



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

OPATŘENÍ PRO ZMÍRNĚNÍ NÁSLEDKŮ TĚŽKÉ HAVÁRIE REAKTORU GFR

PROVISIONS FOR MITIGATION OF CONSEQUENCES IN CASE OF MAJOR ACCIDENTS IN GFR
NUCLEAR REACTORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ADAM MLČÚCH

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ MARTINEC, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav
Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Adam Mlčúch

kteřý/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:

Opatření pro zmírnění následků těžké havárie reaktoru GFR

v anglickém jazyce:

Provisions for mitigation of consequences in case of major accidents in GFR nuclear reactors

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Plynem chlazené rychlé reaktor (GFR) představují jednu z aplikovatelných možností budoucích reaktorů generace IV. Tyto reaktory navazují z historického pohledu na množivé reaktory. Reaktory typu GFR nemají v současné době referenční jednotku. Projekt Allegro je koncipován jako malý experimentální reaktor, který bude z pohledu složení aktivní zóny zaměřen na palivo typu MOX a případně jiné keramické palivo. Z pohledu aplikovatelnosti navrhované technologie je potřeba prokázat připravenost na nadprojektové havárie, které po zkušenosti z JE Fukušima mohou nastat a je potřeba s nimi v projektu výstavby tohoto typu reaktoru počítat.

Cíle diplomové práce:

Rešerše projektu ALLEGRO.

Rešerše způsobů řešení těžkých havárií v generaci III+.

Analýza průběhu těžké havárie reaktoru GFR ALLEGRO – tepelná bilance, odhad způsobu a rozsahu roztavení aktivní zóny.

Analýza vlastností a chování coria.

Návrh opatření pro zmírnění následků těžké havárie reaktoru ALLEGRO.

Seznam odborné literatury:

SEHGAL, Edited by Bal Raj. Nuclear safety in light water reactors: severe accident phenomenology. 1st ed. Amsterdam: Elsevier/Academic Press. ISBN 01-238-8446-2.

Richard Stainsby, Karen Peers, Colin Mitchell, Christian Poette, Konstantin Mikityuk, Joe Somers, Gas cooled fast reactor research in Europe, Nuclear Engineering and Design, Volume 241, Issue 9, September 2011, Pages 3481-3489, ISSN 0029-5493

Giorgio Locatelli, Mauro Mancini, Nicola Todeschini, Generation IV nuclear reactors: Current status and future prospects, Energy Policy, Volume 61, October 2013, Pages 1503-1520, ISSN 0301-4215

Leonid A. Dombrovskii, Vladimir N. Mineev, Anatolii S. Vlasov, Leonid I. Zaichik, Yuri A. Zeigarnik, Andrei B. Nedorezov, Aleksandr S. Sidorov, In-vessel corium catcher of a nuclear reactor, Nuclear Engineering and Design, Volume 237, Issues 15–17, September 2007, Pages 1745-1751, ISSN 0029-5493

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Martinec, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 22.10.2013



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou těžké havárie plynem chlazeného rychlého reaktoru GFR. V úvodu práce je zpracován přehled problematiky plynem chlazeného rychlého reaktoru. Následuje rešerše způsobů možných řešení těžké havárie s důrazem na řešení aplikované v reaktorech generace III+. Kapitoly materiálové a tepelné bilance těžké havárie demonstrační jednotky GFR spolu s kapitolou analyzující vlastnosti vzniklé taveniny vytváří podklad pro koncepční návrh lapače taveniny demonstrační jednotky GFR, který tvoří závěrečnou část této práce.

Klíčová slova: jaderný reaktor, těžká havárie, tavení aktivní zóny, lapač taveniny

ABSTRACT

This thesis deals with the severe accident of the gas-cooled fast reactor GFR. At the beginning of the study there is a review of the gas-cooled fast reactor subject. Next part is focused on description of possible solutions for severe accidents with emphasis on the solution applied in the Generation III+ reactors. Chapters that deal with material and thermal balance with severe accident of GFR demonstration unit, along with the chapter which analyses features of the corium, create a basis for the conceptual design of core catcher of GFR demonstration unit, which forms the final part of this thesis.

Key words: nuclear reactor, severe accident, core meltdown, core catcher

Bibliografická citace

MLČÚCH, A. *Opatření pro zmírnění následků těžké havárie reaktoru GFR*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 87 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Martinec, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Opatření pro zmírnění následků těžké havárie reaktoru GFR* vypracoval samostatně, s použitím uvedené odborné literatury a pramenů, pod odborným vedením Ing. Jiřího Martince, Ph.D.

V Brně 29. května 2014

.....
Bc. Adam MLČÚCH

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval mému vedoucímu práce Ing. Jiřímu Martincovi, Ph.D. za odborné vedení této diplomové práce a Ing. Ladislavovi Bělovskému, CSc. za poskytnutí odborných materiálů a cenné rady a připomínky při psaní této diplomové práce.

OBSAH

1	Úvod	- 13 -
2	Plynom chladený rýchly reaktor GFR	- 15 -
2.1	História rýchlych reaktorov	- 15 -
2.1.1	Koncepty GCFR vypracované v minulosti	- 16 -
2.2	GCFR v programe GIF	- 17 -
2.2.1	Jadrové reaktory IV. generácie	- 17 -
2.2.2	GCFR IV. generácie	- 18 -
2.3	Energetický reaktor GFR.....	- 19 -
2.3.1	Predstavenie GFR	- 19 -
2.3.2	Referenčný návrh GFR.....	- 20 -
2.3.3	Systém odvodu zostatkového tepla	- 21 -
2.3.4	Návrh aktívnej zóny.....	- 22 -
2.3.5	Referenčný návrh paliva	- 24 -
2.4	Demonštračná jednotka GFR.....	- 25 -
2.4.1	Všeobecný popis konštrukcie primárneho a sekundárneho okruhu.....	- 26 -
2.4.2	Popis paliva a aktívnej zóny.....	- 27 -
3	Existujúce riešenia lapača taveniny.....	- 30 -
3.1	Koncepcie lapača taveniny	- 31 -
3.2	Jadrové reaktory Generácie III+	- 32 -
3.2.1	MIR 1200	- 32 -
3.2.2	EPR.....	- 36 -
4	Analýza ťažkej havárie demonštračnej jednotky GFR	- 42 -
4.1	Materiálová a tepelná bilancia	- 42 -
4.1.1	Vlastnosti MOX paliva	- 42 -
4.1.2	Vlastnosti konštrukčnej ocele.....	- 48 -
4.1.3	Vlastnosti karbidu bóru	- 48 -
4.1.4	Materiálová bilancia aktívnej zóny, reflektora a tienenia	- 49 -
4.1.5	Tepelná bilancia ťažkej havárie ALLEGRO	- 57 -
4.2	Zhodnotenie	- 63 -
5	Analýza vlastností taveniny	- 64 -
5.1	Procesy v tlakovej nádobe reaktora	- 64 -
5.1.1	Rozvrstvenie kória	- 64 -
5.1.2	Interakcia kória a ocele	- 65 -
5.1.3	Rozdelenie štiepných produktov	- 66 -
5.2	Procesy po pretavení tlakovej nádoby reaktora	- 67 -
5.2.1	Interakcia kória s obetným materiálom	- 67 -

5.2.2	Experimenty skúmajúce interakciu kória s obetným materiálom.....	- 68 -
5.3	Zhodnotenie	- 70 -
6	Návrh opatrení pre zmiernenie ťažkej havárie GFR	- 71 -
6.1	Analýza použitia lapača taveniny	- 71 -
6.1.1	Rozmerové kritériá	- 71 -
6.1.2	Schopnosť zachytiť kórium	- 72 -
6.1.3	Uchovanie a chladenie kória	- 73 -
6.1.4	Nukleárne kritérium	- 73 -
6.1.5	Spoľahlivosť	- 74 -
6.2	Fyzikálne princípy stabilizácie taveniny GFR	- 74 -
6.2.1	Všeobecný prístup	- 74 -
6.3	Koncepčný návrh lapača taveniny	- 77 -
6.3.1	System dočasného zadržania	- 77 -
6.3.2	Komora stabilizácie taveniny.....	- 78 -
6.3.3	Odvod tepla	- 78 -
7	Záver	- 81 -
8	Zoznam použitých zdrojov.....	- 82 -
9	Zoznam použitých skratiek a symbolov.....	- 85 -
10	Zoznam použitých indexov	- 87 -

1 ÚVOD

S rastúcou populáciou Zeme a so stúpajúcou životnou úrovňou rastú aj požiadavky na energiu. Z dlhodobého hľadiska nie je možné pokryť energetickú spotrebu ľudskej civilizácie konvenčnými zdrojmi energie, ako sú uhlie, zemný plyn a ropa. Tieto suroviny sú zároveň dôležitými a len ťažko nahraditeľnými položkami v priemysle, ich zásoby sa postupne zmenšujú a ich ťažba sa stáva náročnejšou, čo spôsobuje nárast ich cien. Rast a stabilita svetovej ekonomiky nie sú možné bez dostatočných zdrojov energie a vyžadujú zabezpečiť čo najvyššiu energetickú bezpečnosť každého štátu. Odpoveď na tieto otázky v posledných desaťročiach ponúkla jadrová energetika, ktorá sa stala stabilnou a nenahraditeľnou súčasťou v súčasnosti využívaného energetického mixu štátov po celom svete. Faktom však ostáva, že súčasné, s tepelným spektrom neutrónov pracujúce reaktory dokážu využívať len malú časť energie, ktorá je k dispozícii v jadrovom palive. Pre otvorený palivový cyklus týchto reaktorov ich nie je možné považovať za dlhodobo udržateľný zdroj energie. Vyriešiť otázku uzatvorenia palivového cyklu so súčasným zvýšením bezpečnosti a ekonomickosti prevádzky je cieľom vývoja reaktorov štvrtej generácie. Jedným z navrhovaných konceptov reaktorov štvrtej generácie je plynom chladený reaktor pracujúci s rýchlym spektrom neutrónov (GFR). Tento, bez pochyb atraktívny koncept reaktora, však so sebou prináša množstvo náročných a komplexných inžinierskych úloh, ktoré sa v minulosti nepodarilo vyriešiť a tak jadrový reaktor konceptu GFR zatiaľ nebol postavený. Chýba teda technologická základňa, na základe ktorej by bolo možné vypracovať návrh GFR štvrtej generácie. Preto je potrebné pred návrhom energetického reaktora GFR vypracovať projekt demonštračnej jednotky GFR, ktorá poskytne základ pre overenie nových technológií. Avšak aj pri jej návrhu treba dbať na vysoké bezpečnostné požiadavky kladené na moderné jadrové zariadenia. Prípady nadprojektových havárií jadrových reaktorov vo svete ukázali, že je nevyhnutné prijať opatrenia pre zmiernenie následkov týchto veľmi málo pravdepodobných udalostí.

Prezentovaná diplomová práca je rozdelená do kapitol, kde cieľom úvodných je širšie popísať predmetnú problematiku a následne sa zaoberajú priebehom ťažkej havárie s tavením aktívnej zóny, až po koncepčný návrh lapača taveniny demonštračnej jednotky GFR. Druhá kapitola je venovaná histórii a všeobecnému popisu plynom chladených rýchlych reaktorov. Následne je predstavené začlenenie tohto konceptu reaktora do projektu jadrových reaktorov štvrtej generácie a je popísaný referenčný návrh GFR štvrtej generácie spolu s cyklom premeny energie a pokročilým keramickým palivom navrhovaným pre tento reaktor. Kapitola je ukončená popisom aktuálneho návrhu demonštračnej jednotky GFR, jej významom a plánovaným spôsobom preukázania spoľahlivosti pokrokových technológií GFR.

Tretia kapitola tejto práce je venovaná rešerši možných prevedení lapača taveniny. Začiatok je venovaný popisu významu a všeobecným princípom uplatnených pri návrhu tohto zariadenia. Nasleduje popis významných súčasne aplikovaných riešení lapača taveniny, popis procesu stabilizácie taveniny, ktorý využívajú a špecifikami ich uplatnenia.

Štvrtá kapitola sa zaoberá ťažkou haváriou demonštračnej jednotky GFR. Je tu popísaná hmotnostná a tepelná bilancia ťažkej havárie, čo tvorí prevažnú časť tejto práce. Nasleduje analýza možných spôsobov priebehu ťažkej havárie a teda vstupných parametrov taveniny, ktorú musí lapač taveniny bezpečne stabilizovať.

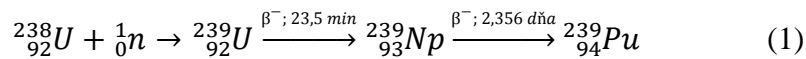
Obsahom piatej kapitoly tejto práce je prehľad dôležitých experimentálnych dát získaných za účelom analýzy vlastností a správania sa taveniny typickej pre ľahkovodné reaktory a procesov, ktoré sprevádzajú nadprojektovú haváriu týchto zariadení. Zdôraznené sú hlavné rozdiely taveniny vznikajúcej pri ťažkej havárii ľahkovodného reaktora a demonštračnej jednotky GFR s aktívnou zónou s MOX palivom.

Posledná, šiesta časť prezentovanej diplomovej práce sa zaoberá možnými spôsobmi zmiernenia následkov ťažkej havárie demonštračnej jednotky GFR. Predstavené sú všeobecné fyzikálne princípy využívané pri stabilizácii taveniny v zariadení na to určenom – lapači taveniny. Nasleduje popis koncepčného návrhu tohto zariadenia pre demonštračnú jednotku GFR.

2 PLYNOM CHLADENÝ RÝCHLY reaktor GFR

2.1 HISTÓRIA RÝCHLYCH REAKTOROV

Urán nachádzajúci sa v prírode obsahuje približne 0,7% štiepiteľného izotopu ^{235}U , zanedbateľnú časť ^{234}U (asi 0,005%) a ostatných zaokrúhlene 99,3% tvorí ^{238}U . Ak je tento materiál bombardovaný neutrónmi, môže dôjsť k štiepeniu jadra ^{235}U , alebo k záchytu neutrónu jadrom ^{238}U . Takto vzniknutý izotop je nestabilný a vzniká plutónium ^{239}Pu , ktoré je taktiež štiepiteľné. Tento proces znázorňuje rovnica (1).



Takto môže v správne navrhnutom systéme, kde prebieha štiepna reťazová reakcia vzniknúť dokonca viac štiepiteľných izotopov, ako sa spotrebuje. Hovoríme o množení štiepneho materiálu (napr. ^{239}Pu) z plodivého materiálu (napr. ^{238}U). Takéto zariadenie nazývame množivý jadrový reaktor. Potenciál množiť štiepiteľný jadrový materiál má iba reaktor pracujúci s rýchlym neutrónovým spektrom. Táto skutočnosť bola objavená počas projektu Manhattan, a v roku 1946 bol postavený prvý rýchly reaktor nazývaný Clementine (Los Alamos National Laboratory, USA). V tom čase bola technológia obohacovania jadrového paliva ešte vo svojich počiatkoch a prírodné zásoby uránu boli považované za nedostatočné pre vytvorenie rozmernejšej flotily civilných reaktorov. To viedlo k intenzívnemu rozvoju technológie rýchlych množivých reaktorov a taktiež k spusteniu prvého jadrového reaktora slúžiaceho na produkciu elektrickej energie Experimental Breeder Reactor – EBR-I v roku 1951 (Idaho National Lab, USA). [4]

Následovali dekády počas ktorých bolo postavených niekoľko experimentálnych reaktorov a prototypových elektrární po celom svete. Avšak v 70. rokoch 20. storočia sa situácia pre rýchle reaktory zmenila – pokroky v obohacovacích technológiách umožnili obohacovať jadrové palivo lacnejšie ako predtým, svetové zásoby uránu sa ukázali byť väčšie ako sa pôvodne predpokladalo a v neposlednej rade, zostrojiť a bezpečne prevádzkovať rýchly reaktor bolo drahšie a náročnejšie ako u reaktorov chladených a moderovaných ľahkou vodou (LWR - Light Water Reactor). Následkom toho boli všetky významné programy po celom svete buď zrušené, alebo významne obmedzené. [4]

V súčasnosti je rýchlym reaktorom venovaná opäť zvýšená pozornosť, avšak z iných dôvodov ako tomu bolo pri zrode jadrovej energetiky. Ak využívanie jadrovej energie v budúcnosti značne narastie, čo sa dá z viacerých dôvodov predpokladať, zásoby uránu sa zmenšia a jeho cena narastie. Rýchle reaktory dokážu prispieť k udržateľnému rozvoju využívaním omnoho väčšej časti prírodných zdrojov jadrového paliva v porovnaní s reaktormi pracujúcimi s tepelným neutrónovým spektrom, dnes ich zastupujú najmä LWR. Ďalší dôvod atraktivity technológie rýchlych reaktorov je v možnosti transmutovať aktinoidy, a to vďaka veľmi dobrej neutrónovej bilancii. V konečnom dôsledku to znamená výrazné zmenšenie objemu a rádioaktivity jadrového odpadu určeného na konečné uloženie.

