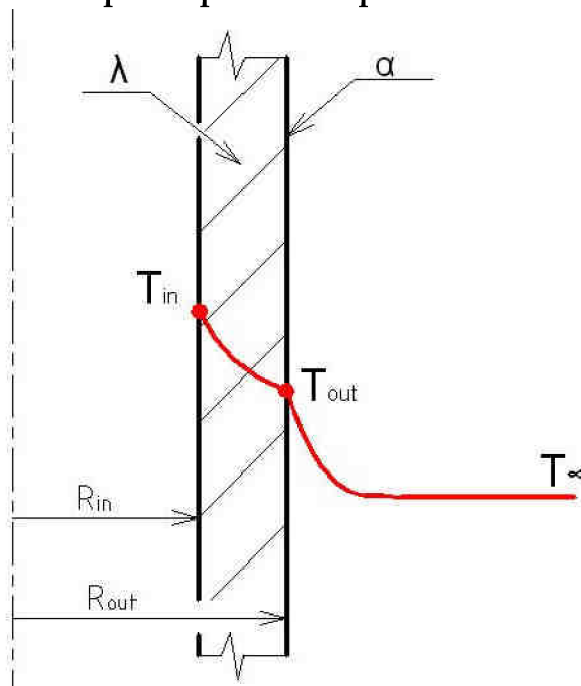
$$T(r) = C_1 \ln(r) + C_2 \quad (21)$$

Pro zjištění integračních konstant C_1 a C_2 je nutné nejprve stanovit okrajové podmínky.

OKRAJOVÉ PODMÍNKY

V praxi je potřeba nejdříve zjistit jak vstupuje koeficient přestupu tepla α do okrajových podmínek:

Obrázek 28 Teplotní průběh na povrchu válcové stěny [19]



Okrajová podmínka **I. druhu** (Dirichletova):

Na povrchu tělesa se udržuje dané rozložení teplot T_{out} :

$$T(R_{out}) = T_{out} \quad (22)$$

Okrajová podmínka **II. druhu** (Neumannova):

Předepisuje známou hodnotu tepelného toku $\dot{q} = f(r)$ na souřadnicích o poloměru R_{in}

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_{in}} = \dot{q} \quad (23)$$

Okrajová podmínka **III. druhu** (Fourierova):

Tepelný tok na povrchu tělesa o poloměru R_{out} je roven tepelnému toku konvencí:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_{out}} = \alpha (T_{out} - T_{\infty}) \quad (24)$$

Součinitel přestupu tepla α získáme z Nusseltova čísla:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda_v} \quad (25)$$

kde L výška žebrovaného povrchu kontejneru
 λ_v součinitel tepelné vodivosti pro vzduch

Nusseltovo číslo se určuje z kritériální rovnice, jejíž tvar je pro případ vertikální stěny o výšce L podle [18] následující:

$$\overline{Nu} = 0,13 (Gr Pr)^{1/3} \quad (26)$$

kde Gr Grasshoffovo číslo pro vzduch
 Pr Prandtlovo číslo pro vzduch

Kde určující teplota je:

$$T_f = \frac{1}{2} \cdot (T_{out} + T_{\infty}) \quad (27)$$

kde T_{out} teplota vnějšího povrchu
 T_{∞} teplota v dostatečné vzdálenosti od povrchu

Grasshoffovo číslo se zjistí ze vztahu:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot L^3}{\nu^2} \quad (28)$$

kde pro případ ideálního plynu lze uvažovat:

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (29)$$

Vztah pro výpočet Nusseltova čísla (26) lze použít při splnění následující podmínky:

$$\frac{d}{L} \geq \frac{35}{Gr^{1/4}} \quad (30)$$

ODVOZENÍ VÝPOČTU TEPLoty VNĚJŠÍHO POVRCHU T_{out}

Vycházíme z Newtonova vztahu pro tepelný tok konvencí:

$$\dot{Q} = S \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (31)$$

neboli

$$\dot{Q} = S \cdot \alpha \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \quad (32)$$

po vyjádření vnější teploty povrchu:

$$T_{out} = \frac{\dot{Q}}{S \cdot \alpha} + T_{\infty} \quad (33)$$

Celkový povrch válcové části kontejneru S:

$$S = \pi \cdot D_{out} \cdot L \quad (34)$$

Po dosazení (34) do (33) dostaneme výsledný vzorec:

$$T_{out} = \frac{\dot{Q}}{\pi \cdot D_{out} \cdot L \cdot \alpha} + T_{\infty} \quad (35)$$

ZOHLEDNĚNÍ PŘESTUPU TEPLA PŘI FORMULACI VÝPOČTOVÝCH KONSTANT

Na vnějším povrchu válce platí podmínka přenosu tepelné energie konvencí, uplatňuje se tedy (Fourierova) okrajová podmínka III. druhu, neboli tepelný tok vedením na povrchu tělesa o poloměru R je roven tepelnému toku konvencí:

$$-\lambda \frac{dT}{dr} \Big|_{r=R_{out}} = \alpha \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \quad (36)$$

Úpravou rovnice (20) vznikne:

$$\frac{dT}{dr} = \frac{C_1}{r} \quad (37)$$

Po dosazení rovnice (37) do podmínky (36):

$$-\lambda \frac{C_1}{R_{out}} = \alpha \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \quad (38)$$

Nyní je možné vyjádřit konstantu C_1

$$C_1 = \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \quad (39)$$

Její dosažením do rovnice (21) vznikne předpis:

$$T(r) = C_2 - \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \ln r \quad (40)$$

Konstantu C_2 získáme z podmínky, kdy na vnitřním poloměru pro $r = R_{in}$ je konstantní teplota T_{in} :

$$T_{in} = C_2 - \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \ln R_{in} \quad (41)$$

Nyní je možné vyjádřit konstantu C_2

$$C_2 = T_{in} + \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \ln R_{in} \quad (42)$$

Dosazením integračních konstant C_1 a C_2 do obecné rovnice (21) vznikne:

$$T(r) = T_{in} + \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \ln R_{in} - \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \ln r \quad (43)$$

Lze zjednodušit

$$T(r) = T_{in} + \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot (\ln R_{in} - \ln r) \quad (44)$$

Pro teplotu ve stěně kontejneru při $R_{in} \leq r \leq R_{out}$ pak platí:

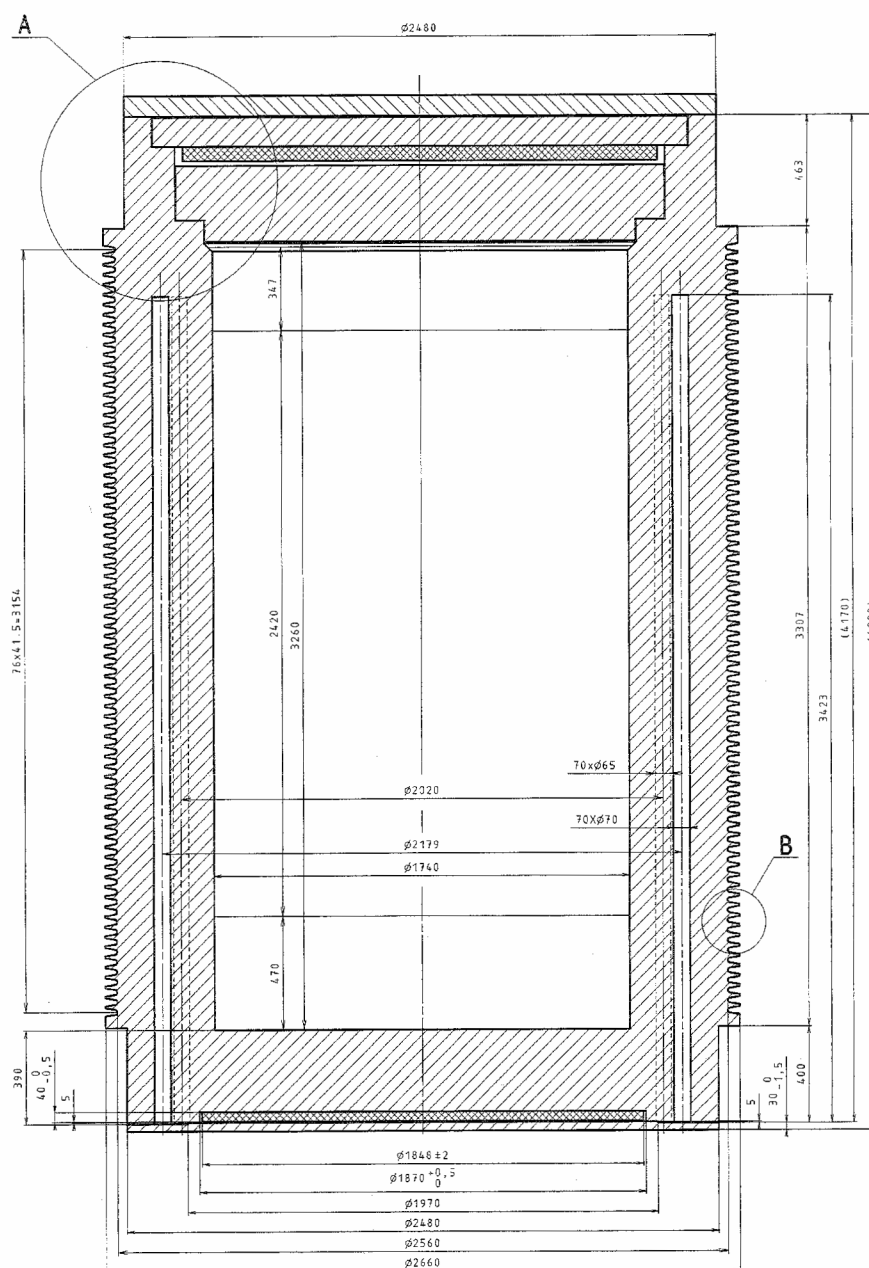
$$T(r) = T_{in} + \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \left(\ln \frac{R_{in}}{r} \right) \quad (45)$$

Je tedy zřejmé, že teplotní průběh ve stěně kontejneru bude při pohledu na poslední člen a při uvažování stacionárního stavu skutečně logaritmický, jak bylo odhadnuto na obrázku 28 (str. 50).

7 VÝPOČTOVÝ MODEL

Pro konkrétní výpočet byl vybrán přepravně skladovací kontejner CASTOR®440/84M, který je v současné době používán na jaderné elektrárně Dukovany. Jak již bylo zmíněno dříve, slouží k uložení 84 vyhořelých palivových souborů používaných na typech s reaktory VVER 440. Geometrie a použitý materiál kontejneru je patrný z následujícího obrázku 29 a z příložené tabulky 3.

Obrázek 29 Podélný řez kontejnerem CASTOR®440/84M [20]



Tabulka 3 Základní materiálové vlastnosti použité pro výpočet [20]

Konstrukční materiál	T [°C]	λ [W/mK]			ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
Těleso obalového souboru - litina s kuličkovým grafitem GGG 40 (ČSN 42 23 04; EN-GJS-400-8)	20	38.0			7000	515
	50	39.3				515
	100	40.4				515
	200	41.4				569
	300	39.8				603
	400	37.4				649
Moderátor (Polyetylén)	20	0.76			920	
	30					870
	50					1220
	60	0.70				
	80					1880
	100					3000
	200	0.70				
Palivová sestava + Hélium		x	y	z	4545.8	286.8
	100			4.99		
	113.4	0.36	0.36			
	200			4.76		
	210.6	0.46	0.46			
	300			4.64		
	308.6	0.56	0.56			
	400			4.67		
407	0.69	0.69				
Koš – AlMg1.8	25	160.7			2700	990
	100	167.0				
	200	176.9				
	300	181.2				
	400	184.6				
Koš - Atabor	20	15.1			7900	461
	100	16.3				494
	200	17.6				515
	300	18.8				536
	400	20.0				557

Konstrukční materiál	T [°C]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
Helium	0	0.143		
	100	0.174		
	200	0.205		
	300	0.237		
	400	0.270		
	500	0.302		
Vzduch	0	0.0244		
	100	0.0321		
	200	0.0393		
	300	0.0460		
	400	0.0521		
	500	0.0574		
	600	0.0622		

Další vstupní data [20]

Maximální tepelný výkon celého obalového souboru	24 500 W
Uvažovaná okolní teplota vzduchu	30 °C
Počet palivových kazet	84 ks

7.1 ANALYTICKÁ VÝPOČTOVÁ ÚLOHA

Vzhledem k různorodosti vnitřní vestavby, která se skládá z koše, palivových kazet a stínících plechů, bude teplotní pole uvnitř značně nehomogenní, a tudíž jeho řešení analyticky velmi komplikované. I přes formulaci zjednodušujících předpokladů v předchozí teoretické části bude v reálném čase řešitelné pouze numericky. Z těchto důvodů omezíme analytické řešení pouze na výpočet teplotního pole ve stěně kontejneru, kterou však bude nutno zjednodušit zanedbáním stínících polyetylenových tyčí uvnitř. Tento objem bude nahrazen stejným základním materiálem kontejneru.

Výpočet nebude přesně odpovídat reálné situaci, ale nastíní přibližnou hodnotu koeficientu přestupu tepla na povrchu kontejneru.

VSTUPNÍ HODNOTY

- Okolní teplota vzduchu v dostatečné vzdálenosti od povrchu.

Zvolena na základě měření teplot v dané lokalitě v letních měsících.

$$T_{\infty} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Tepelná vodivost základního materiálu tělesa.