Voľba chladiaceho média rýchleho reaktora je smerovaná požiadavkami na minimálnu absorpciu a moderáciu neutrónov a zároveň schopnosťou spoľahlivo odvieť teplo tvorené v aktívnej zóne, ktorá má spravidla niekoľko - násobne väčšiu objemovú hustotu tepelného výkonu, ako je tomu v tepelných reaktoroch chladených plynom. Vo väčšine prípadoch je volený tekutý kov, najčastejšie sodík, avšak plynné chladiace médium je tiež

možné, zväčša hélium, oxid uhličitý alebo vodná para. V porovnaní so sodíkom má plynné chladiace médium tieto výhody:

- Chemická inertnosť s vodou a vzduchom a vo všeobecnosti dobrá kompatibilita s konštrukčnými materiálmi.
- Zanedbateľná aktivácia chladiaceho média.
- Optická priehľadnosť, čo zjednodušuje manipuláciu s palivom a iné úkony.
- Plynné chladiace médium nemôže zmeniť skupenstvo, čo redukuje riziko výkyvov reaktivity.
- Výrazné zníženie kladného dutinového koeficientu, typicky spájaného so sodíkom.

Pre úplnosť a objektivitu je nutné uviesť aj nevýhody spojené s použitím plynného chladiaceho média:

- Vyššia merná spotreba cirkulačných jednotiek v porovnaní s tekutými kovmi.
- Vlastnosti plynných chladiacich médií obecné vyžadujú udržiavať primárny okruh pod zvýšeným tlakom – približne 7 MPa pre hélium a až 25 MPa pre nadkritický CO₂ cyklus. Prevádzkový tlak GCFR je určený kompromisom medzi prácou cirkulačných dúchadiel (vyšší tlak vyžaduje menšiu mernú prácu), konštrukčné dôvody (nižší tlak znamená jednoduchší a lacnejší systém) a bezpečnostným hľadiskom (pri väčšom tlaku je zvýšené riziko spojené so stratou tlaku).
- Veľký objemový prietok plynu nutný pre odvedenie tepelného výkonu reaktora a s tým spojená vysoká rýchlosť prúdenia cez aktívnu zónu môže viesť k značným vibráciám.
- Odvod zostatkového tepla z aktívnej zóny s relatívne vysokou objemovou hustotou výkonu je zložitý a v prípade straty tlaku primárneho okruhu vyžaduje vysoko spoľahlivé systémy. [4]

Výhody systému GCFR sa nikdy nepodarilo preukázať v praxi, nakoľko nikdy podobný systém nebol postavený a uvedený do prevádzky. Avšak súčasný pokrok v technológii vytvára možnosť vyzdvihnúť výhody, ktoré tento systém ponúka (napr. vysoká teplota chladiaceho média na výstupe z aktívnej zóny vďaka pokroku v materiálových vedách) a pokúsiť sa zvládnuť inžiniersky náročné úlohy, ktoré so sebou prináša (napr. odvod zostatkového tepla v prípade LOCA).

2.1.1 KONCEPTY GCFR VYPRACOVANÉ V MINULOSTI

Tento stručný prehľad je určený pre ilustráciu výskumu vykonaného na konceptoch GCFR v minulosti, ktoré majú potenciál poskytnúť istý technologický základ pre súčasné projekty.

Nemecko: Gas Breeder Memorandum

Dokument Gas Breeder Memorandum (Gasbrüter Memorandum, 1969) vytvorený vo výskumných inštitútoch v Karlsruhe a Jülich v spolupráci s priemyslom popisuje tri návrhy GCFR, z ktorých všetky využívajú ako chladiace médium aktívnej zóny hélium. Posudzované bolo aj využitie vodnej pary a CO₂, avšak tieto boli označené ako nevyhovujúce. Hlavné zameranie tohto projektu bolo na vytvorenie konvenčného návrhu aktívnej zóny s palivom s pokrytím z nehrdzavejúcej ocele extrapolovaným z rýchlych reaktorov chladených tekutým kovom LMFBR (Liquid Metal Fast Breeder Reactor), využitie tlakovej nádoby reaktora z predpnutého betónu PCR (Prestressed Concrete

Reactor Vessel) prevzatej z projektu vysokoteplotného tepelného reaktora chladeného plynom HTR (High Temperature Reactor) a sekundárnym okruhom pracujúcim s klasickým parným cyklom premeny energie. Všetky cirkulačné jednotky a parogenerátory sú integrované v PCR.V. Tento návrh je zaujímavý zdôraznením potreby uchovať záložný tlak okolo primárneho okruhu (pretlak 0,2 až 0,3 MPa) pre prípad havárie spojenej s únikom chladiaceho média LOCA (Loss of Coolant Accident) s cieľom efektívnejšieho chladenia aktívnej zóny. [4]

Európa: The Gas Breeder Reactor Association

V Európe sa spojilo niekoľko štátov, ktoré pôsobili na poli jadrového priemyslu a vytvorili Spoločenstvo pre plynom chladený plodivý reaktor (The Gas Breeder Reactor Association), s cieľom spoločným úsilím vyvinúť plynom chladený rýchly reaktor. Tento zámer bol demonštrovaný predstavením prvého návrhu pod označením GBR – 1 (Gas Breeder Reactor) v roku 1970. Bol to reaktor s výkonom 1000 MWe chladený héliom, tyčovým palivom využívajúci klasický parný cyklus na premenu energie. Navrhovaná teplota na výstupe aktívnej zóny nepresahovala hodnoty iných rýchlych reaktorov tej doby. Nasledovali návrhy nesúce označenie GBR – 2 a 3 s rovnakým výkonom, avšak navrhované palivo bolo vo forme súborov obsahujúcimi pokryté častice. Pre GFR – 2 bolo navrhované hélium ako chladiace médium, ale GFR – 3 mal pracovať s CO₂. Tieto tri návrhy konečne vyústili do konceptu GFR – 4, reaktor o výkone 1200 MWe chladený héliom a s tyčovými palivovými súbormi. Hlavné cirkulačné dúchadlá a parogenerátory boli integrované v PCR.V. Návrh paliva vychádza z paliva používaného v LMFBR a je typickým pre GCFR tej doby. Každý palivový prútk s pokrytím z nehrdzavejúcej ocele je naplnený peletkami z paliva MOX (Mixed Oxide Fuel). Povrch pokrytia paliva je vrúbkovaný pre zvýšenie turbulentnosti prúdenia a tým aj prenos tepla do hélia. Vysoká rýchlosť hélia vyžaduje sofistikované dištančné zariadenia, ktoré nebudú vytvárať prílišnú tlakovú stratu a zároveň zabránia nadmerným vibráciám palivových elementov. [4]

2.2 GCFR V PROGRAME GIF

Medzinárodné fórum pre Generáciu IV – GIF (The Generation IV International Forum) vzniklo v júli 2001 za účelom viesť spoločné úsilie krajín, ktoré majú vo svete vedúce postavenie vo využívaní jadrovej energie. Zakladajúce krajiny sú Argentína, Brazília, Kanada, Francúzsko, Japonsko, Kórejská republika, Juhoafrická republika, Veľká Británia a USA. Neskôr sa k fóru pripojili Švajčiarsko, spoločenstvo Euroatom, Čínska ľudová republika a Ruská federácia.

Tento projekt má ambíciu riešiť budúce energetické potreby spoločnosti a zároveň znížiť produkciu skleníkových plynov a závislosť na fosílnych palivách dnešného energetického priemyslu. Preto sa zamerá na dlhodobý výskum v oblasti jadrovej energetiky. Staví na doterajších skúsenostiach v tejto oblasti, snaží sa rozvinúť nesporné výhody, ktoré jadrová energetika ponúka a zároveň minimalizovať jej nedostatky.[2]

2.2.1 JADROVÉ REAKTORY IV. GENERÁCIE

Zväčšujúca sa zásoba ochudobneného uránu, narastajúce množstvo plutónia a s ním spojené riziko zneužitia jadrového materiálu, spoločne s potrebou transmutácie minoritných aktinoidov a znížením aktivity použitého jadrového paliva, vytvárajú nutnosť zaradenia reaktorov pracujúcich s rýchlym neutrónovým spektrom do programu GIF. Schopnosť množiť štiepny materiál už naďalej nie je prioritou pre rýchle reaktory, ako

tomu bolo v minulosti. Z tohto dôvodu nastáva posun od zariadení s aktívnou zónou s veľmi vysokou hustotou výkonu k reaktorom, ktoré priamo využijú nadbytočný štiepny materiál tvorený v aktívnej zóne a budú pracovať s prepracovaným jadrovým palivom z tepelných reaktorov.

Pre naplnenie ambiciózných cieľov organizácie GIF bolo vybraných šesť konceptov jadrových reaktorov, medzi nimi aj plynom chladený rýchly reaktor – GFR. Všetky vybrané typy jadrových reaktorov majú svoje silné aj slabé stránky. Jedným zo základných predpokladov úspešného uskutočnenia cieľov GIF je ich aplikácia v symbiotickom systéme, ktorým by sa potenciálne slabiny kompenzovali. Pre úplnosť je uvedený zoznam konceptov vybraných pre ďalší výskum a vývoj [3]:

- GFR – Plynom chladený rýchly reaktor (Gas-Cooled Fast Reactor System)
- MSR – Reaktor s roztavenými soľami (Molten Salt Reactor System)
- VHTR – Vysokoteplotný reaktor (Very-High-Temperature Reactor System)
- SCWR – Reaktor chladený vodou v nadkritickej fáze (Supercritical-Water-Cooled Reactor System)
- SFR – Sodíkom chladený rýchly reaktor (Sodium-Cooled Fast Reactor System)
- LFR – Olovom chladený rýchly reaktor (Lead-Cooled Fast Reactor System) [1]

2.2.2 GCFR IV. GENERÁCIE

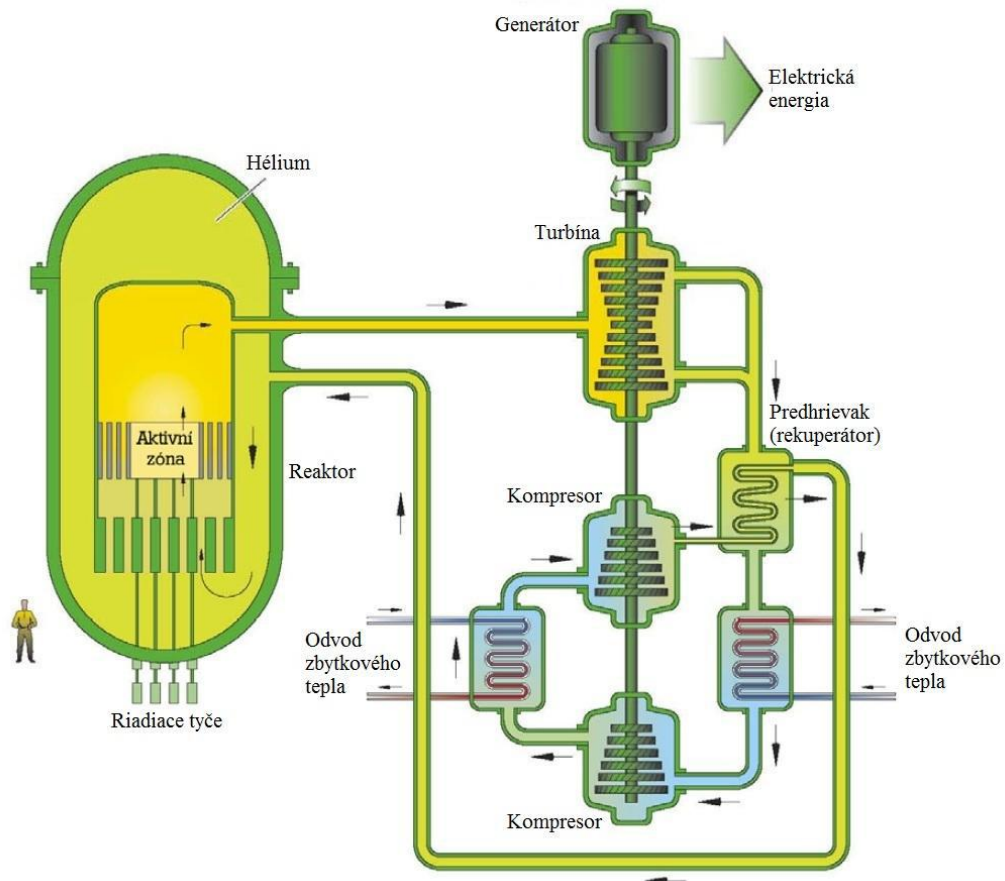
V rámci programu GIF má GCFR za úlohu pomôcť naplniť požiadavku dlhodobej udržateľnosti, t.j. optimálne využiť potenciál jadrového paliva a minimalizovať objem vysoko aktívnych žiaričov určených na konečné uskladnenie. Zároveň je však potrebné udržať požadovanú úroveň bezpečnosti a ekonomickej konkurencieschopnosti zariadenia. Referenčné prevedenie CGFR IV. generácie, označované GFR (schéma na obrázku 2-2), splňuje kritériá zhrnuté nasledovne: [3]

- Je to rýchly reaktor s aktívnou zónou bez plodivej oblasti, t.j. novovytvorený štiepny materiál je uchovaný a využitý v aktívnej zóne. Štiepny materiál, ktorý by bol tvorený v plodivej oblasti je izotopicky takmer čistý prvok (napr. ^{239}Pu), čo zvyšuje riziko zneužitia jadrového materiálu.
- Celkový prínos štiepneho materiálu je nulový, reaktor plodí iba také množstvo štiepneho materiálu, ktoré je potrebné pre vytvorenie jeho novej palivovej vsádzky. Všetky ťažké kovy sú recyklované, pridáva sa iba plodivý materiál.
- Vsádzka plutónia pod úrovňou 10 t/GWe pre zachovanie reálnej možnosti vybudovať rozsiahlejšiu flotilu GFR (v horizonte pár dekád).
- Merný výkon paliva je pomerne malý, približne 40W/gHM (watt per gram of heavy metal – watt na gram ťažkého kovu – Pu, U). Týmto ostáva objemová hustota výkonu aktívnej zóny v porovnaní so SFR relatívne obmedzená ($\sim 100 \text{ MWt/m}^3$), čo napomáha zvyšovať bezpečnosť zariadenia (avšak odvod zostatkového tepla plynným chladiacim médiom v prípade straty tlaku je stále náročnou úlohou). Kvôli kompenzácii ekonomických dopadov týchto bezpečnostných opatrení na prevádzku zariadenia je nutná vysoká účinnosť

premeny energie. Z toho plynie požiadavka vysokej teploty chladiaceho média na výstupe z aktívnej zóny, prípadne kombinovaný, paro – plynový cyklus (PPC).

Požiadavka na nulový celkový prínos štiepneho materiálu popísaná vyššie, celkom presne vymedzuje možné varianty zloženia paliva; existuje relatívne úzky rozptyl izotopického zastúpenia prvkov v palive vedúci k nulovému celkovému prínosu štiepneho materiálu. Pri urán – plutóniovom (U/Pu) palivovom cykle musí byť podiel ^{238}U medzi 80% a 85% [4].