Tepelná vodivost litiny při teplotě 80 °C je dle tabulky 2:

$$\lambda = 40 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

- Velikost určující teploty pro odhad součinitele přístupu tepla.

$$T_f = \frac{1}{2} \cdot (T_{out} + T_{\infty})$$

$$T_f = \frac{1}{2} \cdot (80 \text{ }^{\circ}\text{C} + 30 \text{ }^{\circ}\text{C})$$

$$T_f = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Ověření správnosti vztahu (26) pro výpočet Nusseltova čísla dle kritériální rovnice i pro případ vertikální trubky o délce L .

Musí být splněna nerovnost dle (30).

$$\frac{d}{L} \geq \frac{35}{Gr^{1/4}}$$

kde

$$d = D_{out} = 2560 \text{ mm}$$

$$L = 4290 \text{ mm}$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot L^3}{\nu^2}$$

kde

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\nu = 1,87 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{pro } T_f = 55 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{dle [21]}$$

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

A tedy

$$Gr = \frac{9,81 \text{ [m/s}^2\text{]} \cdot \frac{1}{55 + 273,15} \text{ [K}^{-1}\text{]} \cdot (80 - 30) \text{ [}^\circ\text{C]} \cdot 4,290 \text{ [m]}^3}{(1,87 \cdot 10^{-5}) \text{ [m}^2/\text{s]}^2}$$

$$Gr = 3,375 \cdot 10^{11}$$

Dosazení do podmínky:

$$\frac{2,56}{4,29} \geq \frac{35}{(3,375 \cdot 10^{11})^{1/4}}$$

$$\underline{0,597 \geq 0,046}$$

Podmínka je splněna, lze použít vztah (26).

Výpočet střední hodnoty Nusseltova čísla: [18]

$$\overline{Nu} = 0,13 \cdot (Gr Pr)^{1/3}$$

kde $Pr = 0,727$ dle [18]

$$\overline{Nu} = 0,13 \cdot (4,686 \cdot 10^{11} \cdot 0,727)^{1/3}$$

$$\overline{Nu} = 814$$

VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA

Vyjdeme z rovnice (25), upravíme ji na následující tvar:

$$\alpha = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda_v}{L_z}$$

kde $\lambda_v = 0,029 \text{ W / mK}$ pro $T_f = 55 \text{ °C}$

$L_z = 3154 \text{ mm}$ je uvažovaná délka žebrování

Vzhledem k nulovému axiálnímu vedení tepla je předpoklad, že veškeré odváděné teplo směřuje přes žebrovanou plochu v radiálním směru.

$$\alpha = \frac{814 \cdot 0,029}{3,154}$$

$$\underline{\alpha = 7,5 \text{ W / m}^2\text{K}}$$

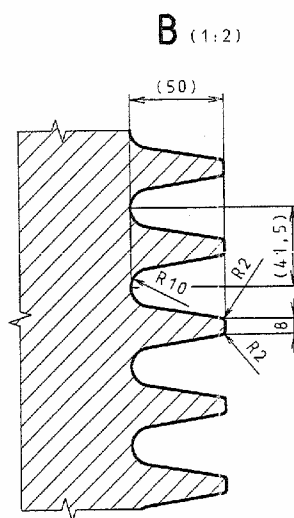
Vypočtený součinitel α uvádí hodnotu pro hladký povrch bez žebrování. Proto je ji nutné přepočítat vzhledem k ploše žebor a jejich možné účinnosti.

Celkový součinitel přestupu tepla je tedy

$$\alpha_z = \alpha \cdot k \cdot \eta$$

kde k je poměr plochy žebrovaného a nežebrovaného povrchu

Obrázek 30 Detail B - žebrování povrchu [20]



$$k = \frac{2 + \frac{\pi \cdot 2}{2} + (50,2 - 10 - 2) + \frac{\pi \cdot 10}{2} + \left(\frac{41,5}{2} - \frac{17}{2} - 10 \right)}{20,75} = 2,95$$

kde η účinnost žebrování zahrnující nerovnoměrnost povrchové teploty

dle [20] je vypočtená účinnost při užití nomogramu $\eta = 0,86$

$$\alpha_z = 7,5 [W / m^2 \cdot K] \cdot 2,95 \cdot 0,86$$

$$\underline{\underline{\alpha_z = 19 W / m^2 \cdot K}}$$

VÝPOČET TEPLŮ NA VNITŘNÍ A VNĚJŠÍ STĚNĚ KONTEJNERU

Výpočet hodnoty T_{out} z rovnice (35):

$$T_{out} = \frac{\dot{Q}}{\pi \cdot D_{out} \cdot L_z \cdot \alpha} + T_{\infty}$$

Za α dosazujeme celkový součinitel přestupu tepla α_z

$$T_{out} = \frac{24500[W]}{\pi \cdot 2,56[m] \cdot 3,154[m] \cdot 19[W/m^2 \cdot K]} + 30[^\circ C]$$

$$\underline{\underline{T_{out} = 80,8^\circ C}}$$

Výpočet vnitřní stěny kontejneru T_{in} z rovnice (45):

$$T(r) = T_{in} + \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \left(\ln \frac{R_{in}}{r} \right)$$

Dosadíme zjištěnou teplotu povrchu a vnější rozměr R_{out} .

$$T_{out} = T_{in} + \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \left(\ln \frac{R_{in}}{R_{out}} \right)$$

$$T_{in} = T_{out} - \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \left(\ln \frac{R_{in}}{R_{out}} \right)$$

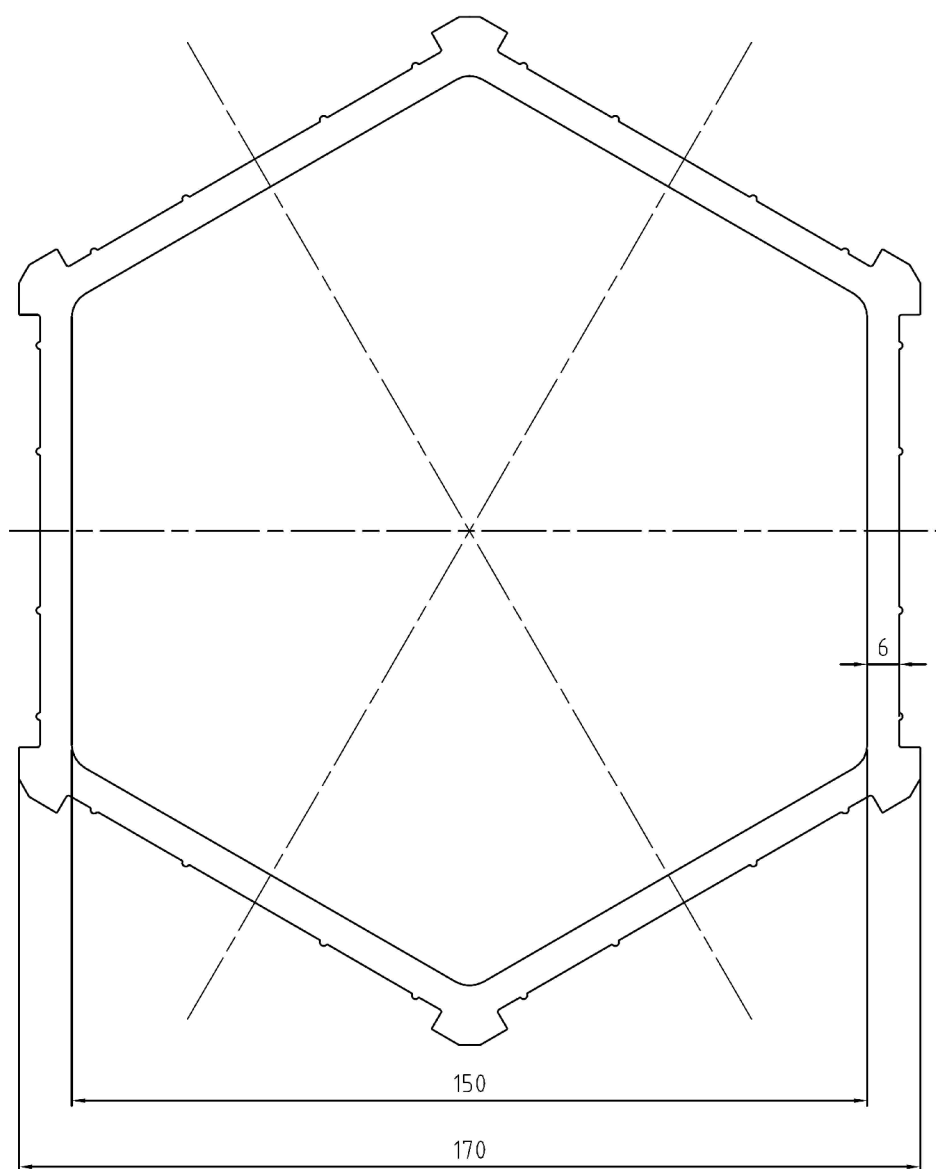
$$T_{in} = 80,8[^\circ C] - \frac{1,28[m] \cdot 19[W/m^2 K]}{40[W/mK]} \cdot (80,8[^\circ C] - 30[^\circ C]) \cdot \left(\ln \frac{0,87[m]}{1,28[m]} \right)$$

$$\underline{\underline{T_{in} = 92,7^\circ C}}$$

7.2 NUMERICKÁ VÝPOČTOVÁ ÚLOHA

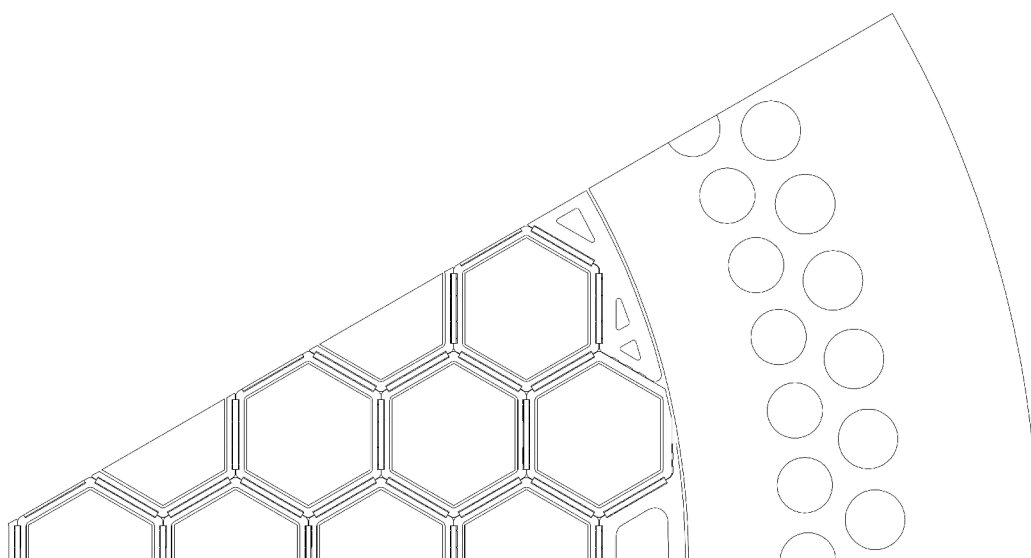
Pro účely numerického výpočtu byl v programu ANSYS vytvořen radiální řez kontejnerem dle skutečných rozměrů (viz příloha 3). Numerický postup byl zvolen z důvodu složité vnitřní mříže, která se skládá ze základních šestihranných profilů (viz obrázek 31) a tvoří základ koše ŠKODA. Mezi profily jsou vloženy stínící plechy z bórové oceli (Atabor) tloušťky 6 mm, které fungují jako absorbátor neutronů. S ohledem na jejich vlastnosti se přenos tepla uskutečňuje převážně v šesti rozích profilů.

Obrázek 31 Základní šestihranný profil [20]



Z důvodu osové symetrie problému byla jako postačující část řešena pouze 30tistupňová výseč, tedy 1/12 řezu, blíže znázorněna na obrázku 32.

Obrázek 32 Radiální výseč [20]



Koš tvoří 73 pravidelných šestihranných trubek a 12 okrajových trubek. Plný válcový profil je doplněn tvarovými okrajovými profily (6 a 12 ks). Vzájemně jsou v horní a spodní části šroubově spojeny, vrchní okraje jsou opatřeny náběhy pro zasouvání palivových kazet.

Ve výpočtovém modelu jsou tepelné zdroje soustředěny do náhradního materiálu s fiktivním koeficientem tepelné vodivosti. K řešení bylo přistoupeno z důvodu značné členitosti konstrukce palivového souboru viz obrázek 33.

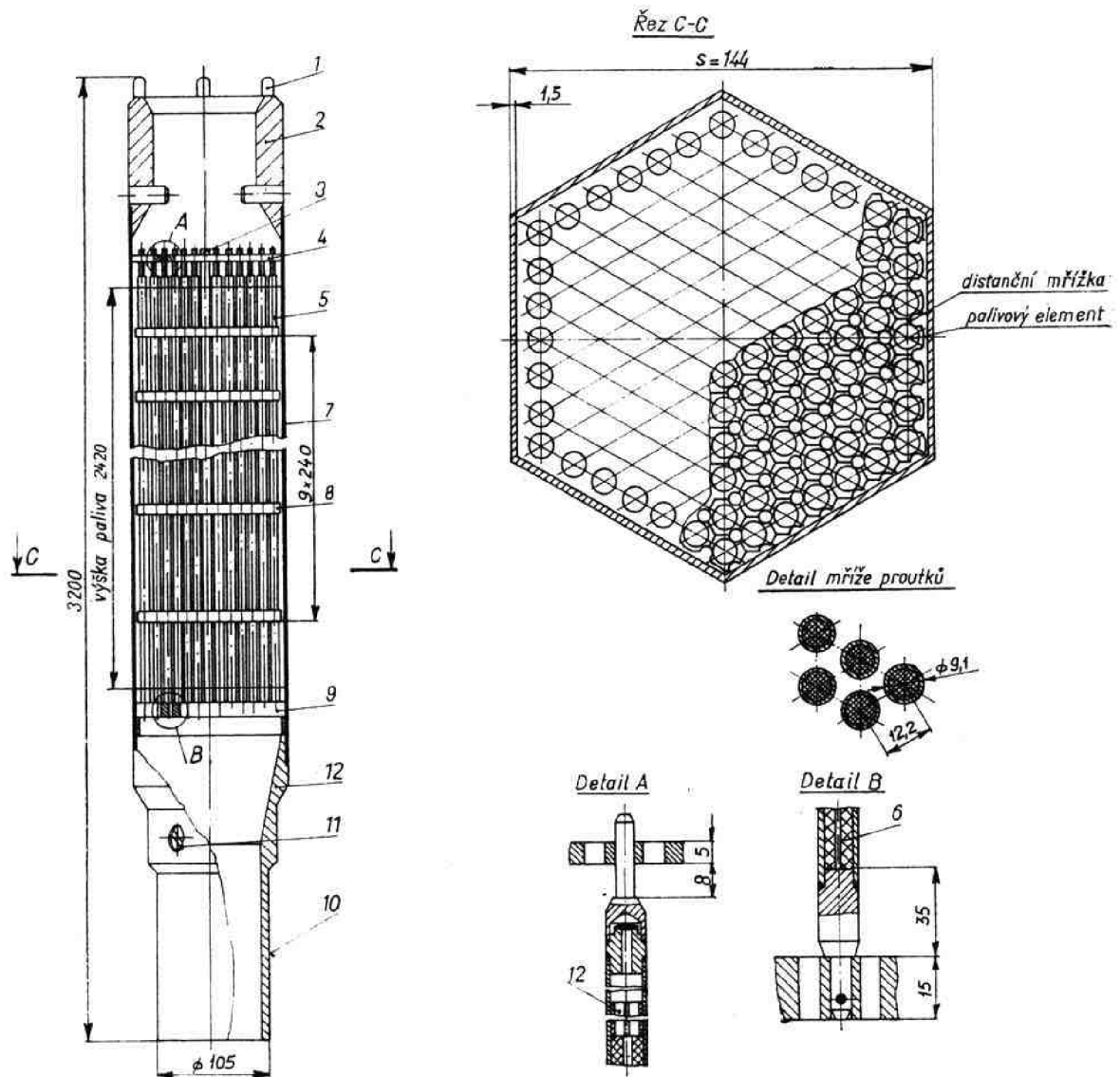
Náhradní materiál odpovídá délce palivové části kazety a jeho tepelný výkon je stanoven z výpočtu:

$$\frac{\text{Tepelný výkon všech kazet}}{\text{Počet palivových kazet}} = \frac{24500 \text{ [W]}}{84} \doteq 292 \text{ W}$$

Při objemu náhradního materiálu ve tvaru hranolu s šestihrannou podstavou $0,0449 \text{ m}^3$ je výkon generovaný z jednotky objemu roven:

$$q_v = \frac{292 \text{ [W]}}{0,0449 \text{ [m}^3]} = 6504 \text{ W / m}^3$$

Obrázek 33 Palivový soubor VVER 440 [5]



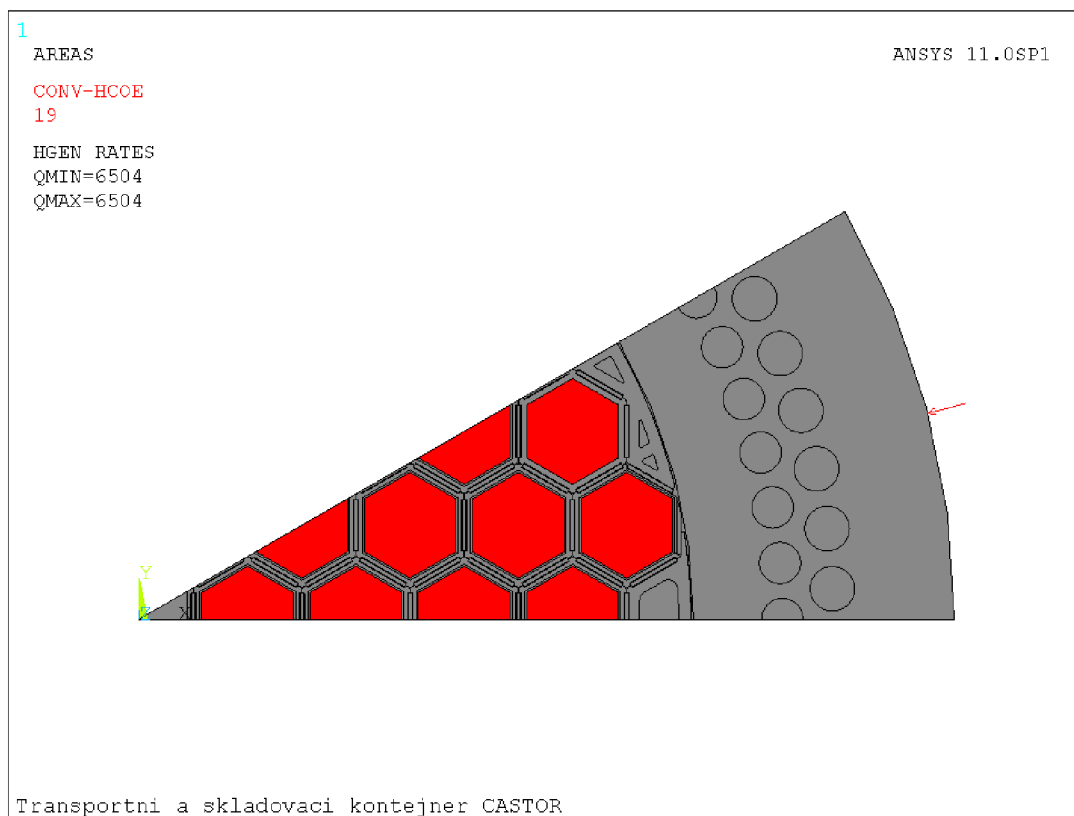
Prostup tepla mezi komponentami koše, mezerou mezi košem a tělesem obalového souboru je modelován pouze vedením tepla héliovou vrstvou.

Ve výpočtu není uvažován vliv proudění hélia uvnitř obalového souboru.

Ve všech případech je uvnitř z důvodu relativně nízkých teplot zanedbán vliv přenosu tepla zářením.

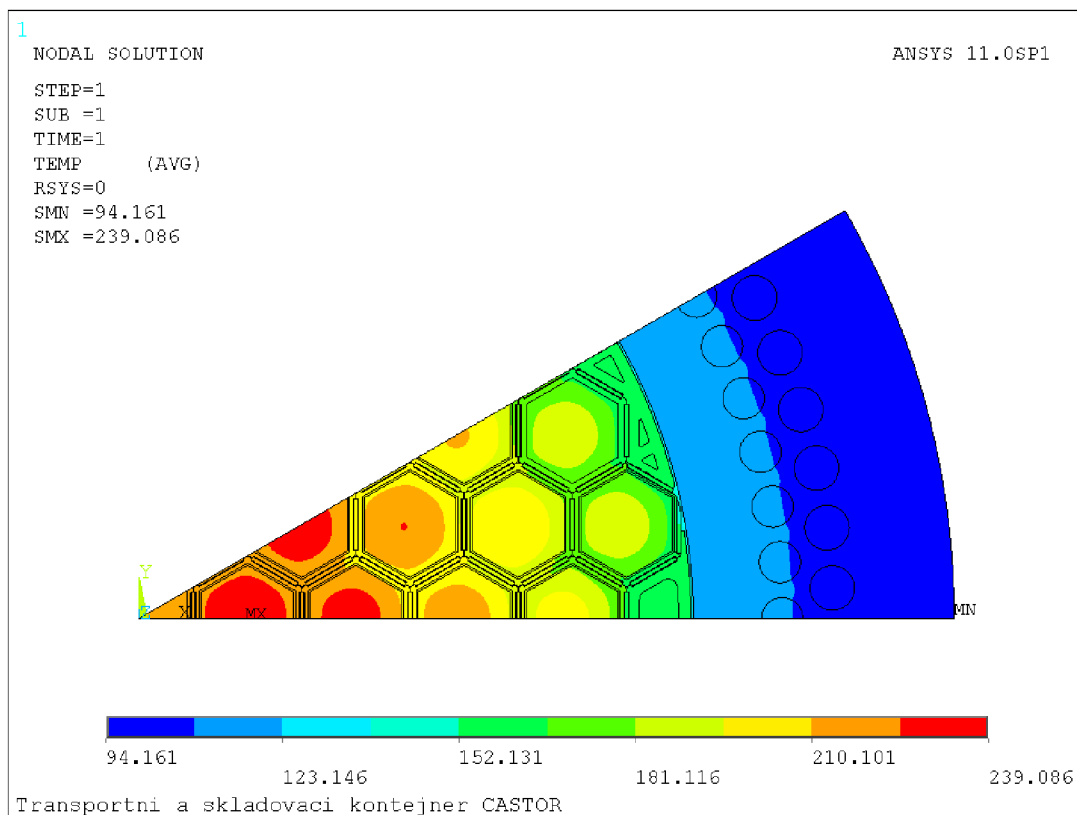
Obrázek uvedený níže zobrazuje umístění objemových zdrojů tepla uvnitř kontejneru. Odvod tepla je uvažován v radiálním směru konvekcí na vnějším povrchu. Hodnota koeficientu přestupu tepla $19 \text{ W/m}^2\text{K}$ byla vypočtena v předchozí analytické části.

Obrázek 34 Umístění objemových elementů - zdrojů tepla



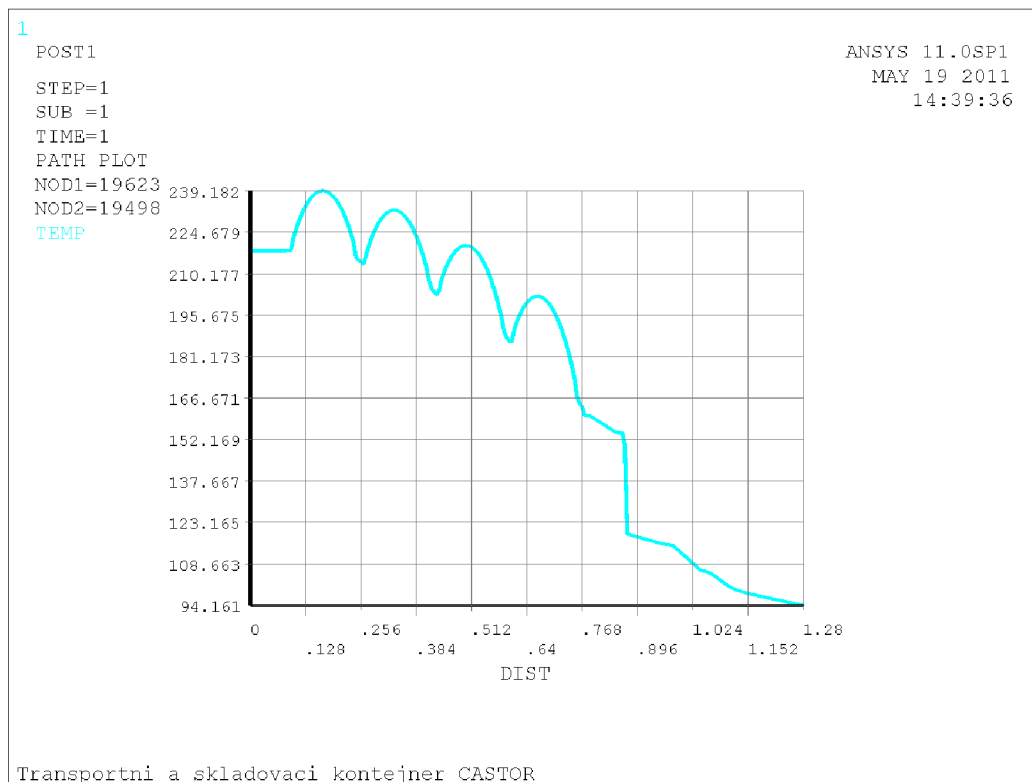
Výsledné rozložení teplot uvnitř kontejneru znázorňuje obrázek 35. Zobrazuje situaci uvnitř čerstvě zaplněného obalového souboru při generovaném výkonu 24,5 kW a okolní teplotě 30 °C. Maximální dosažená teplota je necelých 240 °C, což je vzhledem k vyšším teplotám za provozu reaktoru přijatelná hodnota.

Obrázek 35 Teplotní pole v řezu



Průběh teplot ve směru x-ové souřadnice po poloměru je názorný z následujícího grafu na obrázku 36.