Popisom referenčnej jednotky GFR sa zaoberá nasledujúca časť práce.



Obrázok 2-1 Plynom chladený rýchly reaktorový systém IV. generácie s priamym cyklom premeny energie [2]

2.3 ENERGETICKÝ REAKTOR GFR

GFR reprezentuje jedeného z troch Európskych kandidátov na energetický reaktor pracujúci s rýchlym neutrónovým spektrom IV. generácie. Ostatné dva sú LFR a SFR. Najperspektívnejší v krátkodobom časovom horizonte je SFR vďaka rozsiahlej celosvetovej technologickej základni a skúsenostiam. Európsky prototyp SFR IV. generácie by mal byť postavený vo Francúzsku v priebehu jednej dekády. Avšak neistota úspechu technológie SFR a atraktívne možnosti spojené s plyným chladiacim médiom zapríčinili záujem odbornej verejnosti o koncept GFR a umožnili výskum a vývoj tejto technicky reálnej alternatívy rýchleho reaktora.

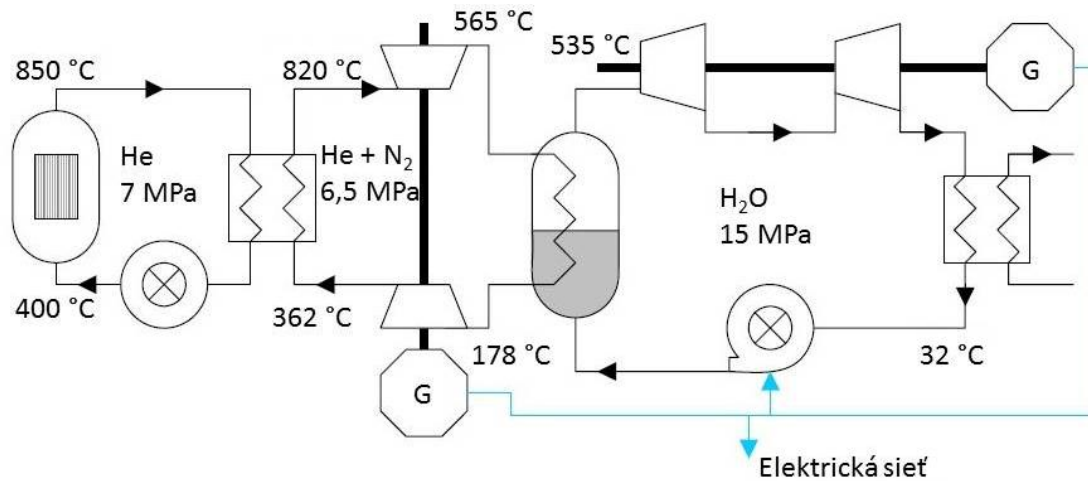
2.3.1 PREDSTAVENIE GFR

Výskum plynom chladeného rýchleho reaktora GFR prebieha v rámci GIF a programov Európskej únie, ktoré v minulosti predstavovali projekty FP5 GCFR (The 5th Framework Programme – Gas Cooled Fast Reactor), FP6 GCFR STREP (The 6th Framework Programme – Gas Cooled Fast Reactor Specifically Targeted Research Project) a FP7 GoFastR (The 7th Framework Programme – European Gas Cooled Fast Reactor), ktorý skončil v marci roku 2013. Výskum GFR v EU je smerovaný k naplneniu cieľov stanovených organizáciou GIF a štruktúrami EU, t.j. vyvinúť bezpečný, dlhodobo udržateľný, spoľahlivý a ekonomicky výhodný zdroj využívajúci potenciál jadrovej energie, ktorého prevádzka neumožní prípadné zneužitie jadrového materiálu v akejkoľvek fáze palivového cyklu. Spoločne s ostatnými rýchlymi reaktorovými systémami má GFR výnimočný potenciál vo vytvorení udržateľného zdroja energie, a to vďaka dramatickému zefektívneniu využívania prírodných zdrojov jadrového paliva a minimalizácií objemu vysokoaktívneho jadrového odpadu cez transmutáciu minoritných aktinoidov. Pre efektívny výskum a vývoj GFR je potrebné nájsť istú technologickú základňu. Nakoľko v minulosti žiaden GCFR nebol skonštruovaný, konkrétne prevádzkové skúsenosti so zariadeniami tohto typu nejestvujú. Je možné využiť iba poznatky z výskumných projektov, ktoré sa touto problematikou zaoberali v minulosti. Je tu však istá podobnosť s reaktorovými konceptmi SFR, LFR a VHTR, ktoré ponúkajú relatívne rozsiahlu technologickú základňu a oba sú zaradené do programu GIF. Reaktorové systémy VHTR a GFR majú navrhované spoločné chladiace médium (hélium) a vysoké teploty na výstupe z aktívnej zóny pre dosiahnutie vysokej efektivity v premene energie a prípadné využitie vysoko potenciálneho tepla napr. pre výrobu vodíka alebo iné priemyselné aplikácie. Z toho plynú podobné konštrukčné riešenia istých komponentov (napr. tepelné výmenníky, dúchadlá) a spoločná problematika v oblasti vývoja žiaruvzdorných materiálov. Reaktorový koncept SFR je, podobne ako GFR, jeden z troch rýchlych reaktorových systémov zaradených do programu GIF a poskytuje rozsiahlu technologickú základňu v oblasti problematiky rýchlych reaktorov. Efektívne využitie vedomostí nadobudnutých pri výskume, vývoji a následnej prevádzke systémov predchádzajúcich konceptom štvrtej generácie VHTR a SFR sú kľúčové pre vývoj GFR.

2.3.2 REFERENČNÝ NÁVRH GFR

Štúdie vedené za cieľom vytvoriť referenčný návrh energetickej jednotky s reaktorom GFR boli vypracované najmä francúzskou organizáciou CEA a spoločenstvom Euratom. Prvé štúdie vedené Euratom sa venovali posúdeniu vhodnosti verzie s aktívnou zónou s výkonom 600 MWt a rôznym riešeniam cyklu premeny energie. Ďalej bol posúdený dopad recyklácie minoritných aktinoidov na aktívnu zónu, a to z pohľadu neutrónovej bilancie aj bezpečnostných charakteristík.

Nastala však zmena zámeru zo strany GIF z pôvodných 600 MWt na energetickú jednotku s výhodnejšími ekonomickými vlastnosťami o výkone 2400 MWt. Plynová turbína pre spracovanie tak veľkého tepelného výkonu sa javí ako príliš technologicky rizikové riešenie. Naopak, použitie nepriameho kombinovaného cyklu sa ukazuje byť omnoho spoľahlivejšie a ekonomicky výhodnejšie prevedenie cyklu premeny energie. Relatívne malá plynová turbína pracujúca s héliom, resp. zmesou hélia a dusíka na spracovanie vysoko potenciálneho tepla nasledovaná parnou turbínou spracúvajúcou odpadové teplo z plynovej turbíny ponúka technologicky zvládnuté a ekonomicky výhodné riešenie. Tento cyklus je zaužívaný v elektrárňach spaľujúcich zemný plyn a pre aplikáciu s využitím tepla z jadrového zdroja nevyžaduje markantné zmeny. Schéma tohto cyklu je znázornená na obrázku 2-3. [5]



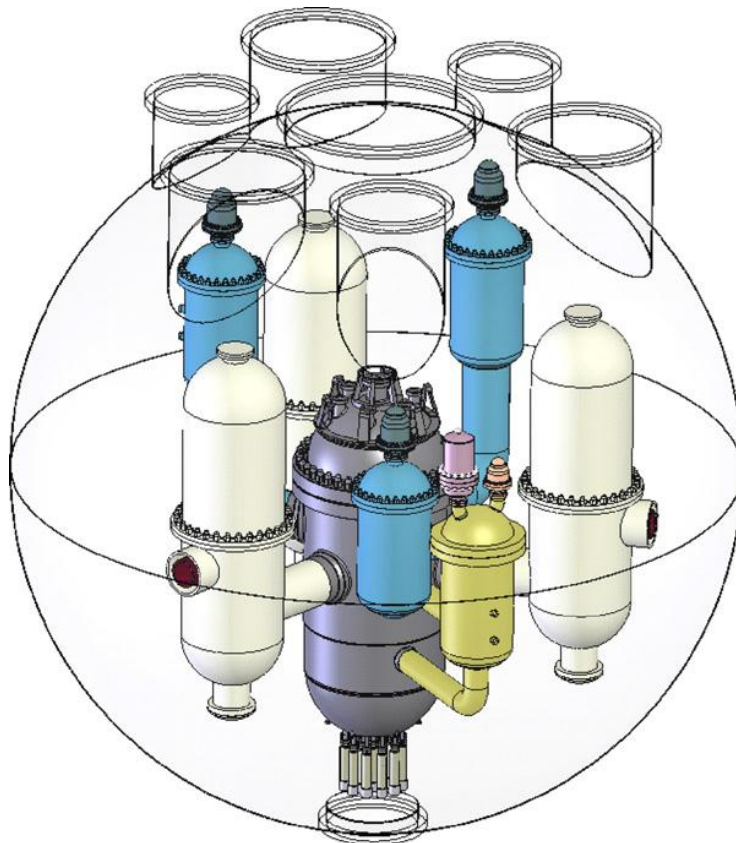
Obrázok 2-2 Referenčný kombinovaný paro - plynový cyklus pre GFR [6]

2.3.3 SYSTÉM ODVODU ZOSTATKOVÉHO TEPLA

Bezpečnostný systém odvodu zostatkového tepla z aktívnej zóny (DHR – Decay Heat Removal) je založený na zabezpečení cirkulácie chladiaceho média v akejkoľvek situácii. Systém DHR je založený na týchto opatreniach: [7]

- Celý primárny okruh a špeciálne aktívna zóna sú navrhnuté pre uľahčenie cirkulácie chladiaceho média (malá tlaková strata aktívnej zóny $\Delta p_{AZ} \leq 0,15 \text{ MPa}$ [7]) a podporujú tak prirodzenú konvekciu.
- Chladenie aktívnej zóny prebieha cez hlavné výmenníky tepla alebo prípadne vyhradenými DHR slučkami.
- Koncept malej oceľovej ochrannej obálky – hermetická obálka primárneho okruhu je určená pre zmiernenie straty tlaku v prípade straty integrity primárneho okruhu (poskytnutie „záložného“ tlaku vďaka rovnováhe medzi objemom malej ochrannej obálky a primárneho okruhu).
- Jedna DHR slučka je navrhnutá pre zvládnutie zlyhania malej ochrannej obálky.

Primárny okruh v malej ochrannej obálke sú znázornené na obrázku 2-4.



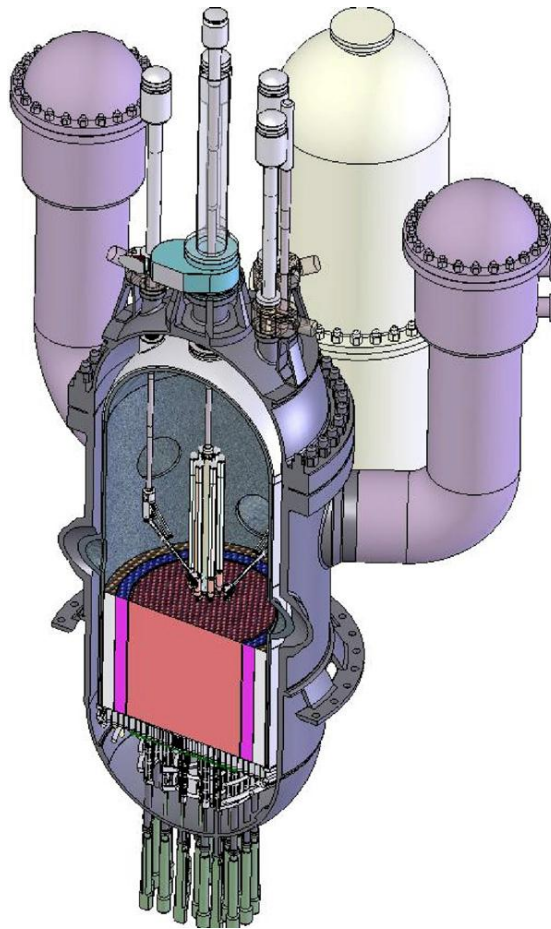
Obrázok 2-3 Primárny okruh v malej oceleovej ochrannej obálke [6]

Stratégia DHR pre najčastejšie udalosti (t.j. strata integrity primárneho okruhu, LOCA) predpokladá využitie primárnych výmenníkov tepla (motory dúchadiel napájané diesel generátormi) a ako chladič parogenerátory (bypass turbíny). Pre ostatné situácie je určený systém DHR, ktorý je navrhnutý aby zvládol svoju úlohu ako pri nominálnom tlaku primárneho okruhu, tak aj pri veľkom rozpätí možných tlakov v malej oceleovej ochrannej obálke v prípade odtlakovania primárneho okruhu. Zloženie systému DHR je nasledovné: [7]

- Chladiaci systém pri vysokom tlaku (0,4 – 7 MPa): 3×100% pri nútenej cirkulácii a 2×100% pri prirodzenej cirkulácii ako záloha. [7]
- Chladiaci systém pri nízkom tlaku (0,2 – 0,4 MPa): 2×100% pri nútenej cirkulácii dúchadlom navrhnutým pre tieto podmienky (redundancia pridaná na základe analýz kódom CATHARE2) [8]

2.3.4 NÁVRH AKTÍVNEJ ZÓNY

Rez tlakovou nádobou reaktora na obrázku 2-5 znázorňuje aktívnu zónu umiestnenú v nosnom plášti, manipulátor paliva a v spodnej časti ovládacie prvky regulačných a havarijných tyčí.

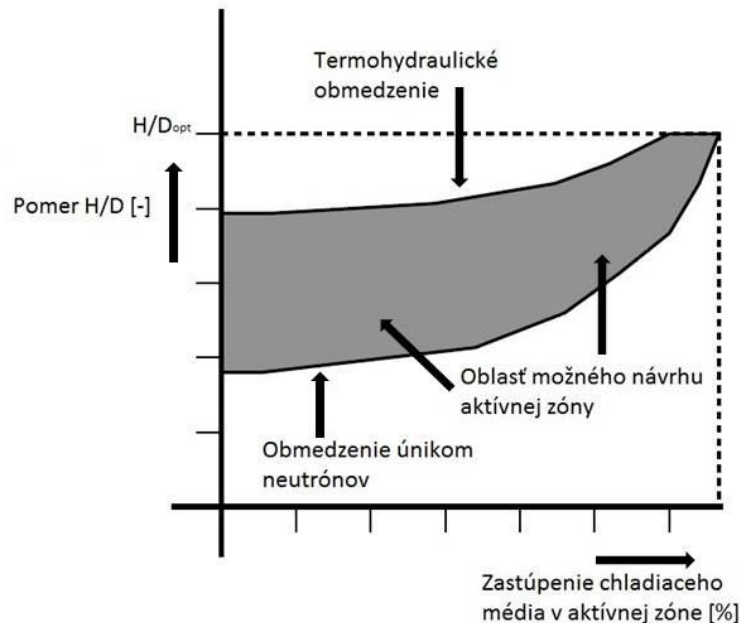


Obrázok 2-4 Rez tlakovou nádobou GFR [6]

Absencia plodivej oblasti umožňuje aproximovať reaktor jednoduchým valcom zloženým z homogénnej zmesi paliva a chladiaceho média (zanedbaním heterogenity spôsobenej rozdielnym zastúpením zložiek paliva v jednotlivých palivových súboroch). Pre homogénny valec s daným objemom a zložením paliva existuje minimálny pomer výšky a priemeru (H/D – height / diameter), pod ktorým reaktor nikdy nedosiahne kritičnosti kvôli nadmernému úniku neutrónov. Taktiež jestvuje optimálny pomer H/D , pri ktorom straty neutrónov únikom sú minimalizované. Teraz predpokladajme homogénny valec o danom objeme. Ak vzrastie množstvo chladiaceho média v aktívnej zóne, zastúpenie paliva naopak klesá a preto pomer H/D musí byť volený bližšie k optimálnej hodnote pre dosiahnutie kritického stavu. Toto je znázornené na obrázku 2-6, kde „obmedzenie únikom neutrónov“ je dané ako funkcia pomeru chladiaceho média v aktívnej zóne. Obmedzenie únikom neutrónov je minimálna hodnota pomeru H/D , kedy je možné dosiahnutie kritičnosti pri danom zastúpení chladiaceho média v aktívnej zóne. [3]

Taktiež existuje termohydraulické obmedzenie pomeru H/D reaktora. Ak pre danú objemovú hustotu výkonu a objem reaktora vzrastie pomer H/D (t.j. narastie výška aktívnej zóny H a klesne jej priemer D), je potrebné odvieť väčšie množstvo tepla na jeden kanál chladiaceho média. Z toho plynie potreba vyššieho objemového toku chladiaceho média vedúceho k nárastu rýchlosti prúdenia a následne vyššej tlakovej straty aktívnej zóny. Toto znamená, že pre určité zastúpenie chladiaceho média v aktívnej zóne je daný maximálny pomer H/D aby tlaková strata aktívnej zóny ostala pod požadovanou hodnotou. Toto je znázornené na obrázku 2-6 ako „termohydraulické obmedzenie“. [3]

Tieto dve obmedzenia vytvárajú oblasť možného návrhu aktívnej zóny GCFR bez plodivej oblasti, tak isto znázornenú na obrázku 2-6.



Obrázok 2-5 Oblasť možného návrhu aktívnej zóny CGFR [3]

2.3.5 REFERENČNÝ NÁVRH PALIVA

Vysoká teplota chladiaceho média na výstupe z aktívnej zóny je jedným zo základných predpokladov komerčného úspechu reaktorov konceptu GFR. Z tohto dôvodu sa karbidické palivo (U, Pu)C s povlakom z keramického matricového kompozitu z karbidu kremíka (SiC CMC)¹ javí ako najperspektívnejšia možnosť. [15, 16]

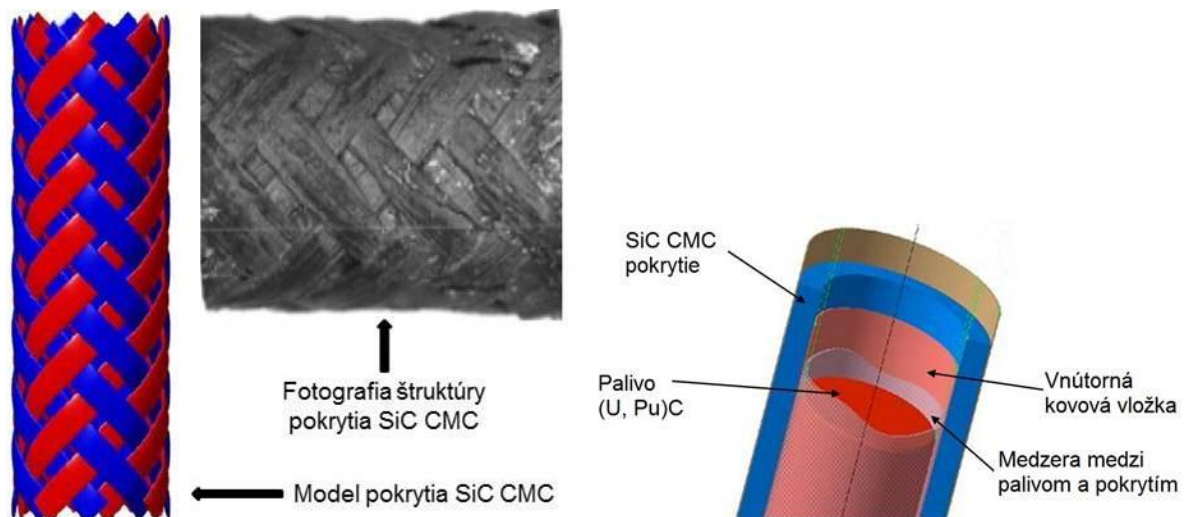
SiC CMC je keramický kompozit používaný v nejadrovom priemysle a využíva keramické vlákna uložené v keramickej matrici. Tenká medzifázová vrstva medzi vláknami a matricou zabezpečuje dostatočné elastické vlastnosti. SiC CMC má výrazne vyššiu teplotnú odolnosť v porovnaní s kovovými povlakmi a tak isto veľmi nízku chemickú reaktivitu, čo ho robí veľmi atraktívnym práve pre aplikácie ako pokrytie jadrového paliva. Model a fotografia pokrytia SiC CMC sú znázornené na obr. 2-6. [17]

Súčasný referenčný návrh predstavuje cylindrickú aktívnu zónu s hexagonálnymi palivovými kazetami obsahujúcimi palivové prúťiky. Palivový prúťik obsahuje karbidické palivové elementy (U, Pu)C, kovovú vložku zamedzujúcu difúziu štiepných produktov cez SiC CMC povlak alebo ich úniku cez mikro trhlinky, vlastné SiC CMC pokrytie. Vonkajší žiaruvzdorný kovový obal môže byť potrebný pre zamedzenie difúzií hélia cez SiC CMC. Mohlo by tak dôjsť k narušeniu celistvosti pokrytia paliva a kontaminácii primárneho okruhu produktmi štiepenia. Model pokrytia CMC a rez palivovým prúťikom sú znázornené na obr. 2-6. [15, 16]

¹ Keramické palivo vyvíjané v CEA odolávajúce teplotám 1600°C, krátkodobo bez významného poškodenia až 2000°C.

² Objemové zastúpenie hélia (He) v Tabuľke 2-1 je vždy uvedené pri tlaku 7 MPa.

MOX v Tabuľke 2-1 označuje palivo s 25 hm. % PuO₂ a 75 hm. % UO₂ (24,5 mol. % PuO₂ a 75,5 mol. %



Obrázok 2-6 Keramické pokrytie paliva GFR a rez palivovým prúťkom GFR [6]

2.4 DEMONŠTRAČNÁ JEDNOTKA GFR

Potreba demonštračnej jednotky GFR plynie zo skutočnosti, že doposiaľ žiadny plynom chladený reaktor pracujúci s rýchlym neutrónovým spektrom nebol postavený. Práve preto bol približne v roku 2001 spolu s počiatkom vývoja GFR2400 v CEA paralelne zahájený aj projekt s názvom ALLEGRO, ktorý má za cieľ vyvinúť demonštračnú jednotku GFR, označovanú rovnakým názvom. Návrh demonštračnej jednotky reaktora GFR bol vedený snahou čo najrýchlejšie postaviť zariadenie pre overenie technológií GFR (palivo, systém pre výmenu paliva a pod.) pri súčasnom maximálnom využití už existujúcich technológií používaných napr. pre vysokoteplotné plynom chladené reaktory moderované grafitom (materiály, výmenníky tepla, dúchadlá a ďalšie).

Návrh demonštračnej jednotky GFR prebiehal v CEA, čiastočne v AREVA a niekoľkých špecializovaných firmách až do okamžiku zastavenia v roku 2009. V roku 2010 bolo pokračovanie projektu po dohode odovzdané subjektom v krajinách Vyšehradskej štvorky a dochádza k založeniu združenia „V4G4 Centrum of Excellence“ so sídlom na Slovensku. Predmetom projektu je vývoj, konštrukčný návrh, stavba a prevádzka hélíom chladeného rýchleho reaktora s tepelným výkonom 75 MWt. Demonštračná jednotka obsahuje všetky kľúčové komponenty predpokladané pre energetický reaktor GFR2400, avšak bez systému premeny energie, prípadne s využitím tepla pre experimentálne účely.

Cieľom projektu je pomocou demonštračnej jednotky GFR:

- vyriešiť inžinierske úlohy spojené s použitím hélia ako teplonosného média primárneho okruhu (DHR systém, systém čistenia primárneho chladiva, systém výmeny paliva, použité materiály, procedúry bežnej prevádzky),
- testovanie a overenie karbidického paliva (U, Pu)C s povlakom z SiC CMC,
- získanie prvých prevádzkových dát a skúseností s GFR.

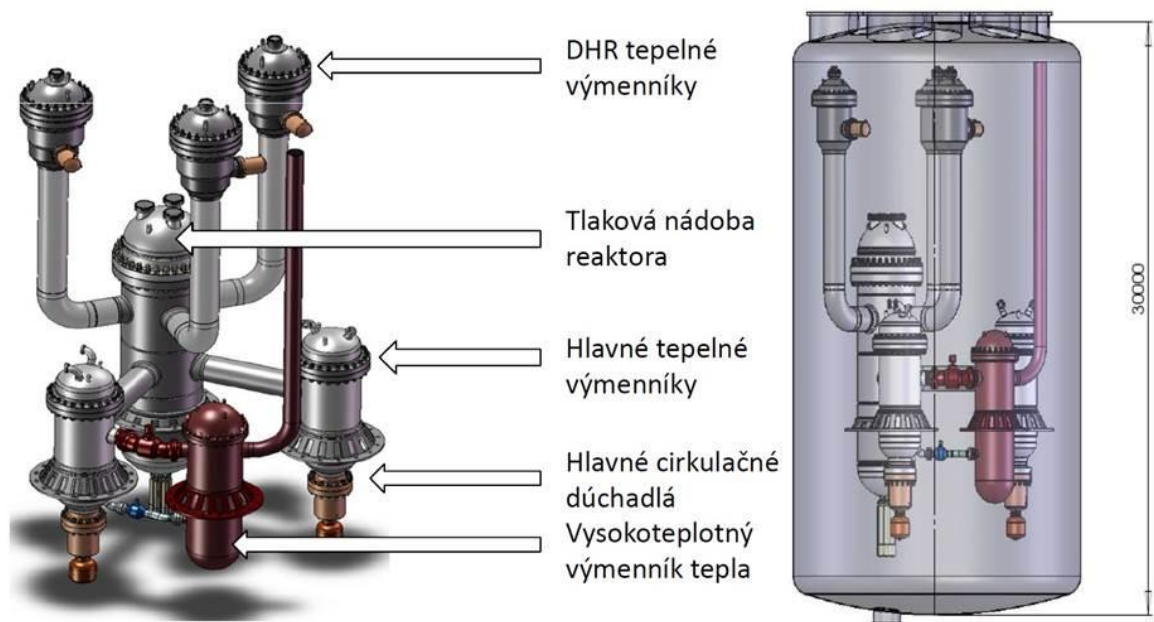
Úspešná demonštrácia technológie GFR predpokladá, že základné vlastnosti 2400 MWt energetickej jednotky môžu byť otestované a preukázané na jednotke s výkonom 75 MWt. Preto sú kľúčové vlastnosti oboch reaktorov podobné (hustota tepelného výkonu a pod.). Spôsob demonštrácie technológie GFR bol CEA navrhnutý v troch hlavných krokoch a je popísaný nasledovne:

1. Spustenie demonštračného reaktora s technologicky známym palivom typu MOX koncepčne prevzatým z programu sodíkom chladeného rýchleho reaktoru na odpovedajúcich parametroch (stredná teplota na vstupe/výstupe aktívnej zóny je cca 260/530°C). V aktívnej zóne je ďalších šesť voľných pozícií pre testovanie keramického paliva. Bližší popis spúšťacieho paliva a aktívnej zóny je uvedený v kapitole 2.4.1.
2. Postupné testovanie jedného až šiestich palivových súborov v dopredu definovaných pozíciách obsahujúcich keramické palivo. Testovanie zahŕňa zvýšenie teploty na výstupe z týchto palivových súborov na cca 850°C. To bude dosiahnuté zníženým prietokom hélia cez testované palivové súbory. Aby nedošlo k prehriatiu susedných palivových kaziet typu MOX bude šesť testovaných súborov odizolovaných keramickou obálkou. Teplota zmiešaného hélia z jednotlivých palivových súborov na výstupe z reaktora nepresiahne pôvodnú hodnotu 530°C.
3. Po úspešnom testovaní keramického paliva sa predpokladá zavezenie celej aktívnej zóny z tohto paliva a prevádzka na cieľových teplotách (vstup/výstup aktívnej zóny 400/850°C). [26]

Je zrejmé, že konštrukčný návrh, optimalizácia prevádzky a licencovanie na dve veľmi odlišné teplotné hladiny chladiaceho média a dva zásadne rozdielne typy paliva bude predstavovať komplexnú a náročnú úlohu. Popis základných technických riešení a parametrov je predmetom nasledujúcej časti tohto dokumentu.

2.4.1 VŠEOBECNÝ POPIS KONŠTRUKCIE PRIMÁRNEHO A SEKUNDÁRNEHO OKRUHU

Obrázok 2-7 zobrazuje originálny návrh primárneho okruhu demonštračnej jednotky GFR od CEA. Podobne ako pri energetickej jednotke GFR2400 aj celý primárny okruh demonštračnej jednotky vrátane troch DHR slučiek je uzatvorený v malej ocelevej ochrannnej obálke pre poskytnutie záložného tlaku v prípade LOCA. Pôvodný návrh ako teplonosné médium sekundárneho okruhu (nezobrazené na obr. 2-7) využíval vodu, avšak, následne bol návrh sekundárneho okruhu upravený a ako chladiace médium využíva hélium, prípadne zmes hélia a dusíka. To má za následok priblíženie konštrukcie energetickej jednotke GFR2400 a zároveň minimalizáciu rizika vniknutia vody do primárneho okruhu, čo by mohlo mať fatálne následky. Terciárny okruh odvádzajúci odpadové teplo z tepelného cyklu využíva ako teplonosné médium vodu alebo vzduch.



Obrázok 2-7 Primárny okruh demonštračnej jednotky GFR v ochrannej obálke [18]

2.4.2 POPIS PALIVA A AKTÍVNEJ ZÓNY

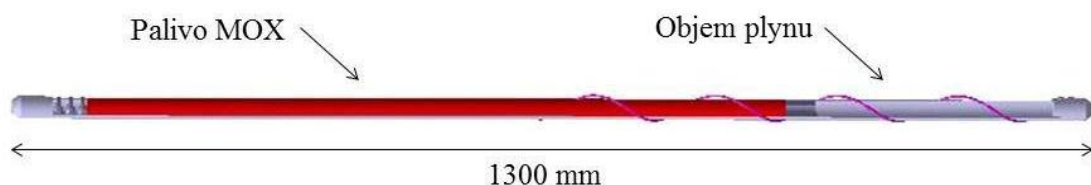
Ako už bolo naznačené, 75 MWt demonštračná jednotka GFR bude fungovať postupne s dvomi rôznymi aktívnymi zónami a druhmi paliva. Prvá, štartovacia aktívna zóna bude pracovať s technologicky známym palivom typu MOX s pokrytím z austenitickej 15 – 15 Ti ocele. Po úspešnej prevádzke s týmto palivom v nej budú postupne umiestnené testované kazety s karbidickým palivom (U, Pu)C s pokrytím z keramikého kompozitu SiC CMC. Po úspešnom testovaní keramikého paliva ním bude zavezená celá aktívna zóna, čo umožní demonštrovať prevádzkyschopnosť technológie na požadovaných teplotách. Pre účely tejto práce je následná časť venovaná popisu konštrukcie štartovacej aktívnej zóny a jej paliva.

2.4.2.1 PALIVO MOX PRE DEMONŠTRAČNÚ JEDNOTKU GFR

Palivová kazeta s MOX palivom obsahuje:

- zväzok 169 palivových prútikov,
- oceľovú špičku pre uchytenie v koši aktívnej zóny,
- horné a dolné neutrónové tienenie,
- horný a dolný reflektorový oceľový blok pre obmedzenie úniku neutrónov,
- hornú hlavu umožňujúcu výstup hélia a manipuláciu s palivovou kazetou.

Okrem dolnej špičky a hornej hlavy je celá palivová kazeta umiestnená v oceľovej hexagonálnej obalovej tube.