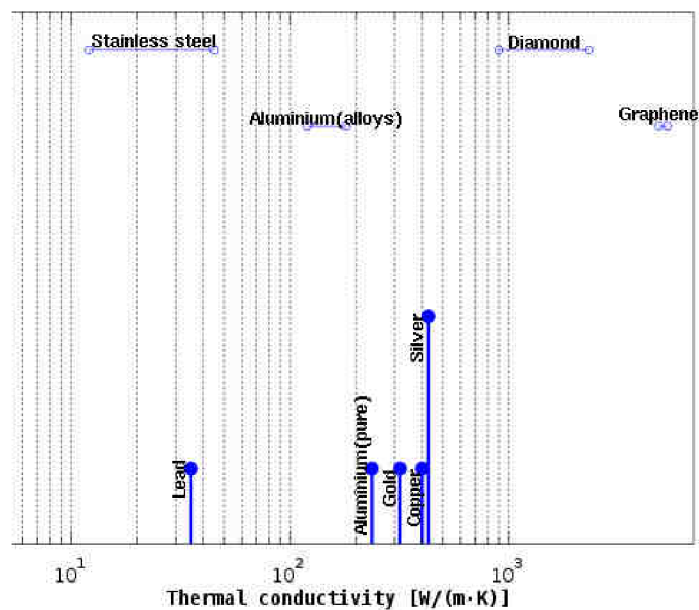
Obrázek 36 Průběh teploty po poloměru



8 VARIANTY NUMERICKÉHO ŘEŠENÍ

Jako alternativy materiálu koše Škoda 440/84M byly vybrány ty s dobrou tepelnou vodivostí, přehled různých materiálů s $\lambda > 10$ W/mK (při 20°C) viz obrázek níže.

Obrázek 37 Experimentálně zjištěné tepelné vodivosti různých materiálů [28]



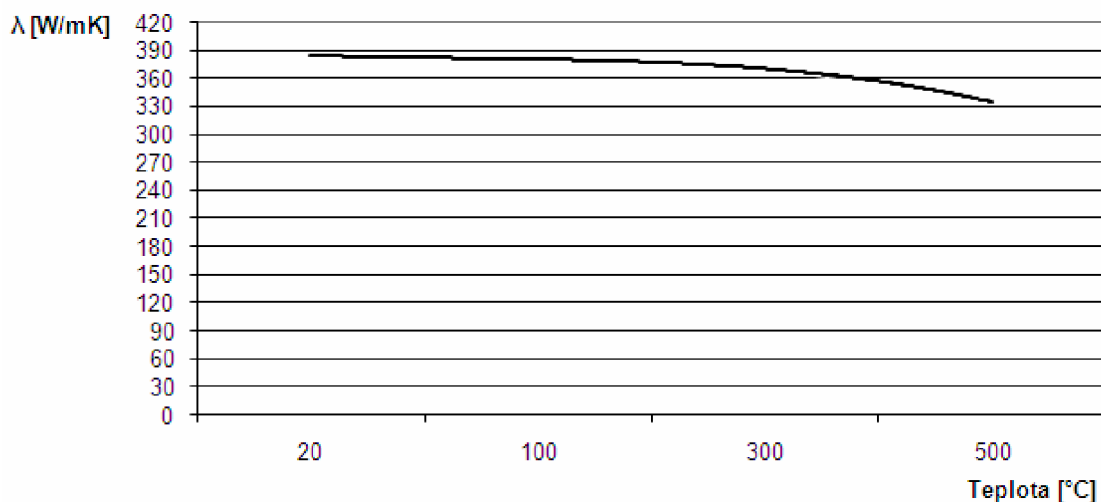
Volba byla provedena za současného zohlednění jejich možné ceny a za předpokladu přijatelných mechanických vlastností. Do výpočtu byly dosazeny tepelné vodivosti těchto prvků (jejich slitin) či ocelí:

- Měď
- Hliník
- Uhlíková; nerezová ocel

8.1 MĚĎ A MĚDENÉ SLITINY

Koeficient tepelné vodivosti byl pro daný rozsah teplot tabelován u čisté mědi (C10100), jeho závislost je vykreslena níže v grafu 2. Koeficienty pro následující materiály v daném rozsahu zjištěny nebyly, byly aproximovány dle trendu koeficientu pro C10100 se zohledněním hodnoty daného materiálu při 20°C.

Graf 2 Závislost koef. tepelné vodivosti Cu na teplotě [28]



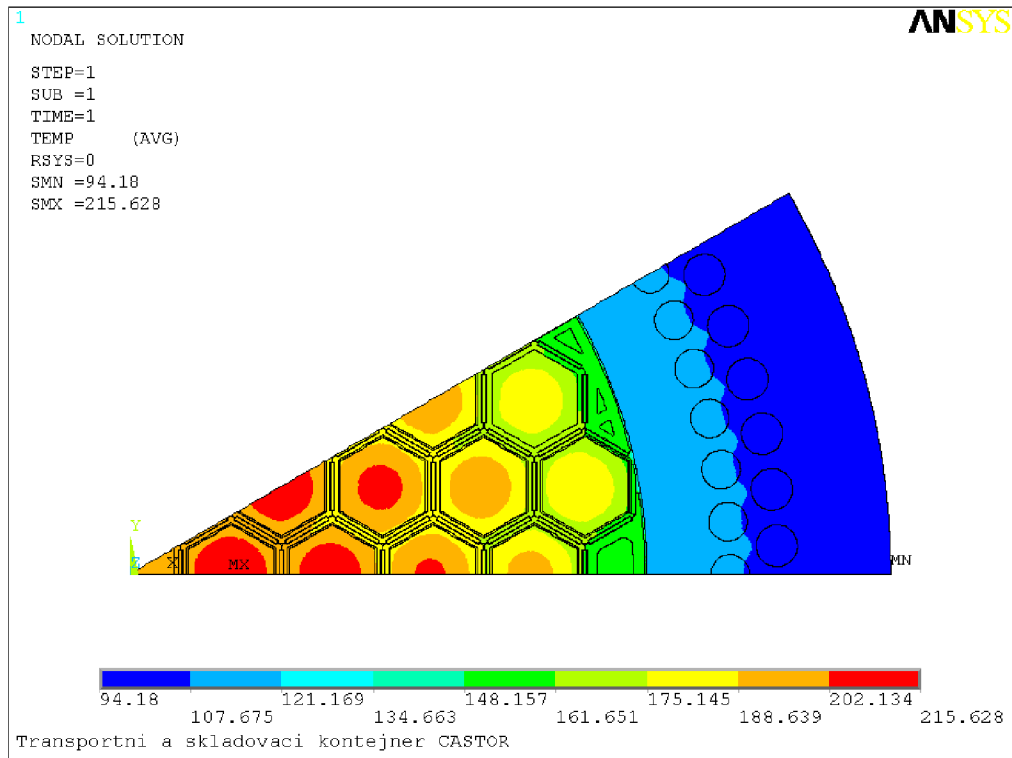
Tabulka 4 uvádí uvažované měděné materiály, jejich složení a v posledním sloupci nejvyšší dosažené teploty uvnitř kontejneru.

Tabulka 4 Varianty výpočtu [28]

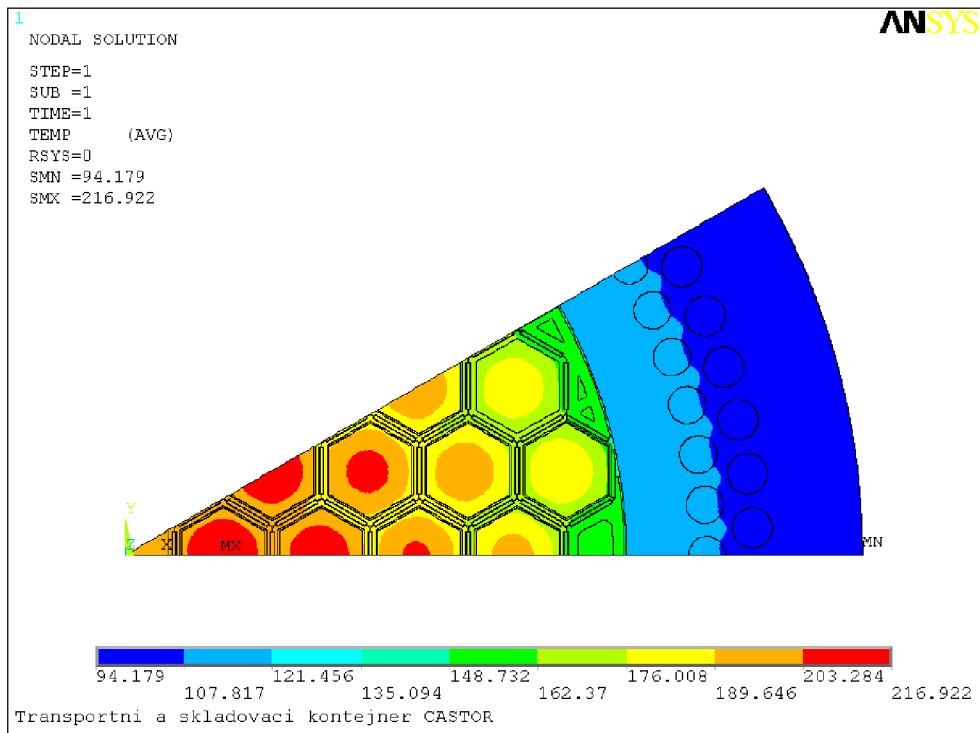
Materiál	Složení	Hmotnostní intervaly jednotlivých složek [%]				λ [W/mK] pro 20°C	Max. teplota [°C]
		1	2	3	4		
C10100	-	99,99 Cu min	-	-	-	386	215,6
C15000	99,85Cu- 0,15Zr	-	0,13-0,2 Zr	-	-	367	216,9
C50710	97,7Cu- 2,0Sn-0,3Ni	-	1,7-2,3 Sn	0,1-0,4 Ni	0,35 P max	154	249,5
C52100	92Cu-8Sn	90,5-92,8 Cu	7-9 Sn	0,03-0,35 P	0,05 Pb max	62	315,3
C86300	64Cu-26Zn- 3Fe-3Al- 4Mn	60-68 Cu	2-4 Fe	3-7,5 Al	2,5-5 Mn	36	377,2

Na následujících pěti obrázcích je zobrazeno rozložení teploty v řezu pro každý zmiňovaný materiál.

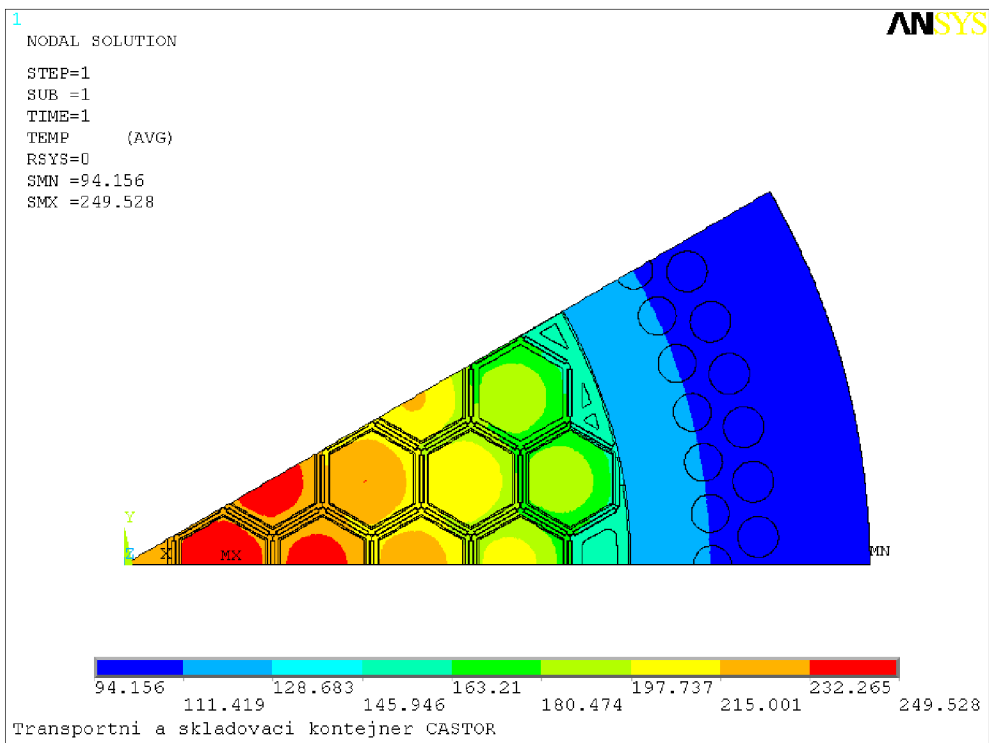
Obrázek 38 Teplotní pole pro materiál C10100



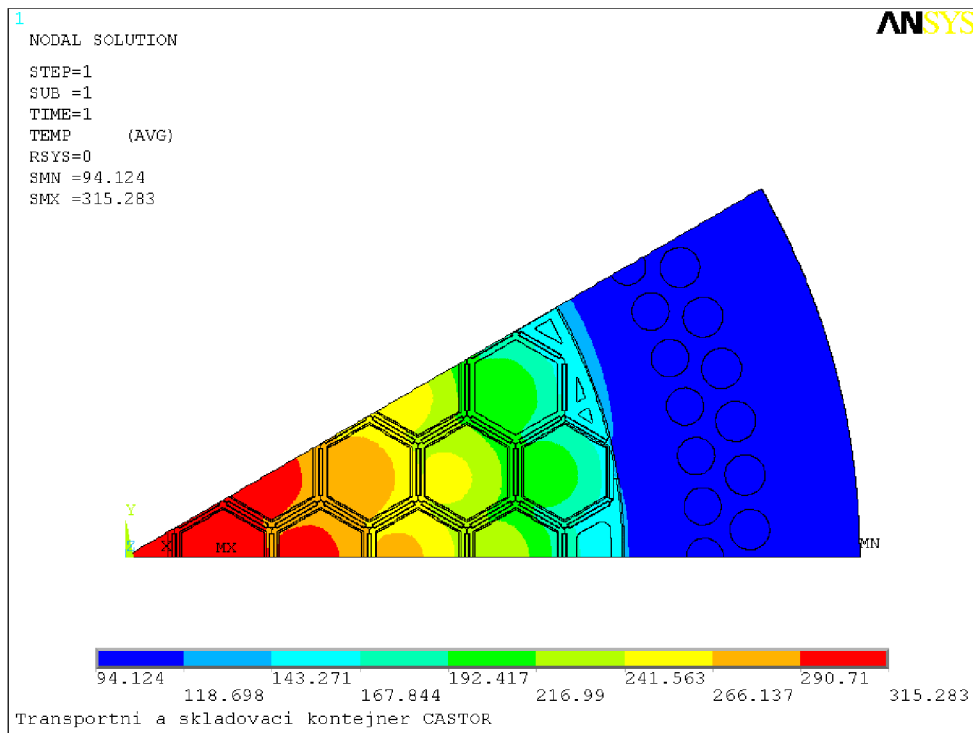
Obrázek 39 Teplotní pole pro materiál C15000



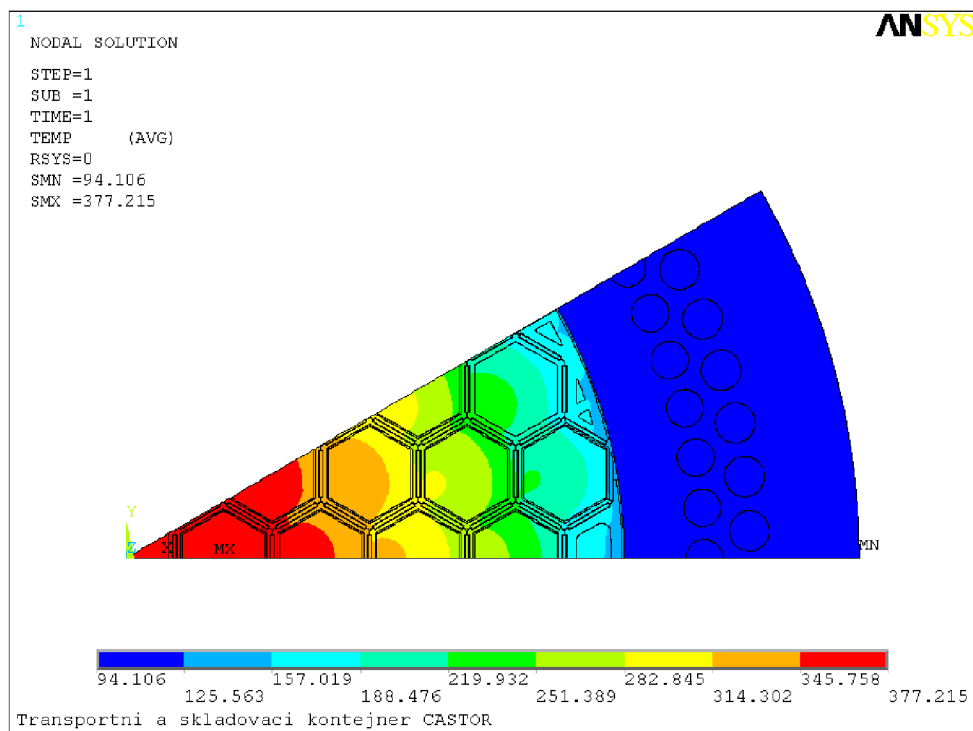
Obrázek 40 Teplotní pole pro materiál C50710



Obrázek 41 Teplotní pole pro materiál C52100



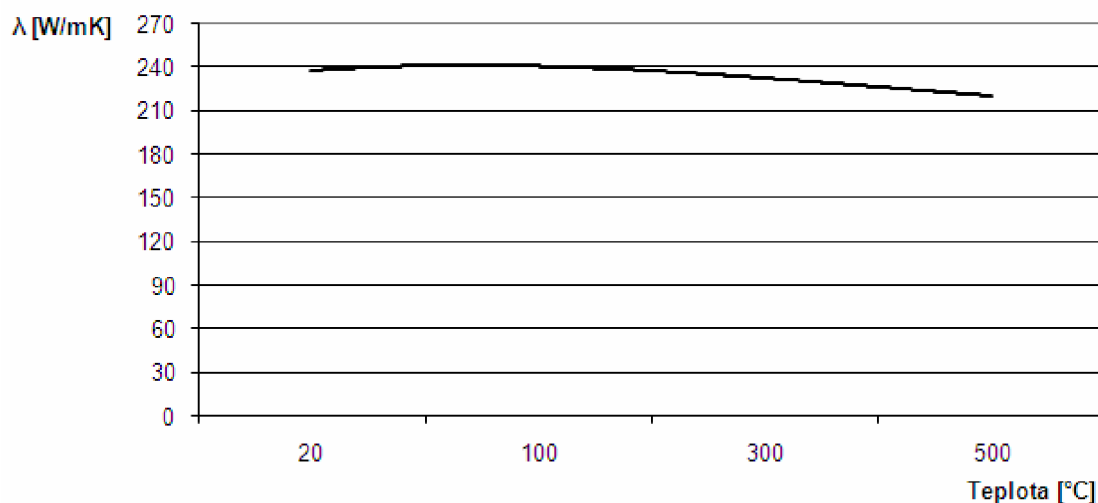
Obrázek 42 Teplotní pole pro materiál C86300



Hliník a hliníkové slitiny

Koeficient tepelné vodivosti byl pro daný rozsah teplot tabelován u čistého hliníku, jeho závislost je patrná níže v grafu 3. Koeficienty pro následující materiály v daném rozsahu tabelovány nebyly, byly aproximovány dle trendu koeficientu pro čistý hliník se zohledněním hodnoty daného materiálu při 20°C.

Graf 3 Závislost koef. tepelné vodivosti Al na teplotě [29]



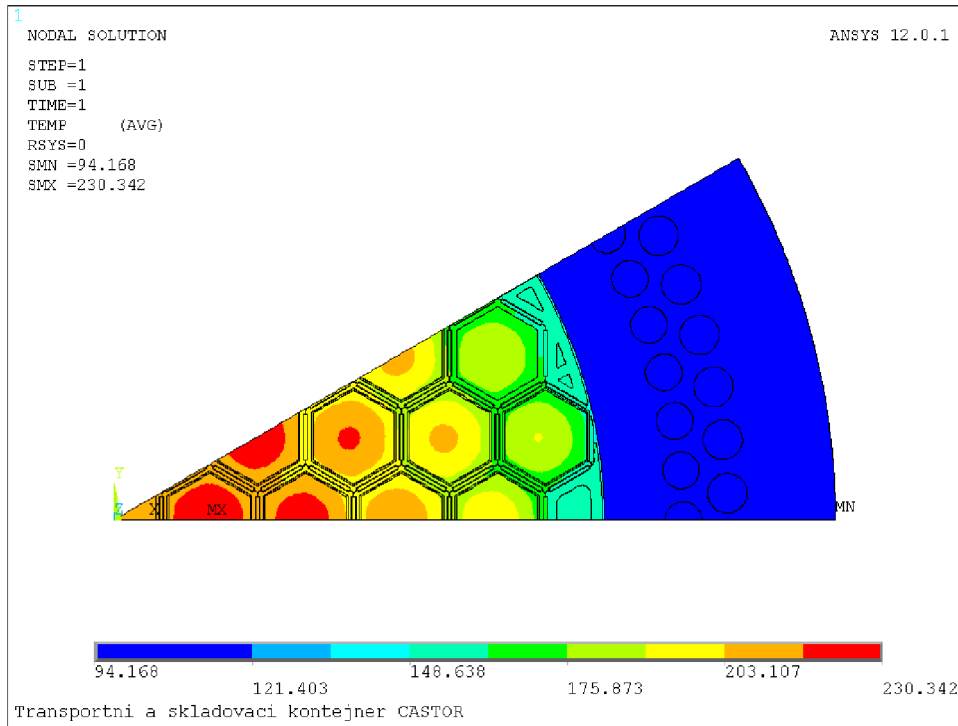
V tabulce 5 je uveden název, procentuelní složení, koeficient tepelné vodivosti a maximální dosažená teplota v palivu při použití daného materiálu.

Tabulka 5 Varianty výpočtu [30]

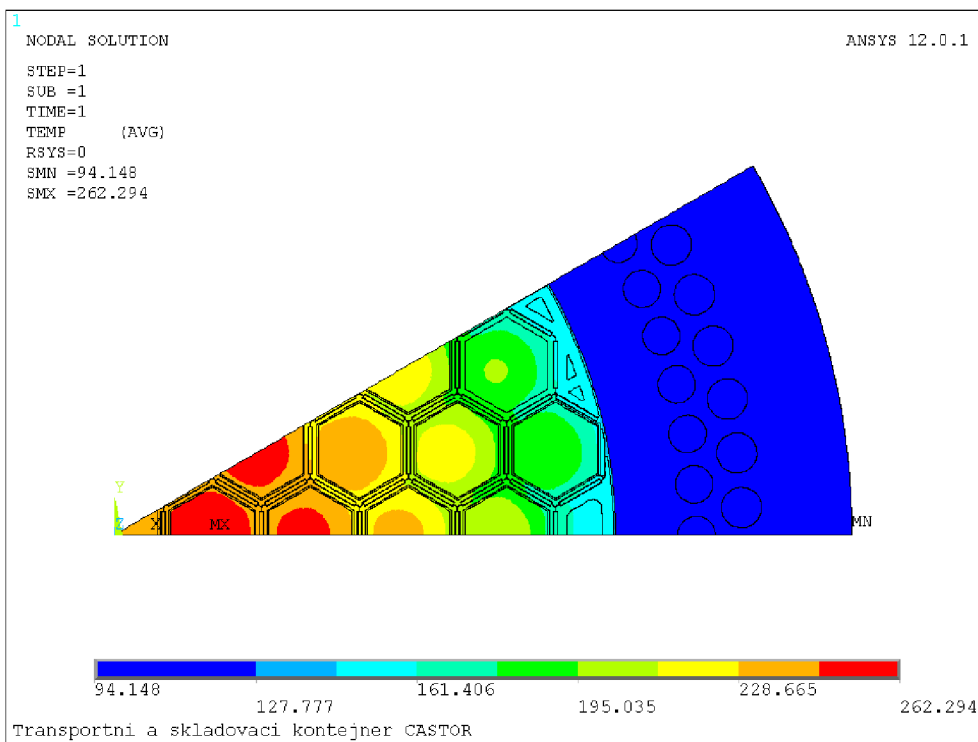
Materiál	Složení	Hmotnostní intervaly jednotlivých složek [%]				λ [W/mK] pro 20°C	Max. teplota [°C]
		1	2	3	4		
A91100	-	99 Al min	0,05-0,2 Cu	0,95 Si+ +Fe max	0,05 Mn max	222	230,3
A92219	AlCu6Mn	91,5-93,8 Al	5,8-6,8 Cu	0,2-0,4 Mn	0,3 Fe max	112	262,3
A95052	-	95 Al	2,2-2,8 Mn	0,15-0,35 Cr	0,4 Fe max	138	251
A95083	-	93 Al	4-4,9 Mn	0,4-1 Mg	0,05-0,25 Cr	120	258,6
A13840	-	84 Al	10,5-12 Si	3-4,5 Cu	1,3 Fe max	92	275,9

Na následujících pěti obrázcích je zobrazeno rozložení teploty v řezu pro každý zmiňovaný materiál.