Obrázok 2-8 Palivový prútik MOX [26]

2.4.2.2 ŠTARTOVACIA AKTÍVNA ZÓNA DEMONŠTRAČNEJ JEDNOTKY GFR

Aktívna zóna demonštračnej jednotky GFR obsahuje 81 palivových kaziet s MOX palivom (každá kazeta obsahuje 169 palivových prútikov), 6 radiacích kaziet, 4 havarijné kazety a 6 pozícií pre experimentálne kazety. Pozície pre experimentálne kazety budú pri uvádzaní do prevádzky vyplnené oceľovými kazetami, ktoré budú postupne nahradené testovanými palivovými súbormi s SiC palivom.

Aktívna zóna bude obklopená 174 reflektorovými kazetami zoradenými do 4 kruhov a následne 198 kazetami neutrónového tienenia zoradenými do 3 kruhov.

Objemové percentuálne zastúpenie jednotlivých zložiek komponentov aktívnej zóny potrebné pre nasledujúce bilancie je uvedené v Tabuľke 2-1.

Komponent kazety	Zloženie komponentu	
	Zložka	Objemové zastúpenie [obj. %]
Palivo	MOX	37,725
	He	38,367
	Oceľ	23,880
Axiálne tienenie	B ₄ C	50
	He	40
	Oceľ	10
Radiálne tienenie	B ₄ C	70
	He	20
	Oceľ	10
Axiálny reflektor	Oceľ	75
	He	25
Radiálny reflektor	Oceľ	80
	He	20
Zóna pre expanziu plynu (ZEP)	He	77,17
	Oceľ	22,83
Absorbér	He	44
	B ₄ C	33
	Oceľ	23
Tandem	He	87
	Oceľ	13

Tabuľka 2-1 Zloženie komponentov aktívnej zóny² [26]

Najpravdepodobnejšia použitá oceľ je typ 15 – 15 Ti. Z toho dôvodu nasledujúca časť práce predpokladá, že všetka oceľ v komponentoch aktívnej zóny, ktoré majú jej isté zastúpenie (pokrytie paliva, reflektor, tienenie,...) je oceľ 15 – 15 Ti, ktorej zloženie legúr uvádza Tabuľka 2 - 2.

² Objemové zastúpenie hélia (He) v Tabuľke 2-1 je vždy uvedené pri tlaku 7 MPa.

MOX v Tabuľke 2-1 označuje palivo s 25 hm. % PuO₂ a 75 hm. % UO₂ (24,5 mol. % PuO₂ a 75,5 mol. % UO₂).

Oceľ v Tabuľke 2-1 značí nehrdzavejúcu oceľ typu 15-15 Ti, ktorej zloženie je uvedené v Tabuľke 2-2.

Prvok	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	Ti	P	B
Hm. %	0,1	15	15	1,2	0,6	1,5	0,4	0,03	$50 \cdot 10^{-4}$

Tabuľka 2-2 Zloženie ocele 15 - 15 Ti [24]

Tabuľky 2 - 3 zobrazuje konštrukciu palivových, oceľových, reflektorových a tieniacich kaziet. Tieto údaje sú potrebné pre výpočet hmotnostnej a tepelnej bilancie aktívnej zóny.

Konštrukčná výška časti [cm]	Typ kazety				
	Palivová	Riadiaca / havarijná	Oceľová	Reflektorová	Tieniaca
295 – 245	Ax. tienenie	Absorbér	Ax. tienenie	Ax. tienenie	Ax. tienenie
245 – 215	Ax. reflektor	Absorbér	Ax. reflektor	Rad. reflektor	Rad. tienenie
215 – 206	ZEP	Absorbér	Ax. reflektor	Rad. reflektor	Rad. tienenie
206 – 120	Palivo	Tandem / absorbér ³	Ax. reflektor	Rad. reflektor	Rad. tienenie
120 – 80	ZEP	Tandem	Ax. reflektor	Rad. reflektor	Rad. tienenie
80 – 50	Ax. reflektor	Ax. reflektor	Ax. reflektor	Rad. reflektor	Rad. tienenie
50 – 0	Ax. tienenie	Ax. tienenie	Ax. tienenie	Ax. tienenie	Ax. tienenie

Tabuľka 2-3 Popis konštrukcie kaziet aktívnej zóny [26]

³ Pokiaľ je riadiaca alebo havarijná kazeta vysunutá z aktívnej zóny, tak v tejto časti konštrukčnej výšky kazety je tandem. Ak je naopak riadiaca alebo havarijná kazeta zasunutá v aktívnej zóne, v tejto časti konštrukčnej výšky kazety je absorbér.

Tandem je tvorený prázdnu konštrukciu kazety po vytiahnutí prútikov B₄C. To predstavuje zásadný rozdiel v konštrukcii regulačných kaziet používaných v reaktoroch typu VVER kde je tandem tvorený palivom.

3 EXISTUJÚCE RIEŠENIA LAPAČA TAVENINY

Skúsenosti s prevádzkou jadrových elektrární ukazujú, že sa dajú prevádzkovať bezpečne a spoľahlivo. Avšak nepredvídateľné udalosti a mnohokrát významný vplyv ľudského faktora v minulosti spôsobili zlyhanie aj mnohonásobne zálohovaných bezpečnostných systémov a následne znemožnili efektívne chladenie aktívnej zóny reaktora. To môže viesť až k roztaveniu palivových článkov. Za históriu prevádzky jadrových zariadení sme boli svedkami troch ťažkých havárií spojených s tavením aktívnej zóny. V roku 1979 na druhom reaktorovom bloku jadrovej elektrárne Three Mile Island (TMI) v USA, v roku 1986 na reaktorovom bloku č. 4 jadrovej elektrárne Černobyl v bývalom ZSSR a najčerstvejšia podobná udalosť sa udiala dňa 11. 3. 2011 na prvom, druhom a treťom bloku jadrovej elektrárne Fukushima – Daiichi v Japonsku. V prípade TMI došlo k čiastočnému roztaveniu aktívnej zóny, avšak nedošlo k narušeniu tlakovej nádoby reaktora. V prípade ďalších dvoch spomenutých havárií bol rozsah poškodenia omnoho rozsiahlejší. [9]

Aj pri vyššie popísaných udalostiach sa ľudstvo presvedčilo, že strata schopnosti efektívne chladiť aktívnu zónu jadrového reaktora predstavuje významné riziko tavenia jej komponentov spolu s ďalšími vnútroreaktorovými konštrukčnými prvkami. Vzniknutá vysoko energetická tavenina zložená z roztaveného jadrového paliva a konštrukčných materiálov (najmä legovaná oceľ) sa nazýva kórium (z anglického corium). Vysoká teplota taveniny vedie k jej pretaveniu cez tlakovú nádobu reaktora do priestorov pod ňou, pokračujúc eróziou základového betónu a ďalších konštrukcií stavby s potenciálom narušenia integrity kontajneru. Spolu so vznikom taveniny sa generujú aj riziká vzniku výbušných zmesí plynov, ktoré môžu taktiež viesť k narušeniu hermetickosti tlakovej obálky. [9]

Technické riešenie pre zmiernenie následkov ťažkej havárie takéhoto rozsahu spočíva v zachytení vzniknutého kória a jeho následnej stabilizácii. To je možné cez dve koncepčne odlišné riešenia. Prvý prístup spočíva v zadržení kória v spodnej časti TNR a jej externom chladení, tzv. IVR (In-Vessel Retention). Toto riešenie je atraktívne, ale technicky realizovateľné len do určitých výkonov reaktora. Druhý prístup k zmierneniu následkov ťažkej havárie jadrového reaktora počíta s pretavením kória cez spodnú časť TNR a jeho následnom zachytení v na tom určenom zariadení. Toto zariadenie sa nazýva lapač taveniny aktívnej zóny (z anglického Core Catcher). Hlavné funkcie lapača taveniny aktívnej zóny sú: [32]

- prijatie a uchovanie kória,
- zabezpečiť stabilizáciu kória,
- zabrániť šíreniu rádionuklidov mimo priestor lapaču taveniny,
- zabezpečiť podkritičnosť taveniny,
- minimalizovať produkciu vodíka,
- odolať troskám padajúcim z tlakovej nádoby bez narušenia vlastnej funkčnosti,

Pre zaistenie správnej funkčnosti lapača taveniny aktívnej zóny pri akýchkoľvek podmienkach je nutné, aby všetky procesy potrebné pre úspešné zvládnutie havárie prebiehali pasívne - prostredníctvom pôsobenia prírodných síl a pochodov (gravitácia, teplotný gradient, chemické reakcie), a teda bez potreby elektrického prúdu a zásahu človeka.

Počiatkové parametre kória dodaného do lapača taveniny a okrajové podmienky, t. j. vlastnosti prostredia kontajntmentu, sú pri návrhu podobného zariadenia dodané ako vstupné dáta. Konkrétne hodnoty jednotlivých parametrov kória výrazne záležia na scenári havárie predchádzajúcej pretaveniu TNR. Keďže existuje veľké množstvo scenárov ťažkej havárie, sú tu veľké neistoty pri stanovovaní počiatkových vlastností kória dodaného do lapača taveniny. Tak isto, aj okrajové podmienky, t. j. vlastnosti prostredia kontajntmentu nie je možné zovšeobecniť pre všetky možné scenáre. Rovnakú váhu na výsledné vstupné vlastnosti kória majú špecifické vlastnosti typu energetickej jednotky, pre ktorú je ťažká havária uvažovaná. Pre návrhové analýzy sa konzervatívne volia najnáročnejšie hypotetické scenáre a s tým súvisiace vstupné vlastnosti kória a okrajové podmienky, ktoré má projektované zariadenia zvládnuť. Konkrétne:

- maximálny zostatkový tepelný výkon kória,
- maximálna teplota kória,
- minimálna úroveň oxidácie látok v kóriu, lebo napr. značný objem neoxidovaného Zr v kóriu predstavuje významný zdroj tepla pri jeho následnej oxidácii v lapači taveniny aktívnej zóny. [32]

Z vyššie uvedeného je zrejmé, že najväčšie nároky na zariadenie lapača taveniny aktívnej zóny kladú scenáre havárií, ktoré sa vyznačujú relatívne skorým pretavením tlakovej nádoby reaktora a následnou dodávkou kória do lapača taveniny.

3.1 KONCEPCIE LAPAČA TAVENINY

Nutnosť minimalizovať následky ťažkej havárie jadrového reaktora viedla už v minulosti k návrhu rôznych opatrení za týmto účelom. Okrem ostatných opatrení a zariadení vznikali aj rôzne koncepty lapačov taveniny. Prvé patenty zariadení navrhovaných za účelom zachytenia a následnej stabilizácie unikajúceho kória sa datujú do osemdesiatych rokov dvadsiateho storočia.

V súčasnosti existuje niekoľko konceptov lapača taveniny využívajúcich rôzne fyzikálne a chemické procesy pre zachytenie a stabilizáciu taveniny. Zariadenia navrhované za týmto účelom pre reaktory chladené a moderované ľahkou vodou (LWR – Light Water Reactors) sú diametrálne odlišné od zariadení navrhovaných pre reaktory chladené tekutými kovmi. Existujúce riešenia lapačov taveniny pre LWR sú koncepčne bližšie možnému prevedeniu pre GFR ako tie, navrhované pre reaktory chladené tekutými kovmi. Z tohto dôvodu môžu slúžiť ako istá inšpirácia a technologická základňa pri návrhu konceptu lapača taveniny pre GFR. Ich stručnému popisu je venovaná nasledujúca časť tejto práce.

Podľa základných vlastností je možné lapače taveniny rozdeliť nasledovne:

- využívajúce alebo nevytvárajúce obetný materiál pre nariedenie (v zmysle redukcie objemového zostatkového výkonu) za účelom znížiť výslednú teplotu taveniny pre možnú spoľahlivú prevádzku chladiaceho systému,
- podľa geometrie zariadenia na horizontálne a vertikálne,
- podľa spôsobu využívania chladiacej vody na „mokré“ a „suché“. Mokré koncepty využívajú na odvod tepla priamy kontakt taveniny s vodou. Suché koncepty využívajú odvod tepla cez steny nádoby zadržujúcej kórium. [32]

Rôznou kombináciou týchto princípov je možné dôjsť k rôznym výsledným koncepciám lapačov taveniny. Niektoré aktuálne aplikované konkrétne zariadenia sú popísané v nasledujúcej časti práce.

3.2 JADROVÉ REAKTORY GENERÁCIE III+

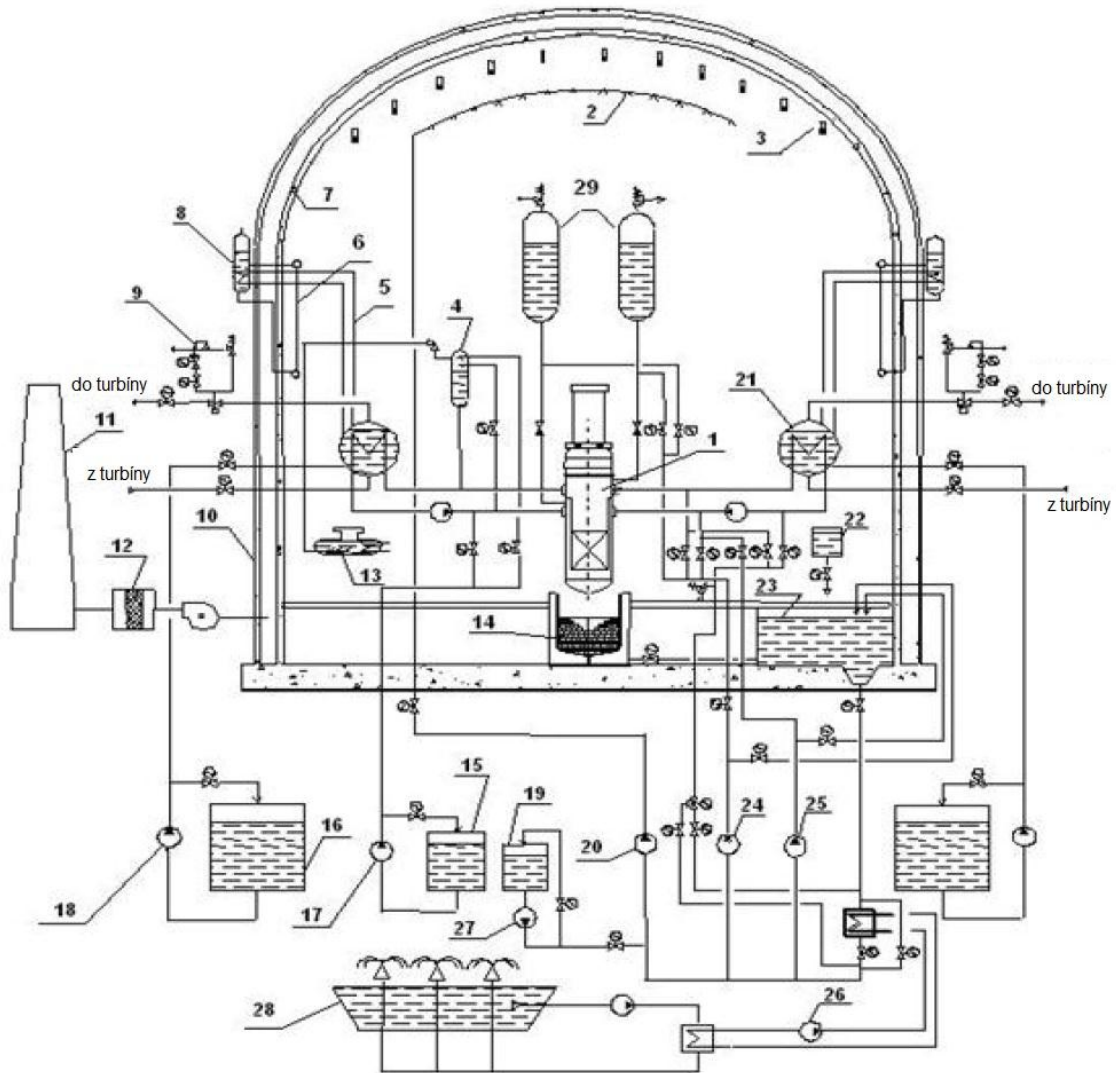
Uvažujeme hypotetickú, ťažkú haváriu, pri ktorej nebolo možné predísť taveniu aktívnej zóny. Nepodarilo sa ani stabilizovať čiastočne roztavenú aktívnu zónu. Vniknuté kórium pôsobením gravitácie postupuje smerom k dnu tlakovej nádoby reaktora, ktorá, ak nie je efektívne chladená, je pretavená. Pri podobnom scenári je potrebné taveninu zachytiť v zariadení na tom určenom - lapači taveniny a zabrániť tak jej ďalšiemu postupu a narušeniu štruktúr kontajnementu. Pre tento účel bolo navrhnutých niekoľko zariadení, ktoré využívajú rôzne procesy pre zachytenie, udržanie a následnú stabilizáciu kória. Ich popis je obsahom nasledujúcej časti práce.