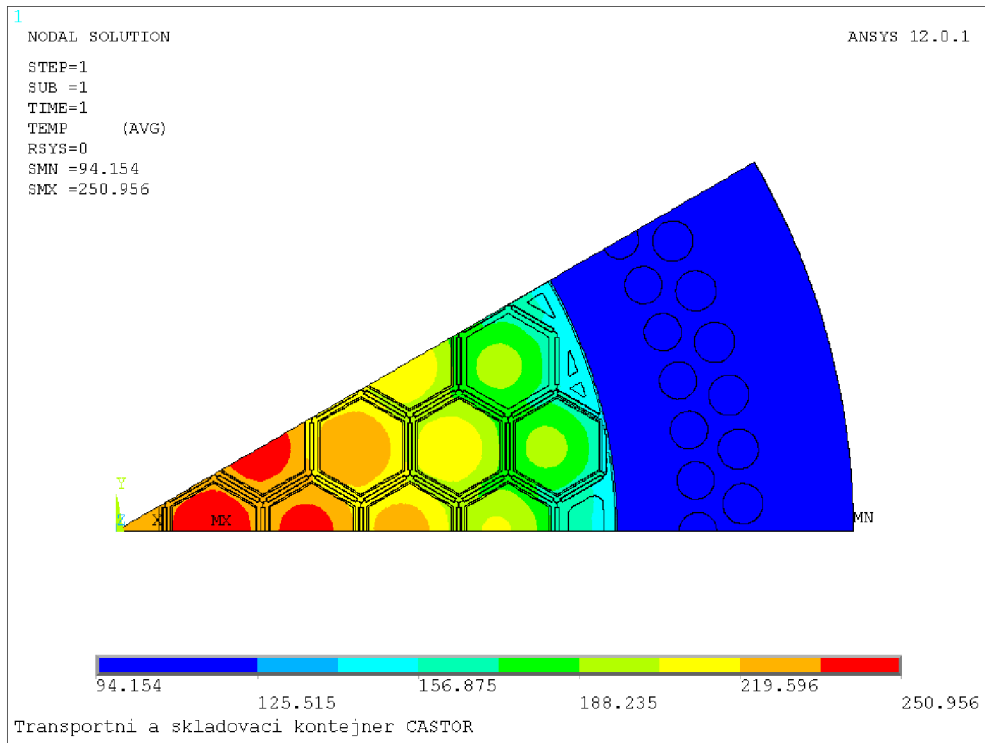
Obrázek 43 Teplotní pole pro materiál A91100



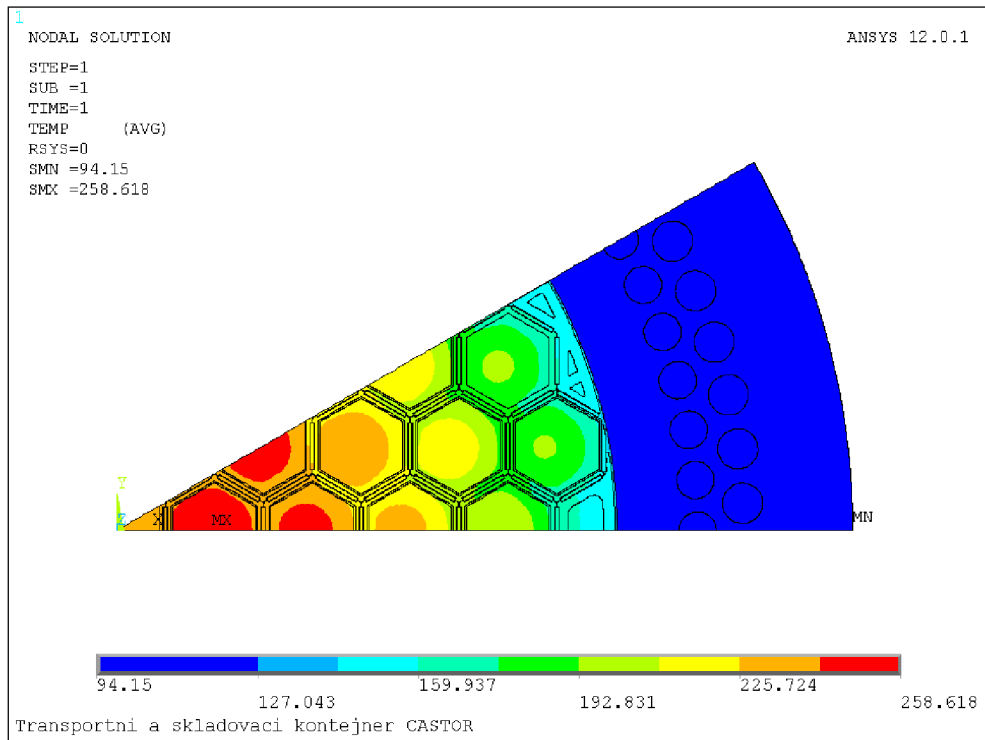
Obrázek 44 Teplotní pole pro materiál A92219



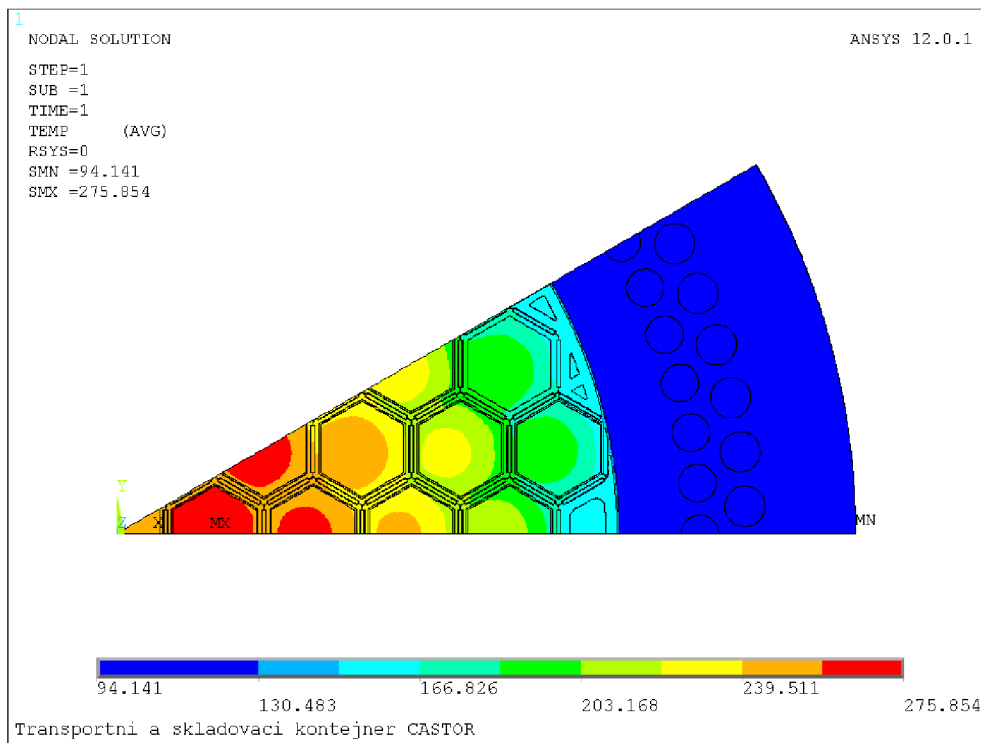
Obrázek 45 Teplotní pole pro materiál A92052



Obrázek 46 Teplotní pole pro materiál A95083



Obrázek 47 Teplotní pole pro materiál A13840

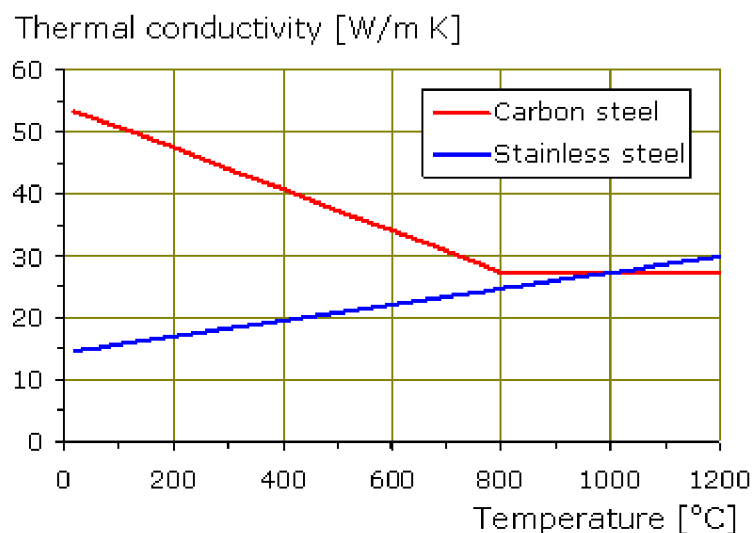


8.2 UHLÍKOVÁ A NEREZOVÁ OCEL

Díky svým mechanickým vlastnostem se oceli výborně hodí jako výztuhy zmenšující trvalé deformace. Jejich tepelné vlastnosti jsou ale pro tuto aplikaci méně vhodné, a proto je zde uvedeno pouze jedno zástupné řešení od každého druhu.

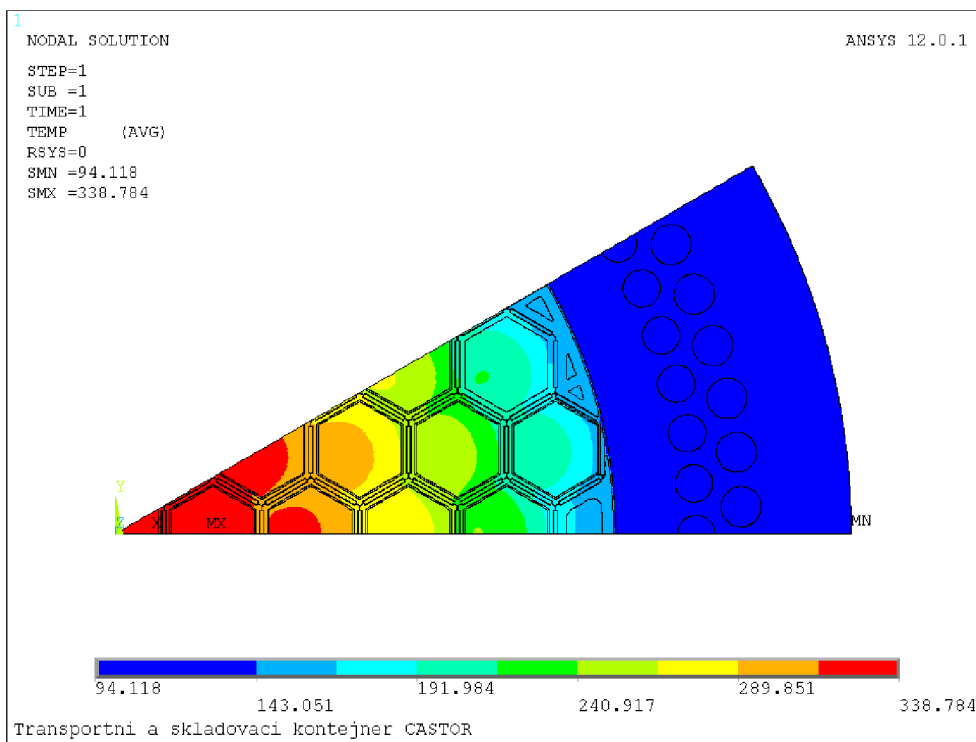
Hodnoty tepelné vodivosti ocelí s mění se teplotou je na následujícím grafu 4.

Graf 4 Závislost koef. tepelné vodivosti uhlíkové a nerezové oceli na teplotě [31]

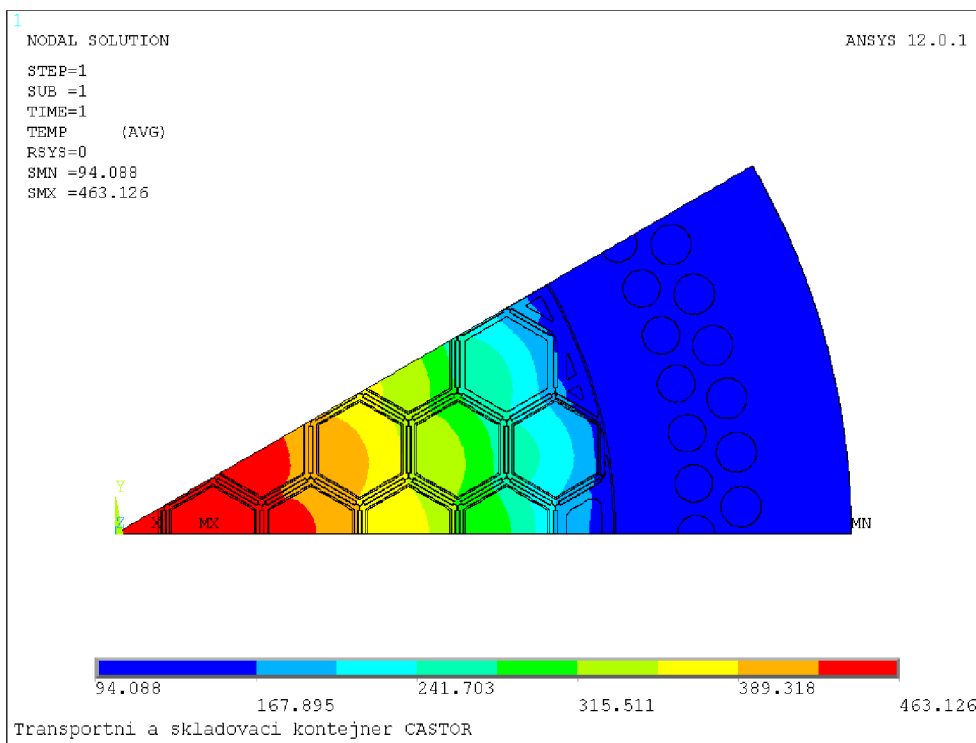


Dva obrázky uvedené na následující straně ukazují neuspokojivé výsledky maximálních teplot.

Obrázek 48 Teplotní pole pro uhlíkovou ocel



Obrázek 49 Teplotní pole pro nerezovou ocel



ZÁVĚR

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

V duchu této konzervativní myšlenky je provedena i praktická část této práce..

Práce se nezabývá kontejnery pro konečné hlubinné uložení. Požadavky na jejich trvanlivost, množství zbytkového tepla i jiné parametry jsou zcela na odlišné úrovni.

Text pojednává o vlastnostech skladovacích kontejnerů a meziskladování. Varianty tepelného výpočtu jsou řešeny jako dvojdimenzionální úlohy v řezu ve střední výšce válcového kontejneru. Vždy je zanedbán osový směr tepelného toku a teplo je odváděno po poloměru směrem od středu ven do okolního vzduchu. V reálné situaci se samozřejmě část tepelného toku přenesse dnem do podkladu a část víkem do vzduchu nad ním. Tento předpoklad zcela jistě ovlivňuje výpočet, a výsledné hodnoty teplot budou vycházet vyšší oproti skutečnosti.

Varianta analytického výpočtu zkoumala rozložení teploty na vnější a vnitřní stěně kontejneru při teplotě okolí 30 °C. Po homogenizaci materiálu (zanedbání odlišných vlastností polyetylenového stínění) nezbytné pro provedení řešení jsou výsledné teploty $T_{out} = 81 \text{ °C}$ a $T_{in} = 93 \text{ °C}$. Všestrannější varianta numerického řešení v systému ANSYS hledala celkové teplotní pole v řezu při stejné okolní teplotě, které dosáhlo maxima $T_{max} = 239 \text{ °C}$ dle očekávání v ose kazety umístěné blízko středu koše a minima $T_{min-out} = 94 \text{ °C}$ na vnější stěně. Zajímavé je srovnání teplot na vnitřní stěně, kdy v numerickém řešení vychází $T_{in} = 123 \text{ °C}$. Teplotní rozdíl na vnitřní stěně $\Delta T_{in} = 30 \text{ °C}$ mezi metodami je způsoben výše zmíněnou homogenizací, která v postatě odstraňuje izolační vlastnost polyetylénu. Teploty na vnější stěně vykazují menší rozdíl $\Delta T_{out} = 13 \text{ °C}$.

Limitní teplota pokrytí palivových proutků ze slitiny Zr-Nb, při jejímž překročení vzniká tečení materiálu, je 350 °C. Vznikla tedy rezerva 111 °C, kterou je možné ještě teoreticky zvýšit rozmístěním palivových souborů s nadprůměrným tepelným výkonem mimo střed koše.

V poslední části práce byly zkoumány různé varianty numerického výpočtu v závislosti na materiálu šestihranných trubek. Tyto variantní výpočty ve stacionární úloze zohledňují jen a pouze vliv koeficientu tepelné vodivosti materiálu a hledají následné rozložení teploty v řezu. Práce nehledí na jakékoli mechanické vlastnosti, radiační poškození či jiné hledisko, které musí být samozřejmě v praxi bezpodmínečně splněno také. Obtížnost a časová náročnost reálného komplexního výpočtu je velmi dobře vidět při bližším zkoumání v minulosti úspěšného návrhu, zkoušek a následného licencování koše Škoda pro Castor®440/84M, který prováděl čtyřčlenný tým po dobu šesti let.

V práci bylo řešeno dalších 10 variant pro vybrané měděné a hliníkové slitiny. Pro demonstraci významu koeficientu tepelné vodivosti byly uvedeny další 2 varianty s uhlíkovou a nerezovou ocelí. Obtížnost realizace komplikuje fakt, že teplotní vodivost není v rozsahu teplot konstantní, ale je funkcí teploty. Tyto potřebné závislosti jednotlivých slitin jsou nákladně zjišťovány experimentálně, a proto jsou zdarma nedostupné. Navíc mohou být chráněné licenci jako duševní vlastnictví firem, které si je v minulosti odměřily. Bylo proto přistoupeno k aproximaci založené na známém průběhu součinitele pro jednotlivé prvky. Z posuzovaných materiálů nejlépe uspěly slitiny hliníku, které se vždy vešly pod bezpečnostní hranici 350 °C. Nejnižší teploty 215,6 °C bylo dosaženo pro čistou měď, kterou však nelze použít například vzhledem k chemickým vlastnostem.

V kombinaci s případnou pevnostní analýzou by pravděpodobně málokterý dostupný konstrukční materiál výborně plnil všechny potřebné požadavky. Velmi logickým krokem se tudíž jeví použít kombinaci různých materiálů, kde každý plní velmi dobře některé hledisko. V budoucnu lze jistě očekávat vývoj tímto směrem. Myšlenka byla již realizována u koše pro Castor®1000/19 používaný v jaderné elektrárně Temelín, kde jsou po výšce prostrídány ocelové a hliníkové plechy a kde každý z nich plní jinou funkci než sousední.

Vypočtené teploty uvnitř nejsou v praxi po zavezení kontejneru dosahovány jednak kvůli axiálnímu vedení tepla a mimo jiné i z důvodů roztažnosti vnitřní vestavby, která přilne na vnitřní stěnu, a způsobí lepší odvod tepla z koše do základního materiálu.

Od roku 2006, kdy jsou na EDU používány modernizované kontejnery řady M, bylo naplněno celkem 16 kusů s průměrným zbytkovým výkonem 16,7 kW. Nejvyšší zbytkový výkon kontejneru činil 19,65 kW. Teploty na modelu jsou stanoveny pro maximální výkon 24,5 kW, což vzhledem k reálnému průměru a dosavadnímu reálnému maximu představuje 46%ní resp. 24%ní nárůst generovaného tepla. Teplota dna žeber se reálně pohybuje v rozmezí 55 °C až 62 °C oproti dosaženým 94 °C na modelu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VANĚK, Václav, Ing. *Bez jádra to nepůjde* [online]. Praha: ČEZ, a.s., 2008 [cit. 2011-05-02]. Energetické využití jaderné energie, s. 141, Dostupné z WWW: <http://www.ujv.cz/c/document_library/get_file?uuid=57bbed05-099b-4e9f-a2fb-4123212b7b7b&groupId=10504>.
- [2] *Mineral* [online]. 2011 [cit. 2011-04-30]. Geologie ložiska Zálesí. Dostupné z WWW: <<http://www.mineral.cz/vystava-a-kniha-javornicky-uran-clanek-2007101401.html>>.
- [3] SANDE [online]. 2009 [cit. 2011-05-02]. Thorium Reactors. Dostupné z WWW: <<http://jcsande.blogspot.com/2010/09/thorium-reactors.html>>.
- [4] DUFKOVÁ, Marie. Co je to MOX. *3POL* [online]. 2011-04-18, [cit. 2011-05-03]. Dostupný z WWW: <<http://3pol.cz/1035-co-je-to-mox>>.
- [5] ŠEN, Hugo, Ing. Přednášky z předmětu Jaderná energetika. 2010.
- [6] *Element Investing* [online]. 2010 [cit. 2011-05-01]. Investing in Plutonium. Dostupné z WWW: <http://www.elementinvesting.com/investing_in_plutonium.htm>.
- [7] S. ULMER-SCHOLLE, Dana. Uranium Enrichment. *The New Mexico Bureau of Geology & Mineral Resources* [online]. 2009, [cit. 2011-04-25]. Dostupný z WWW: <<http://geoinfo.nmt.edu/resources/uranium/enrichment.html>>.
- [8] Obohacování jaderného paliva. *Fyzmatik.píše* [online]. 2009-01-28, [cit. 2011-04-27]. Dostupný z WWW: <<http://fyzmatik.pise.cz/96528-obohacovani-jaderneho-paliva.html>>.
- [9] *BLOG PRINCETON* [online]. 2010 [cit. 2011-03-25]. NUCLEAR ENERGY: FUEL OF THE FUTURE?. Dostupné z WWW: <http://blogs.princeton.edu/chm333/f2006/nuclear/03_enrichment/02_methods/>.
- [10] HARGROVE, STEVEN. Laser technology follows in Lawrence's footsteps. *Lawrence Livermore national laboratory* [online]. 2010, [cit. 2011-04-21]. Dostupný z WWW: <<https://www.llnl.gov/str/Hargrove.html>>.

[11] Laser Uranium Enrichment Makes a Comeback. *Energy deals blog* [online]. 2010-11-18, [cit. 2011-05-05]. Dostupný z WWW: <<https://energydeals.wordpress.com/2010/11/18/laser-uranium-enrichment-makes-a-comeback/>>.

[12] MARCELL, Jan. *Přenos tepla v úložném obalovém souboru a jeho vliv na okolí* [online]. Brno: 2009. 80 s. Diplomová práce. VUT Brno. Dostupné z WWW: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18703>.

[13] OTČENÁŠEK, Petr. Odpady z palivového cyklu jaderných elektráren. *Vesmír* [online]. 2005, 84, [cit. 2011-05-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.vesmir.cz/clanek/odpady-z-palivoveho-cyklu-jadernych-elektraren>>.

[14] *Jaderný odpad* [online]. 2009 [cit. 2011-05-10]. Mezisklady vyhořelého jaderného paliva. Dostupné z WWW: <<http://www.jaderny-odpad.cz/mezisklady-vyhoreleho-paliva.htm>>.

[15] *ATOM INFO* [online]. 2010 [cit. 2011-05-02]. V JE Temelín převezli kontejner s vyhořelým palivem do skladu. Dostupné z WWW: <<http://atominfo.cz/2010/09/v-je-temelin-prevezli-kontejner-s-vyhorelym-palivem-do-skladu/>>.

[16] ČEZ [online]. 2011 [cit. 2011-05-15]. Skupina ČEZ. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/uvod.html>>.

[17] ŠKODA JS, a. s. [online]. 2010 [cit. 2011-05-03]. KONTEJNERY PRO TRANSPORT A SKLADOVÁNÍ. Dostupné z WWW: <<http://www.skoda-js.cz/cs/vyroby-a-sluzby/skladovani-vyhoreleho-jaderneho-paliva/kontejnery-pro-transport-a-skladovani.shtml>>.

[18] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2001. 160 s. ISBN 80-214-2029-4.

[19] ŠVAŘÍČEK, Tomáš. *Analýza teplotního pole kontejneru pro použité palivo* [online]. Brno: 2009. 61 s. Bakalářská práce. VUT Brno. Dostupné z WWW: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16363>.

[20] *Firemní materiály ŠKODA JS, a. s.*, Plzeň: 2011.

[21] *Technické zařízení budov* [online]. 2002-09-30 [cit. 2011-05-15]. Hodnoty vody a vzduchu pro výpočet přestupu tepla. Dostupné z WWW: <<http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/55-hodnoty-vody-a-vzduchu-pro-vypocet-prestupu-tepla>>.

[22] *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. 2010 [cit. 2011-04-23]. Zkušební provoz skladu vyhořelého jaderného paliva Temelín. Dostupné z WWW: <http://www.sujb.cz/?c_id=1050>.

[23] Mechanické analýzy koše ŠKODA 440/84-M při pádové zkoušce. *Energetické fórum* [online]. 2009, [cit. 2011-05-15]. Dostupný z WWW: <http://zcu.cz/ntc/odbory/MDP/kos_SKODA440.PDF>.

[24] FUNKE, Th; HENIG, Ch.; CASTOR®1000/19: Development and Design of a New Transport and Storage Cask. [online]. 2008-09-25, [cit. 2011-04-24]. Dostupný z WWW: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/048/40048126.pdf>.

[25] HUSZÁK, Zoltán; BENCZE, János. STORAGE OF SPENT NUCLEAR FUEL IN MVDS OF PAKS NPP. [online]. 2004, [cit. 2011-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.dysnai.org/Reports/2000-2004/2004/3.pdf>>.

[26] *Javys* [online]. [cit. 2011-05-19]. Jádrová a vyradovacia spoločnosť. Dostupné z WWW: <www.javysk.sk>.

[27] THE NUCLEAR HOT POTATO. *Chemical & Engineering News* [online]. 2005, [cit. 2011-05-17]. Dostupný z WWW: <<http://pubs.acs.org/email/cen/html060705090710.html>>. ISSN 0009-2347.

[28] DAVIS, Joseph R. *Copper and copper alloys* [online]. [s.l.] : ASM International, 2001 [cit. 2011-05-01]. Properties of Wrought Copper and Copper Alloys, s. 652. Dostupné z WWW: <http://books.google.com/books?id=sxkPJzmkhnUC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. ISBN 0-87170-726-8.

[29] *Efunda* [online]. 2009 [cit. 2011-04-21]. Thermal Conductivity: Aluminum. Dostupné z WWW: <http://www.efunda.com/materials/elements/TC_Table.cfm?Element_ID=al>.

[30] DAVIS, Joseph R. *Aluminium and Aluminium Alloys* [online]. ASM International, 1993 [cit. 2011-04-26]. Properties of Unalloyed Magnesium, s. 784. Dostupné z WWW: <http://books.google.com/books?id=Lskj5k3PSIcC&printsec=frontcover&dq=aluminium+and+aluminium+alloys&hl=cs&ei=STXdTZasJcXsOYzyoJUP&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CCkQ6AEwAA#v=onepage&q&f=true>. ISBN 978-0-87170-496-2.

[31] Stainless Steel Thermal Properties. *One Stop Shop in Structural Fire Enineering by the University of Manchester*[online]. 2007, [cit. 2011-04-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/materialInFire/Steel/StainlessSteel/thermalProperties.htm>>.

[32] Chernobyl: New Safe Confinement and Spent Fuel Storage Facility. In European Bank [online]. London, United Kingdom : 2010 [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <<http://chernobyltwentyfive.org/7794%20chernobyl-2.pdf>>.