3.2.1 MIR 1200

Projekt MIR1200 je výsledkom evolučného vývoja rokmi overenej technológie tlakovodného reaktora VVER-1000, začínajúcej typom V-320 dnes prevádzkovej napr. na jadrovej elektrárni Temelín a pokračujúcej niekoľkými verziami dnes aplikovanými inde vo svete. Projekt MIR1200 využíva súčasný typ reaktora VVER-1200 s projektovou životnosťou 60 rokov, ktorý je súčasťou štvorslučkovej elektrárne generácie III+ s horizontálnymi parogenerátormi a elektrickým výkonom približne 1200 MWe.

Bezpečnostný koncept je založený na primárnom využívaní aktívnych bezpečnostných systémov pre zvládnutie projektových havárií a kombinácii aktívnych a pasívnych bezpečnostných systémov pre prevenciu a zvládnutie ťažkých havárií. Ku všeobecným zlepšeniam v oblasti bezpečnosti v porovnaní so súčasnými elektrárnami patrí zvýšená redundancia bezpečnostných systémov, kontajnement odolný voči pádu veľkého lietadla a taktiež realistické uváženie ľudského faktora. [12]

Systémy pre zvládnutie nadprojektovej havárie môžu byť v porovnaní s tradičnými systémami JE s VVER považované za nové a inovatívne. Medzi tieto systémy patrí systém pasívneho odvodu tepla z parogenerátorov a kontajnementu, systém znižovania koncentrácie vodíka, systémy záložného napájania využívajúci mobilný diesel generátor a taktiež lapač taveniny aktívnej zóny, ktorý je predmetom nasledujúcej časti tejto práce.



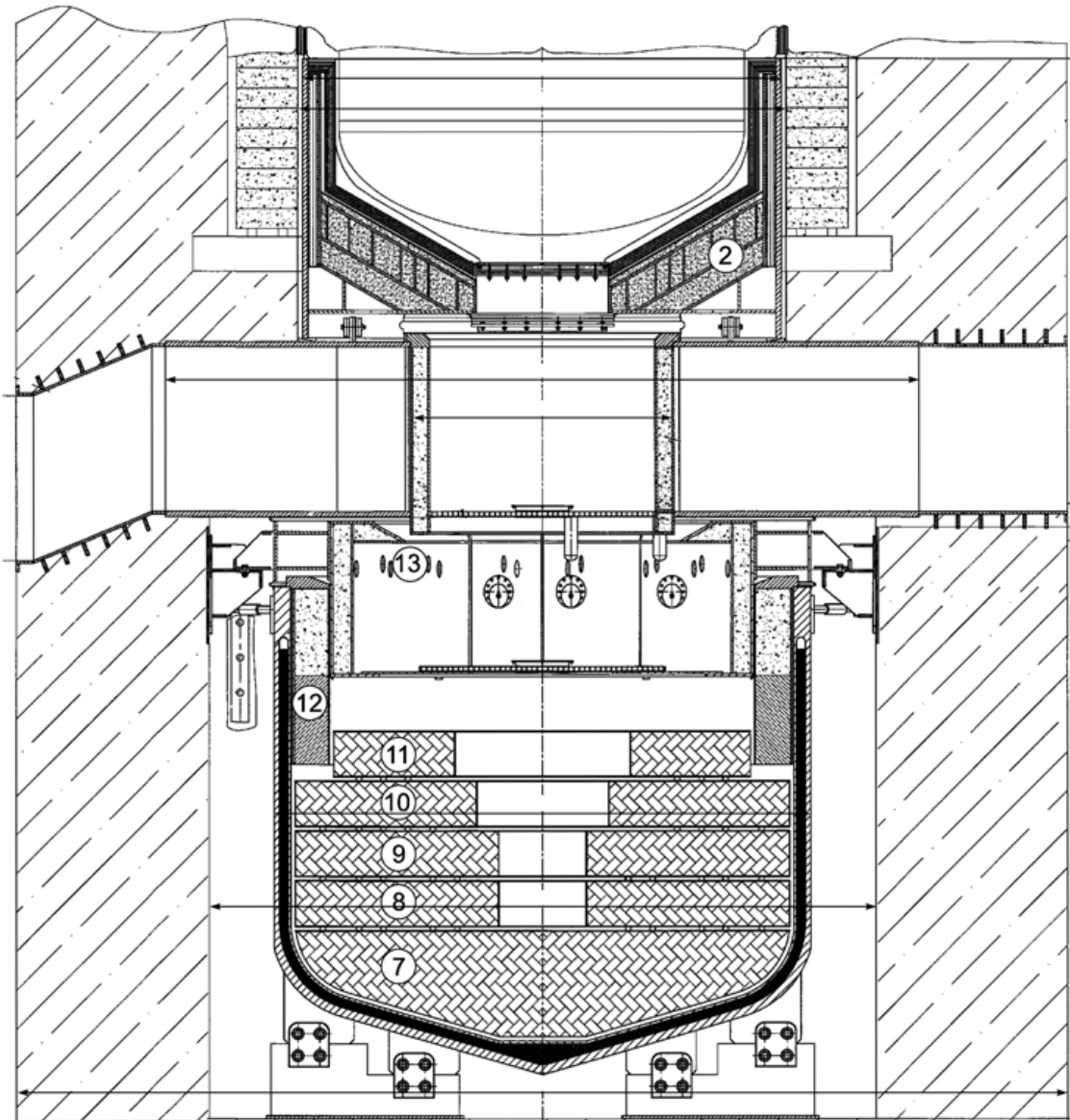
Legenda: 1 - reaktor, 2 - sprchový systém, 3 - pasívne vodíkové rekombinátory, 4 - kompenzátor objemu, 5 - pasívny systém odvodu tepla cez parogenerátory, 6 - kondenzátor systému odvodu tepla z kontajneru, 7 - hermetická vnútorná obálka, 8 - nádrž pasívneho systému odvodu tepla, 9 - ventily hlavného parného potrubia, 10 - vonkajšia obálka, 11 - ventiláčny komín, 12 - filter, 13 - barbotér, 14 - lapač taveniny, 15 - zásobná nádrž roztoku kyseliny boritej, 16 - zásobná nádrž demineralizovanej vody, 17 - čerpadlo doplnujúceho systému pre zabórovanie, 18 - čerpadlo havarijného napájania, 19 - zásobná nádrž chemikálií, 20 - čerpadlo sprchového systému ECCS, 21 - parogenerátor, 22 - havarijná alkalická zásobná nádrž, 23 - nádrž kontajneru a bazén výmeny paliva, 24 - nízkotlaké vstrekovacie bezpečnostné čerpadlo, 25 - vysokotlaké vstrekovacie bezpečnostné čerpadlo, 26 - čerpadlo vloženeho okruhu chladenia, 27 - čerpadlo chemickej úpravy vody, 28 - bazén havarijného sprchového chladiaceho systému, 29 - nádrže havarijného hydroakumulátorového chladiaceho systému aktívnej zóny

Obrázok 3-1 Principiálna technologická schéma bezpečnostných systémov energobloku AES2006/MIR1200 [10]

3.2.1.1 LAPAČ TAVENINY AKTÍVNEJ ZÓNY MIR1200

Nižšie popísaná verzia lapača taveniny aktívnej zóny schematicky znázornená na *Obr. 3-2* je súčasťou systémov pre riadenie ťažkej havárie elektrárne AES2006/MIR1200. Je výsledkom evolučného vývoja skôr aplikovaných lapačov taveniny elektrární na lokalitách Tianwan (Čína) a Kudankulam (India). Základné vlastnosti a konštrukčné prístupy zabezpečujúce naplnenie funkcie lapača taveniny, popísané skôr v kap. 3, možno zhrnúť do nasledujúcich bodov: [11]

- ako základné konštrukčné riešenie bola zvolená vodou chladená nádoba („hrniec“) umiestená v priestore priamo pod tlakovou nádobou reaktora,
- využíva obetné materiály pozostávajúce zo zmesi oxidov železa a hliníka (cieľom je aby tavenina, ktorá vznikne po interakcii obetného materiálu s kóriom privedeným do lapača taveniny, mala nižšiu entalpiu a nové, vyhovujúcejšie teplo-fyzikálne a chemické vlastnosti)
- nádoba lapača taveniny je dvoj vrstvová s keramikou výplňou,
- podkritičnosť výslednej taveniny je dosiahnutá obsahom gadolína v obetnom materiáli [11]



Legenda: 1 – tlaková nádoba reaktora, 2 – spodná doska, 3 – nosníky, 4 – technologický koridor, 5 – nádoba lapača taveniny aktívnej zóny, 6 – betónová šachta reaktora, 7 až 11 – bloky obetného materiálu, 12 – blok tepelnej izolácie, 13 – obslužná plošina, 14 – ventilačný kanál

Obrázok 3-2 Schéma lapača taveniny aktívnej zóny elektrárne AES2006/MIR1200 [11]

Vnútrotný objem nádoby lapača taveniny je už pri výstavbe elektrárne z časti vyplnený obetným materiálom, ktorého hlavné zložky tvoria oxidy železa a hliníka. Obetný materiál je určený k dodatočnej oxidácii zložiek kória a k jeho nariedeniu za účelom

zníženia objemovej hustoty tepelného výkonu a k zväčšeniu teplovýmennej plochy medzi taveninou a povrchom nádoby lapača taveniny, ktorá je chladená vodou z nádrže kontajnementu (obr. 3-1, pozícia 23). V nádrži kontajnementu je zachytávaná voda unikajúca z primárneho okruhu pri LOCA. Taktiež voda z hydroakumulátorov, ktorá je dopĺňaná do primárneho okruhu pri scenári predchádzajúcom taveniu aktívnej zóny je cestou úniku zhromažďovaná v nádrži kontajnementu. Celkový objem vody v zbernej nádrži kontajnementu je väčší ako 1500 m^3 . [11]

Proces chladenia kória zachyteného v lapači taveniny začína nahriatím samotného telesa lapača taveniny a tavením obetného materiálu. Prvý spôsob chladenia taveniny je predstavuje teplo odvádzané vonkajšími stenami nádoby lapača taveniny do vody, ktorá zaplavila reaktorovú šachtu cez ventily pasívne aktivované zvýšenou teplotou komponentov lapača taveniny. Voda v reaktorovej šachte sa postupne ohrieva až na teplotu varu a následne tvorená para je odvádzaná sieťou distribučných kanálov do hermetických priestorov kontajnementu kde kondenzuje a je spätne zhromažďovaná v zbernej nádrži kontajnementu. Takto je zabezpečený stály dostatok vody pre pasívne chladenie telesa lapača taveniny. Druhá cesta chladenia zachyteného kória predstavuje priame zaplavenie povrchu taveniny cez pasívne ventily umiestnené v telese lapača. Tvorená para je tak isto odvádzaná do priestorov kontajnementu. [10]

Fyzikálne – chemická interakcia zložiek kória s obetným materiálom, začínajúca pri danej teplote a pri kontakte dvoch materiálov, zahŕňa zahrievanie obetného materiálu, tavenie, rozpúšťanie, rozpad a chemické reakcie medzi zložkami kória a obetným materiálom. Chemické reakcie prebiehajúce v lapači taveniny môžeme rozdeliť do dvoch skupín: tie, ktoré prebiehajú priamo na línii tavenia (oblasť styku taveniny a obetných materiálov) a tie, ktoré prebiehajú v celom objeme vzniknutej taveniny po premiešaní produktov reakcií na línii tavenia a nezreagovaných zložiek obetného materiálu a kória. Prvá skupina chemických reakcií ovplyvňuje stav iba relatívne malého objemu látok na línii tavenia, zatiaľ čo druhá skupina reakcií má vplyv na celý objem látok v lapači taveniny. [11]

Pri návrhu lapača taveniny konceptu nádoby hrcovitého tvaru sa uvažujú tieto predpoklady:

- tepelný tok privádzaný k povrchu obetného materiálu a do objemu taveniny je stanovený teplom uvoľneným exotermickými chemickými reakciami prebiehajúcimi na línii tavenia a zákonmi prirodzenej konvekcie prebiehajúcej v tavenine,
- prenos hmoty medzi líniiou tavenia, obetným materiálom a taveninou pozostáva z prítoku oxidov železa a neoxidovaného Fe z nataveného obetného materiálu a dodávaním Zr a komponentov ocele (Fe, Cr, Ni) z kória do línii tavenia,
- produkty chemických reakcií a nezreagované komponenty obetných materiálov (oxidy hliníka, nadbytočné oxidy železa alebo Fe) po roztavení difundujú do objemu taveniny a v prípade vytvoreného rozvrstvenia sa pridávajú do príslušných vrstiev. [11]

Na línii tavenia sa postupne zo strany obetných materiálov môžu vyskytovať tieto chemicky aktívne látky: Fe, Fe_2O_3 a H_2O (voda je viazaná v štruktúrach obetných materiálov); zo strany kória uvažujeme: Zr, Fe, Cr, Ni. Rôzne látky sa účastina na chemických reakciách s rôznou intenzitou, napr. pri súbežnej oxidácii Zr a Fe je prínos

celkového vyprodukovaného tepla z oxidácie Fe asi 4%. Z toho plynie, že v prípade prítomnosti dostatočného množstva Zr je prínos od oxidácie Fe zanedbateľný. [11]

3.2.1.2 STRUČNÝ POPIS PRIEBEHU ŤAŽKEJ HAVÁRIE MIR1200

Ako najnáročnejší potenciálny scenár priebehu ťažkej havárie bol po numerickej analýze programom SOKRAT vybraný veľký únik chladiaceho média LB – LOCA (Large Break Loss Of Coolant Accident) spojený so zlyhaním aktívnych bezpečnostných systémov zabezpečujúcich núdzové chladenie aktívnej zóny ECCS (Emergency Core Cooling System).

Tento scenár sa vyznačuje relatívne skorým pretavením kória cez stenu tlakovej nádoby do lapača taveniny a preto vysokým zostatkovým tepelným výkonom, vysokou teplotou a nízkou mierou oxidácie zložiek. Počas prvých šiestich minút tavenina dodávaná do lapača taveniny obsahuje iba kovovú časť kória, tá reaguje s obetným materiálom, čo spôsobuje jeho prvé, čiastočné natavenie. Vzniknutá tavenina sa začína rozvrstvovať a ľahké oxidy (ZrO_2 , Al_2O_3 , FeO) vzniknuté pri interakcii s obetným materiálom vyplávajú na povrch. Čoskoro sú do lapača taveniny dodané prvé zložky kória obsahujúce UO_2 . Tento ťažký oxid klesá taveninou a vytvorí jej spodnú vrstvu. Pokračujúca interakcia s obetnými materiálmi ho nasycuje ľahkými oxidmi až jeho hustota klesne natoľko, že postupne vypláva na povrch roztavených látok nachádzajúcich sa v lapači taveniny. Po približne 2 hodinách od pretavenia tlakovej nádoby reaktora je roztavená vnútorná stena lapača taveniny aj s keramikou výplňou nachádzajúcou sa v medzere dvojitej steny. Teplota vnútorného povrchu vonkajšej steny lapača taveniny nepresiahne 1350 K, čo nespôsobí narušenie jej integrity. [11]

3.2.1.3 ZHODNOTENIE

Jeden z najdôležitejších parametrov potrebných pre dokázanie funkčnosti lapača taveniny tejto koncepcie je tepelný tok odvádzaný vodou z vonkajšej steny nádoby. Maximálny tepelný tok nesmie presiahnuť hodnotu kritického tepelného toku pre daný povrch. Toto sa dosiahne nariedením kória obetným materiálom, zvýši sa tak teplovýmenná plocha a klesne merná entalpia výslednej taveniny. Obe skutočnosti prispievajú k zníženiu merného tepelného toku stenou lapača. Pri návrhu lapača taveniny podobného konceptu je potrebné brať do úvahy aj nezanedbateľné množstvo vodíka produkovaného pri interakcii kória so zložkami obetného materiálu. V kontajnmene MIR1200 sú umiestnené rekombinátory vodíka, avšak v konajmente demonštračnej jednotky GFR tomu tak nie je. Aj túto skutočnosť je potrebné zohľadniť.