Seznam použitých zkratek a symbolů

Značka	Význam	Jednotka
\dot{Q}	Tepelný tok	[W]
\dot{q}	Měrný tepelný tok	[Wm ⁻²]
T	Teplota	[K]
T_{in}	Teplota vnitřní stěny kontejneru	[°C]
T_{out}	Teplota povrchu kontejneru	[°C]
T_{∞}	Teplota okolí kontejneru	[°C]
T_f	Střední (určující) teplota	[°C]
λ	Součinitel tepelné vodivosti kontejneru	[W/mK]
λ_v	Součinitel tepelné vodivosti vzduchu	[W/mK]
δ	Tloušťka tělesa	[m]
S	Plocha přestupu tepla	[m ²]
V	Objem	[m ³]
ρ	Hustota	[kg/m ³]
R_{out}	Vnitřní poloměr kontejneru	[m]
R_{in}	Vnější poloměr kontejneru	[m]
φ	Natočení	[rad]
α	Součinitel přestupu tepla	[W/m ² K]
α_z	Součinitel přestupu tepla žeber	[W/m ² K]
L_z	Výška žebrování	[m]
a	Teplotní vodivost	[m ² /s]
A_v	Vyhoření	[MWd/kg]
c	Měrná tepelná kapacita	[J/kgK]
E_n	Energetická zásoba reaktoru	[J]
g	Tíhové zrychlení	[m/s ²]
Gr	Grasshoffovo číslo	[-]
L	Výška	[m]
m	Hmotnost	[kg]
M_p	Množství paliva	[kg]
Nu	Nusseltovo číslo	[-]
Pr	Prandtlovo číslo	[-]
r	Poloměr	[m]
t	Čas	[s]
U	Vnitřní energie	[J]
ν	Kinematická viskozita vzduchu	[m ² /s]
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany	
EBO	Jaderná elektrárna Jaslovské Bohunice	
MOX	Mixed oxid fuel	

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Technické údaje CASTOR®440/84 a CASTOR®440/84M	34
Tabulka 2	Technické údaje CASTOR®1000/19	37
Tabulka 3	Základní materiálové vlastnosti použité pro výpočet	56
Tabulka 4	Varianty výpočtu	70
Tabulka 5	Varianty výpočtu	74

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Minerál uranit [2]	16
Obrázek 2	Monazit obsahující thorium [3].....	17
Obrázek 3	Plutonium [5].....	19
Obrázek 4	Porézní membrána [7]	21
Obrázek 5	Centrifugální separace [9].....	22
Obrázek 6	Paralelní zapojení odstředivek [7]	22
Obrázek 7	Fotoionizace [11]	23
Obrázek 8	Schéma otevřeného palivového cyklu [5].....	25
Obrázek 9	Schéma uzavřeného palivového cyklu [5].....	26
Obrázek 10	Štěpení uranového paliva [4]	26
Obrázek 11	Štěpení MOX paliva [4]	27
Obrázek 12	Rozdílná struktura povrchu u typů CONSTOR a CASTOR [19]..	29
Obrázek 13	Betonové kontejnery - USA [27].....	30
Obrázek 14	První dukovanský mezisklad - již zaplněný kontejnery CASTOR®440/84 [15]	35
Obrázek 15	Pohled do otevřeného OS CASTOR [23]	35
Obrázek 16	Detail koše ŠKODA pro OS VVER 440 [17]	36
Obrázek 17	Výpočtový model MKP [23]	36
Obrázek 18	První temelínský mezisklad zaplněný jedním kontejnerem CASTOR®1000/19 [22]	38
Obrázek 19	Koš kontejneru CASTOR®1000/19 [24]	39
Obrázek 20	Svislý řez modelem skladu Paks [25].....	40
Obrázek 21	Nerezový koš pro vyhořelé palivo [26]	41
Obrázek 22	Interní přepravní kontejner [26]	42
Obrázek 23	Mezisklad Černobyl, Ukrajina [32].....	43
Obrázek 24	Koš kontejneru VPVR/M [17].....	44
Obrázek 25	Vnitřní koš kontejneru CASTOR 440/84 [17]	44
Obrázek 26	Elementární objem a tepelné toky v kartézském souřadnicovém systému [18]	46
Obrázek 27	Elementární objem v cylindrickém souřadném systému [18]	48
Obrázek 28	Teplovní průběh na povrchu válcové stěny [19].....	50
Obrázek 29	Podélný řez kontejnerem CASTOR®440/84M [20]	55
Obrázek 30	Detail B - žebrování povrchu [20].....	61
Obrázek 31	Základní šestihranný profil [20]	63
Obrázek 32	Radiální výseč [20]	64
Obrázek 33	Palivový soubor VVER 440 [5].....	65
Obrázek 34	Umístění objemových elementů - zdrojů tepla.....	66
Obrázek 35	Teplovní pole v řezu.....	67

Obrázek 36	Průběh teploty po poloměru.....	68
Obrázek 37	Experimentálně zjištěné tepelné vodivosti.....	69
Obrázek 38	Teplotní pole pro materiál C10100.....	71
Obrázek 39	Teplotní pole pro materiál C15000.....	72
Obrázek 40	Teplotní pole pro materiál C50710.....	72
Obrázek 41	Teplotní pole pro materiál C52100.....	73
Obrázek 42	Teplotní pole pro materiál C86300.....	73
Obrázek 43	Teplotní pole pro materiál A91100	75
Obrázek 44	Teplotní pole pro materiál A92219	75
Obrázek 45	Teplotní pole pro materiál A92052	76
Obrázek 46	Teplotní pole pro materiál A95083	76
Obrázek 47	Teplotní pole pro materiál A13840	77
Obrázek 48	Teplotní pole pro uhlíkovou ocel.....	79
Obrázek 49	Teplotní pole pro nerezovou ocel	79

SEZNAM GRAFŮ

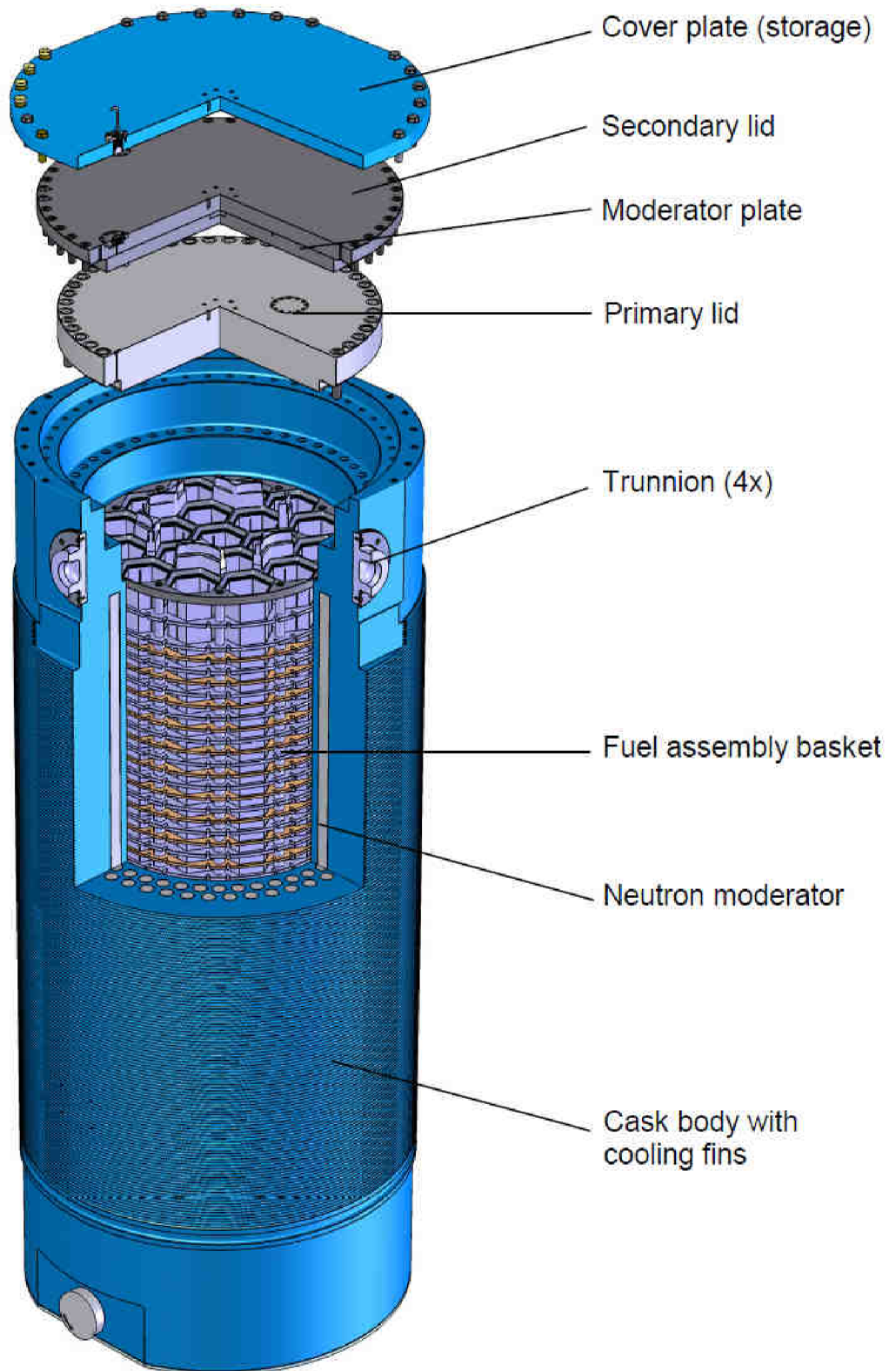
Graf 1	Zbytkový tepelný výkon při vyhoření 50 MWd/kg	28
Graf 2	Závislost koef. tepelné vodivosti Cu na teplotě	70
Graf 3	Závislost koef. tepelné vodivosti Al na teplotě	74
Graf 4	Závislost koef. tepelné vodivosti uhlíkové a nerezové oceli na teplotě	78

SEZNAM PŘÍLOH

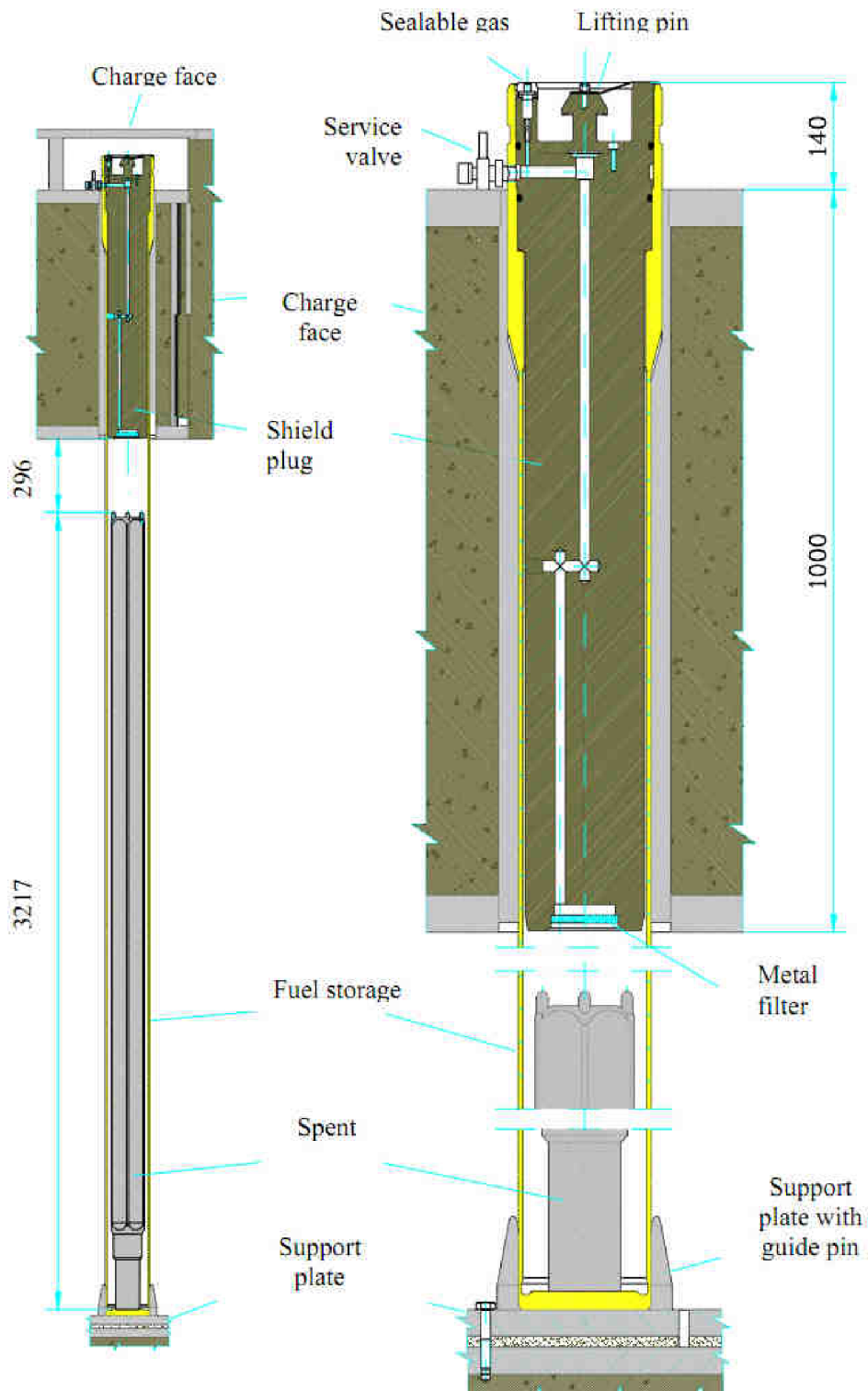
Příloha 1	Sestava CASTOR®1000/19	93
Příloha 2	Detail kobky s OS ve skladu Paks	94
Příloha 3	Radiální řez kontejnerem CASTOR®440/84M.....	95

PŘÍLOHY

Příloha 1 Sestava CASTOR®1000/19 [24]



Příloha 2 Detail kobky s OS ve skladu Paks [25]



Arrangement of the Fuel Storage Tube and Shield Plug

Příloha 3 Radiální řez kontejnerem CASTOR®440/84M