3.2.2 EPR

Projekt EPR (Evolutionary Power Reactor alebo European Pressurized Reactor), vyvinutý spoločnosťou AREVA, je založený na skúsenostiach nadobudnutých počas tisícok reaktorových rokov prevádzky tlakovodných reaktorov po celom svete, najmä však jeho predchodcov: francúzky N4 a nemecký KONVOI. Ide o štvorslučkovú elektrárň generácie III+ s tlakovodným reaktorom poskytujúcim tepelný výkon 4616 MWt (cca 1750 MWe). Projektové inovácie uplatnené pri návrhu EPR logicky smerujú k zvýšeniu ekonomiky prevádzky elektrárne (udávaná účinnosť premeny energie 36%) a k zlepšeniu jej bezpečnostných charakteristík v porovnaní so súčasne prevádzkovanými reaktormi. [12]

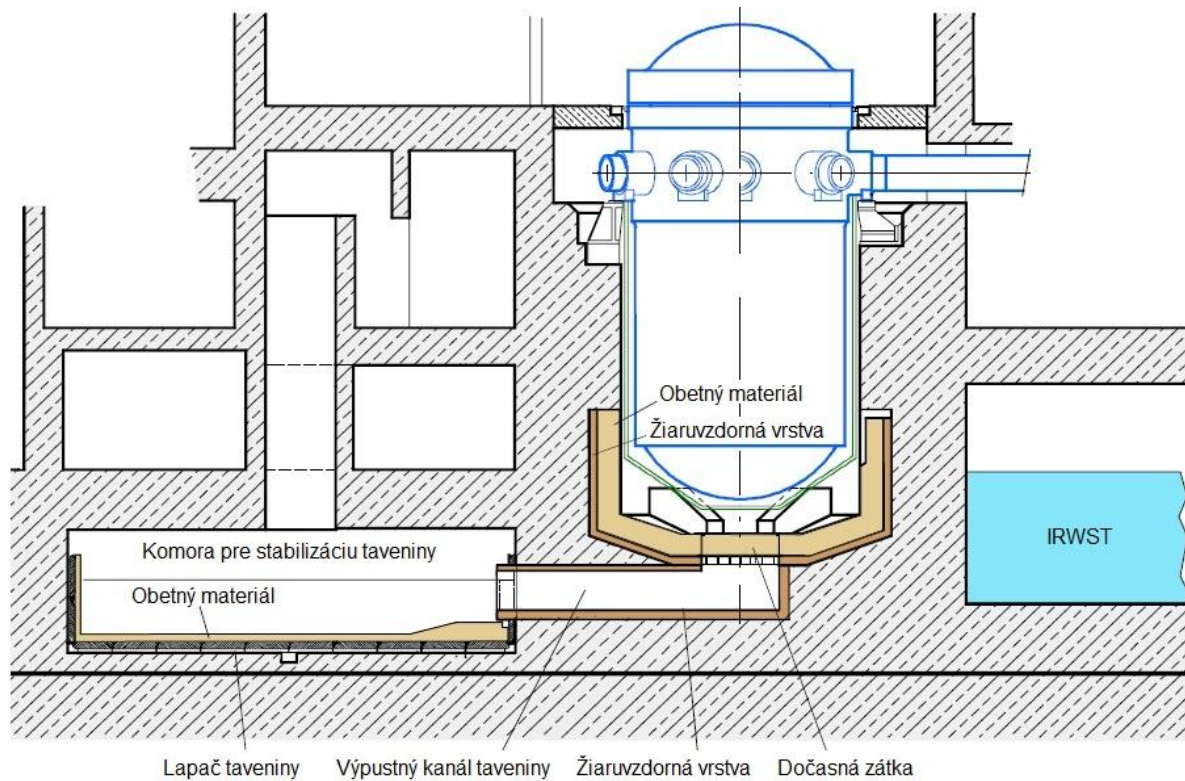
Konštrukcia hlavných komponentov EPR vychádza z evolučného procesu tlakovodných reaktorov, napr. návrh primárneho okruhu je podobný so súčasne prevádzkovanými reaktormi, čo je možno považovať za overený projektový základ. Evolučný prístup pri vývoji EPR je evidentný aj z dôrazu kladeného na aktívne prvky bezpečnosti, avšak so zvýšenou redundanciou a diverzitou. Kontajner, budova s vyhoreným jadrovým palivom a dve zo štyroch budov bezpečnostných systémov sú odolné voči pádu dopravného či vojenského lietadla, čo možno označiť za bezpečnostné prvky, ktoré sú v porovnaní so súčasne prevádzkovanými reaktormi nové. Medzi inovatívne bezpečnostné riešenia elektrárne patrí aj pasívny systém zmiernenia následkov prípadnej ťažkej havárie spojenej s tavením aktívnej zóny – lapač taveniny aktívnej zóny, ktorému je venovaná nasledujúca časť práce. [12]

3.2.2.1 LAPAČ TAVENINY AKTÍVNEJ ZÓNY EPR

Návrh riešenia ťažkej havárie reaktora EPR vychádza z faktu, že pri danom výkone aktívnej zóny reaktora je v prípade jej roztavenia nemožné udržanie vzniknutého kória v tlakovej nádobe reaktora prostredníctvom jej externého chladenia. Z tohto dôvodu projekt EPR ako nástroj zmiernenia následkov ťažkej havárie využíva zariadenie na stabilizáciu kória mimo tlakovej nádoby reaktora, podobne ako pri MIR1200, avšak s iným prístupom k riešeniu problému. Základný koncept spočíva v roztečení kória po veľkej, na to určenej ploche mimo reaktorovej šachty. Týmto sa zväčší povrch taveniny, z ktorého je možné odvádzať teplo a tak dosiahnuť jej efektívnejšie chladenie. [13]

Základný princíp a komponenty systému stabilizácie taveniny EPR sú popísané v nasledujúcich bodoch:

- systém pre dočasné zadržanie kória umiestnený bezprostredne pod tlakovou nádobou reaktora určený na akumuláciu kória po dobu potrebnú na zhromaždenie všetkých produktov tavenia,
- vrstvu obetného materiálu, ktorý slúži na úpravu vlastností kória počas doby jeho dočasného zadržania,
- „zátku“ v spodnej časti systému dočasného zadržania kória, ktorá po pretavení uvoľní cestu tavenine pre vyliatie sa do veľkej komory pre stabilizáciu taveniny,
- systém pre chladenie a stabilizáciu taveniny rozliatej po rozsiahlej ploche komory prostredníctvom kontrolovaného zaplavovania [14]



Obrázok 3-3 Lapač taveniny EPR [14]

Dočasné zadržanie kória v reaktorovej šachte a jeho výsledná akumulácia sú dosiahnuté vrstvou obetného materiálu na stenách reaktorovej šachty. Žiaruvzdorná vrstva pod obetným materiálom tvorí poslednú ochranu podporných štruktúr TNR v prípade lokálneho pretavenia obetného materiálu a zároveň vymedzuje jedinou cestu pre únik taveniny. Čas zadržania taveniny v reaktorovej šachte je určený dobou potrebnou na pretavenie zátky, ktorá taktiež uzatvára prepojenie medzi reaktorovou šachtou a komorou pre stabilizáciu taveniny počas prevádzky. Toto prepojenie je otvorené len v prípade ťažkej havárie pretavením zátky. Popísané oddelenie šachty reaktora a komory pre stabilizáciu taveniny zabezpečí nie len ochranu lapača taveniny od zaťaženia spojeného s pretavením TNR, ale taktiež chráni lapač taveniny od prípadného zaplavenia vodou počas prevádzky elektrárne. Vďaka tomu je bezpečnosť elektrárne zaistená aj pri neočakávaných udalostiach. [13]

Zátka pozostáva z troch častí: vrstvy obetného materiálu vysokej asi 50 cm, oceľovej platne o hrúbke cca 4 cm (nazývajú „brána“) a podporného systému, ktorý zabezpečuje jej správnu polohu a zároveň umožňuje odstránenie zátky cez výpustný kanál v prípade kontroly. Na základe experimentov skúmajúcich interakciu kória s obetným materiálom je čas pretavenia zátky 5 až 40 min, v závislosti od zloženia taveniny, s ktorou je v kontakte (kovová, oxidická alebo zmiešaná). [13]

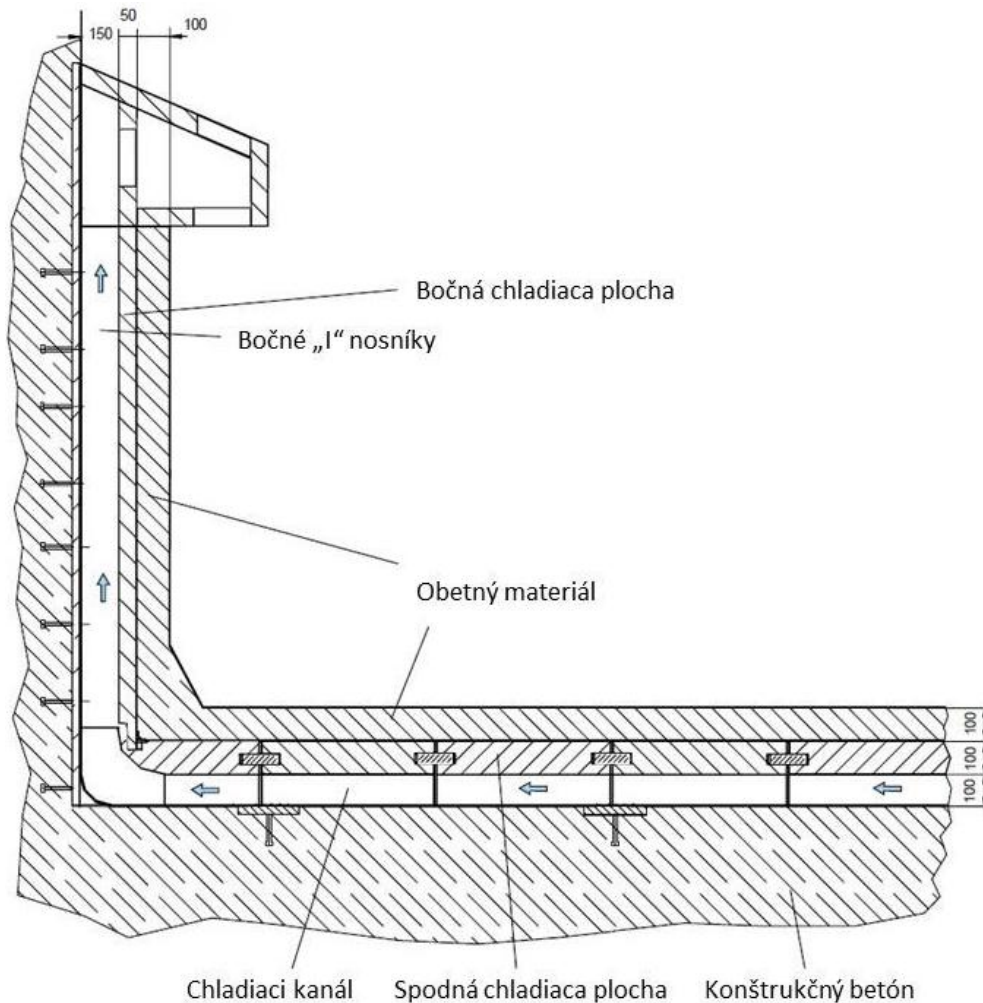
Po pretavení zátky systému dočasného zadržania sa kórium nariedené obetným materiálom dostáva do oblasti určenej pre jeho rozliatie pozostávajúcej zo 7,25 m dlhého výpustného kanála ústiaceho do komory pre stabilizáciu taveniny s rozlohou cca 170 m². Povrch výpustného kanálu je chránený vrstvou žiaruvzdornej keramiky a plocha komory pre stabilizáciu taveniny je tvorená vrstvou obetného materiálu slúžiaceho pre dodatočnú úpravu jej vlastností. Keďže je komora pre stabilizáciu taveniny jednosmerne izolovaná od kontajmentu, nebude počas ťažkej havárie zaplavená unikajúcou vodou z primárneho

okruhu, sprchovými systémami alebo inými cestami. Aj keď by takéto zaplavenie nevytláčilo efektívne splnenie účelu lapača taveniny, roztekanie a interakcia jednotlivých komponentov je za suchých podmienok predvídateľnejšia. [13, 14]

Komora pre stabilizáciu taveniny je vlastne plytká nádoba. Jej dno a steny sú tvorené veľkým množstvom oceľových odliatok, pokrytých žiaruvzdorným a následne obetným materiálom. Nahriatie oblasti kóriom otvorí pasívne ventily, ktoré otvoria cestu pre gravitačné pritekanie vody z bazénu skladovania paliva. Voda najskôr zaplaví rozdeľovací kanál umiestnený pod dnom komory pre stabilizáciu taveniny. Odtiaľ je ďalej voda pôsobením hydrostatického tlaku tlačaná systém paralelných, horizontálnych chladiacich kanálov tvorenými rebrami na spodnej strane chladiacich elementov. Následne sa voda dostane do priestoru za bočnými stenami komory pre stabilizáciu taveniny, odkiaľ preteká cez obvod komory a zaplavuje tak povrch taveniny. Zaplavovanie komory pokračuje pokiaľ sa hydrostatické tlaky v bazéne skladovania paliva a komore pre stabilizáciu taveniny nevyrovnejú. [13]

Ako návrh spodnej strany chladiacich elementov boli testované dva varianty. V prvom bolo teplo z taveniny odvádzané cez vrstvu samospekajúcej zirkóniovej hmoty nachádzajúcej sa medzi chladiacimi elementmi a obetným materiálom na chladiacich elementoch (vrstva pre zmiernenie tepelného toku chladiacimi elementmi). Izolačný efekt zirkóniovej vrstvy udrží tepelný tok na relatívne nízkej úrovni (cca 10 kW/m^2). Chladiace elementy takto nepodliehajú deformácii a degradácii a systém je dlhodobu stabilný. [13, 14]

Druhý variant je bez izolačnej vrstvy zirkónia. Výsledky analýz ukazujú, že pri takomto usporiadaní tepelný tok chladiacimi elementmi dosahuje až 80 kW/m^2 . Nedávne experimenty ukazujú, že chladiace elementy konceptu ilustrovanom na obrázku dokážu efektívne odvieť aj tepelný tok na takejto úrovni. Tento fakt je pripisovaný skutočnosti, že teplovýmenné plochy sú horizontálneho aj vertikálneho smeru. Preto, aj keď sa vytvorí parný vankúš v hornej vrstve kanálu so silným izolačným efektom, nespôsobí to úplné vyschnutie všetkých teplovýmenných plôch. Toto zistenie umožnilo odstrániť izolačnú vrstvu zirkónia z návrhu lapača taveniny a zjednodušiť výsledné riešenie (zobrazené na obrázku 3 - 4). Chladiace elementy sú pokryté 10 cm hrubou vrstvou obetného materiálu slúžiaceho na zabránenie nadmernému tepelnému zaťaženiu chladiacich elementov počas roztekania kória a poskytuje dostatok času pre vodu na zaplavenie všetkých teplovýmenných plôch. [13, 14]



Obrázok 3-4 Systém teplovýmenných plôch lapača taveniny EPR (návrh a rozmery sú iba indikatívne) [13]

Chladiace elementy bočných stien sú tenšie ako tie na podstave komory pre stabilizáciu taveniny. Sú flexibilne spojené s vertikálnymi nosníkmi v bočných stenách aj so spodnými chladiacimi elementmi, čo umožňuje bezproblémovú dilatáciu celého komplexu počas procesu nahrievania. Okrem chladiacej funkcie vertikálne kanály umožňujú efektívny únik pary generujúcej sa v spodných horizontálnych chladiacich kanáloch do priestoru nad hladinou vody zaplavujúcej taveninu. [13, 14]

3.2.2.2 ZHODNOTENIE

Vykonané analýzy ukazujú, že dočasné zadržanie kória v reaktorovej šachte a jeho interakcia s obetným materiálom efektívne zjednocujú parametre výslednej taveniny vstupujúcej do komory určenej pre jej stabilizáciu. Pri úniku malého množstva materiálu z tlakovej nádoby reaktora, alebo pri neskoršom uvoľnení kória z tlakovej nádoby reaktora bude hustota tepelného výkonu kória relatívne nízka a teda pretavenie zátky systému dočasného zadržania bude trvať dlhší čas a naopak. To zabezpečí dostatočnú akumuláciu taveniny a trosiek vnútro - reaktorových častí nezávisle na scenári ťažkej havárie a podmienkach narušenia integrity tlakovej nádoby reaktora. Vyplýva to zo skutočnosti, že na pretavenie definovanej hmotnosti známeho materiálu tvoriaceho zátku a okolité štruktúry je potrebné generovať definované množstvo tepla.

Zvolená stratégia oddeliť systémy určené pre akumuláciu taveniny bezprostredne po úniku kória z tlakovej nádoby reaktora a pre dlhodobú stabilizáciu taveniny, robia tento

koncept lapača taveniny veľmi odolným voči neistotám konkrétnych scenárov prameniach z nesmiernej komplexnosti systémov, akými moderné jadrové elektrárne bez pochyb sú.

4 ANALÝZA ŤAŽKEJ HAVÁRIE DEMONŠTRAČNEJ JEDNOTKY GFR

Pri návrhu tak komplexného inžinierskeho zariadenia, akým je jadrová elektrárňa, ktoré môže za určitých okolností ohroziť zdravie a bezpečnosť ľudí alebo vážnym spôsobom narušiť životné prostredie, je vždy potrebné rozhodnúť, ktoré z možných udalostí je potrebné pri návrhu uvažovať a projekt prispôbiť tak, aby im odolal bez narušenia bezpečnostných systémov a komponentov potrebných pre zaistenie bezpečnosti zariadenia počas a aj po uvažovanej udalosti. Pre takéto udalosti je zaužívaný pojem projektové udalosti a ich vplyvom môžu na zariadení nastať projektové havárie (v anglickej literatúre označované ako design basis accident). Bežne medzi ne patria napr. zlyhanie určitých komponentov systému elektrárne (prasknutie potrubia primárneho okruhu a pod.), živelné pohromy istého rozsahu (zemetrasenia, záplavy, snehové kalamity a pod.) alebo rôzne formy uvažovaných teroristických útokov. Ak udalosť a havária ňou spôsobená presiahnu túto hranicu a dôjde k narušeniu základných bezpečnostných funkcií zariadenia a k následnému bezprostrednému ohrozeniu zdravia ľudí prípadne životného prostredia, hovoríme o nadprojektovej havárii (beyond design basis accident). Sila zemetrasenia a následnej prívalovej vlny v roku 2011, ktorá spôsobila haváriu na troch blokoch jadrovej elektrárne Fukushima - Daiichi, bola uvažovaná ako veľmi nepravdepodobná, projekt elektrárne jej nebol prispôbený a preto s použitím popísanej terminológie nazvaná ako nadprojektová havária.

Bezpečnostné štandardy reaktorov štvrtej generácie, medzi ktoré patrí aj reaktor GFR a jeho demonštračná jednotka, vyžadujú považovať aj tak nepravdepodobné scenáre, ktoré by mohli viesť až k roztaveniu aktívnej zóny reaktora, ako projektové havárie. Jedným z možných riešení je aj chladenie kória pretaveného mimo tlakovú nádobu reaktora v zariadení na tom určenom, takzvanom lapači taveniny. Pre zistenie podmienok, ktoré musí lapač taveniny zvládnuť je potrebné spracovať analýzu ťažkej havárie reaktora, ktorou sa zaoberá nasledujúca časť práce.

4.1 MATERIÁLOVÁ A TEPELNÁ BILANCIA

V nasledujúcej kapitole je spracovaný predbežný bilančný odhad tavenia aktívnej zóny reaktora ALLEGRO v dôsledku hypotetickej ťažkej havárie. Sú spracované aj potrebné fyzikálne vlastnosti paliva a konštrukčných materiálov.

4.1.1 VLASTNOSTI MOX PALIVA

Nasledujúca časť práce je venovaná výpisu fyzikálnych vlastností MOX paliva, navrhovaného pre reaktor ALLEGRO, potrebných pre nadchádzajúce výpočty. Využitie sú najmä odporúčané hodnoty a korelácie, získané na základe analýz výsledkov viacerých experimentov, zhrnutých v literárnych prameňoch [27] a [28].

Na základe podkladov poskytnutých zo strany ÚJV Řež, a. s., je uvažovaný hmotnostný podiel zložky PuO_2 v palive 25 hm. %, čo odpovedá molárnemu podielu 24,5 mol.%.

4.1.1.1 TEPLOTA TAVENIA A TUHNUTIA

Teplota tavenia MOX paliva je funkciou molárneho podielu zložiek PuO_2 (y) a UO_2 a vyhorenia paliva. Teplota tavenia paliva klesá s rastúcim molárnym podielom PuO_2 a taktiež klesá s rastúcim vyhorením paliva. Fázový diagram získaný krivkami tavenia a tuhnutia pre čerstvé palivo je získaný na základe analýzy experimentálne získaných dát. Teploty tavenia $[T_L(y)]$ a tuhnutia $[T_S(y)]$ sú dané empirickými vzťahmi (1) a (2). Efekt

zníženia teploty tavenia s rastúcim vyhorením paliva v kampani nie je pre účely tejto práce uvažovaný. [27]

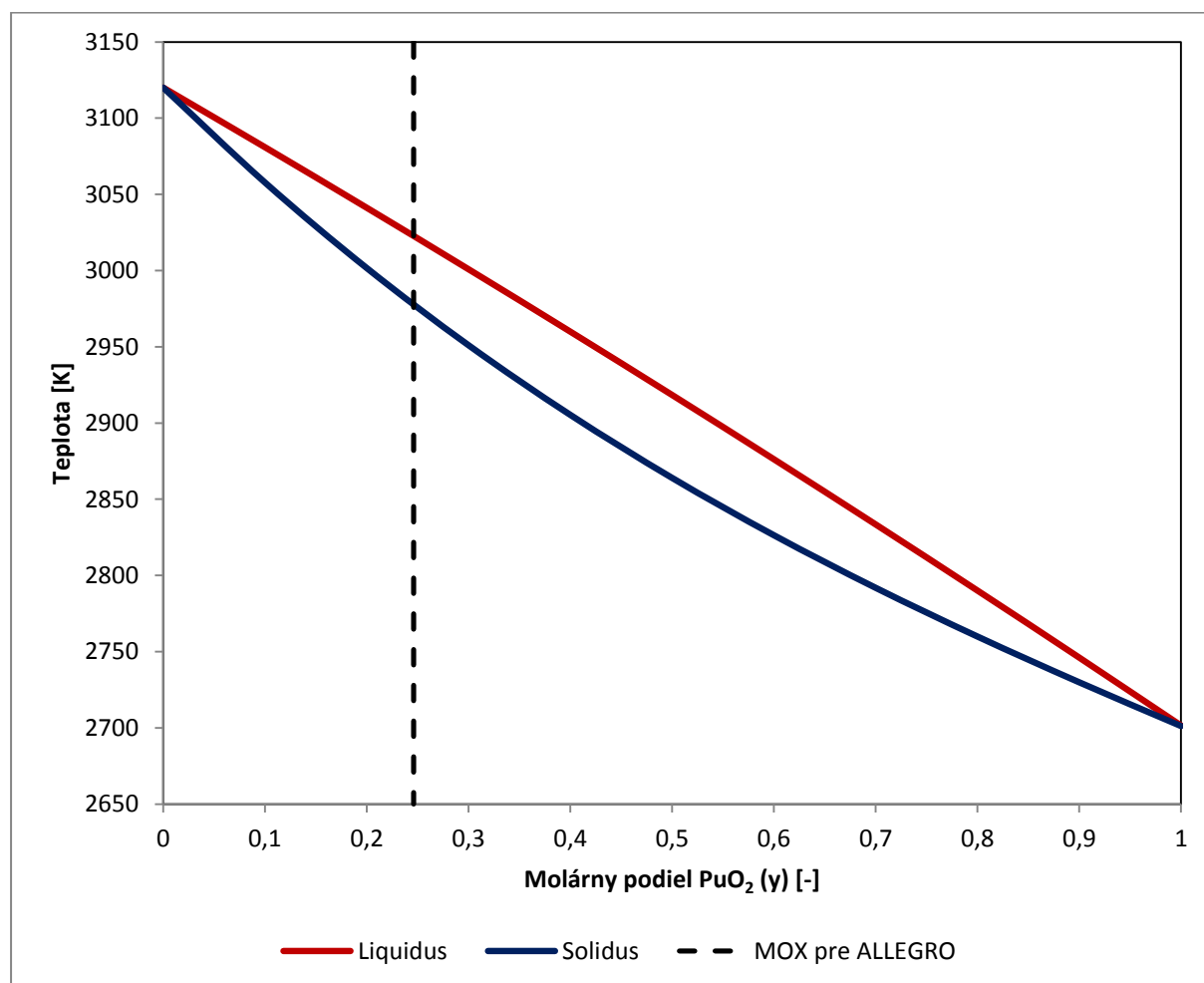
$$T_L(y) = 3120 - 388,1 \cdot y - 30,4 \cdot y^2 \quad (1)$$

$$T_S(y) = 3120 - 655,3 \cdot y + 336,4 \cdot y^2 - 99,9 \cdot y^3 \quad (2)$$

y	molárny podiel PuO ₂ v MOX palive [-]
T _L (y)	teplota tavenia paliva pri molárnom podiele PuO ₂ y [K]
T _S (y)	teplota tuhnutia paliva pri molárnom podiele PuO ₂ y [K]

Pre hodnoty y menšie ako 0,6 (prípád MOX paliva pre ALLEGRO) je neistota hodnoty teploty tavenia ±55 K a pre teploty tuhnutia ±35 K. [27]

Obrázok 4 – 1 zobrazuje fázový diagram MOX paliva skonštruovaný na základe vyššie popísaných empirických vzťahov (1) a (2). Krivka tavenia je označená ako *liquidus* a krivka tuhnutia ako *solidus*.



Obrázok 4-1 Fázový diagram UO₂ - PuO₂

Z rovnice (2) vyplýva, že pre molárny podiel oxidu PuO₂ 24,6 mol.%, čo je navrhované zastúpenie pre palivo MOX v reaktore ALLEGRO, je teplota počiatku tavenia $2977,7 \pm 35$ K. Najnižšia teplota, kedy je zmes úplne roztavená je $3022,7 \pm 55$ K.

4.1.1.2 HUSTOTA PALIVA

Hustota ρ tuhého paliva je funkciou jeho zloženia, teploty T , teoretickej hustoty ρ_{TH} , resp. pórovitosti p a vyhorenia.

$$p = \frac{(\rho_{THS} - \rho)}{\rho_{THS}} \quad (3)$$

p	pórovitosť [-]
ρ_{THS}	teoretická hustota, značí hustotu paliva s nulovou pórovitosťou
[kg/m ³]	
ρ	reálna hustota paliva s uvažovaním reálnej pórovitosti paliva [kg/m ³]

Pórovitosť oxidického paliva sa na základe dostupnej literatúry pohybuje v rozpätí 4 – 6%. Pre účely tejto práce bude uvažovaná hodnota pórovitosti surového paliva na úrovni $p = 5\%$. To znamená, že uvažovaná (reálna) hustota je rovná 95% teoretickej hustoty paliva s nulovou pórovitosťou ($\rho = 0,95 \cdot \rho_{TH}$).

Teoretická hustota čistého PuO₂ je pri teplote 273 K rovná $11460 \pm 80 \text{ kg/m}^3$ pri $p = 0$ a teoretická hustota čistého UO₂ je pri teplote 273 K rovná $10970 \pm 70 \text{ kg/m}^3$ taktiež pri uvažovaní nulovej pórovitosti. Z uvedeného je zrejmé, že hustota MOX paliva s rastúcim obsahom PuO₂ lineárne stúpa. S rastúcou teplotou hustota paliva naopak klesá. Vplyv vyhorenia paliva na hustotu nie je markantný a je možné ho vo väčšine prípadoch zanedbať. [27]

Pre určenie celkovej hmotnosti aktívnej zóny a jednotlivých komponentov, ktoré ju obklopujú postačí poznať hustotu pri danej, konštantnej teplote. Preto nie je pre naplnenie cieľov tejto práce potrebné uvádzať dostupné odporúčané korelácie pre zistenie závislosti hustoty na teplote paliva.

Rovnica (4) vyjadruje lineárnu závislosť teoretickej hustoty MOX paliva v tuhej fáze pri teplote 273 K ρ_S ako funkciu molárneho podielu zložky PuO₂ y s nepresnosťou približne 1%.

$$\rho_{THS} = 10970 + 490 \cdot y \quad (4)$$

ρ_{THS}	teoretická hustota tuhého (solid) MOX paliva pri teplote 273 K
[kg/m ³]	
y	molárny podiel PuO ₂ v MOX palive [-]

Závislosť hustoty roztaveného MOX paliva ρ_L na teplote T popisuje rovnica (5). Tento vzťah platí pre rozsah teplôt od 3120 K do 4500 K a neberie do úvahy molárne zastúpenie PuO₂ y . [27]

$$\rho_L = 8860 - 0,9285 \cdot (T - 3120) \quad (5)$$

ρ_L	hustota roztaveného MOX paliva [kg/m ³]
T	teplota roztaveného paliva [K]

4.1.1.3 ENTALPIA A TEPELNÁ KAPACITA MOX PALIVA

Merná entalpia h a merná tepelná kapacita c_p MOX paliva je najmä funkciou zastúpenia jednotlivých zložiek (molárny podiel PuO₂ y) a teploty T . Ostatné vplyvy je možné vo väčšine prípadoch zanedbať. [27]

Experimentálne dáta pre entalpiu a tepelnú kapacitu UO_2 a PuO_2 sú aproximované vzťahmi (6) a (7). Hodnoty získané na základe týchto korelácií sú platné pre teploty od 298,15 K až po teplotu tavenia. Neistota takto získanej hodnoty entalpie je $\pm 2\%$ pre teploty od 298,15 až 1800 K a $\pm 3\%$ pre teplotu od 1800 K až po teplotu tavenia. Neistota tepelnej kapacity je $\pm 3\%$ pre teploty od 298,15 až 1800 K a $\pm 13\%$ pre teplotu od 1800 K až po teplotu tavenia. [27]

$$\begin{aligned}
 [h(T) - h(298)]_{\text{MOX}} &= C_1 \theta \left[\left(e^{\frac{\theta}{T}} - 1 \right)^{-1} - \left(e^{\frac{\theta}{298,15}} - 1 \right)^{-1} \right] \\
 &+ C_2 (T^2 - 298,15^2) + C_3 e^{-\frac{E_a}{T}}
 \end{aligned} \quad (6)$$

Keďže tepelnú kapacitu je možné vyjadriť ako $c_p = \frac{\partial h(T)}{\partial T}$, po derivácii rovnice (6) podľa teploty dostávame rovnicu (7), vyjadrujúcu závislosť tepelnej kapacity na teplote platiacu za podmienok popísaných vyššie.

$$c_{p_{\text{MOX}}}(T) = \frac{\partial h(T)}{\partial T} = \frac{C_1 \theta^2 e^{\frac{\theta}{T}}}{T^2 \left(e^{\frac{\theta}{T}} - 1 \right)^2} + 2C_2 T + \frac{C_3 E_a e^{-\frac{E_a}{T}}}{T^2} \quad (7)$$

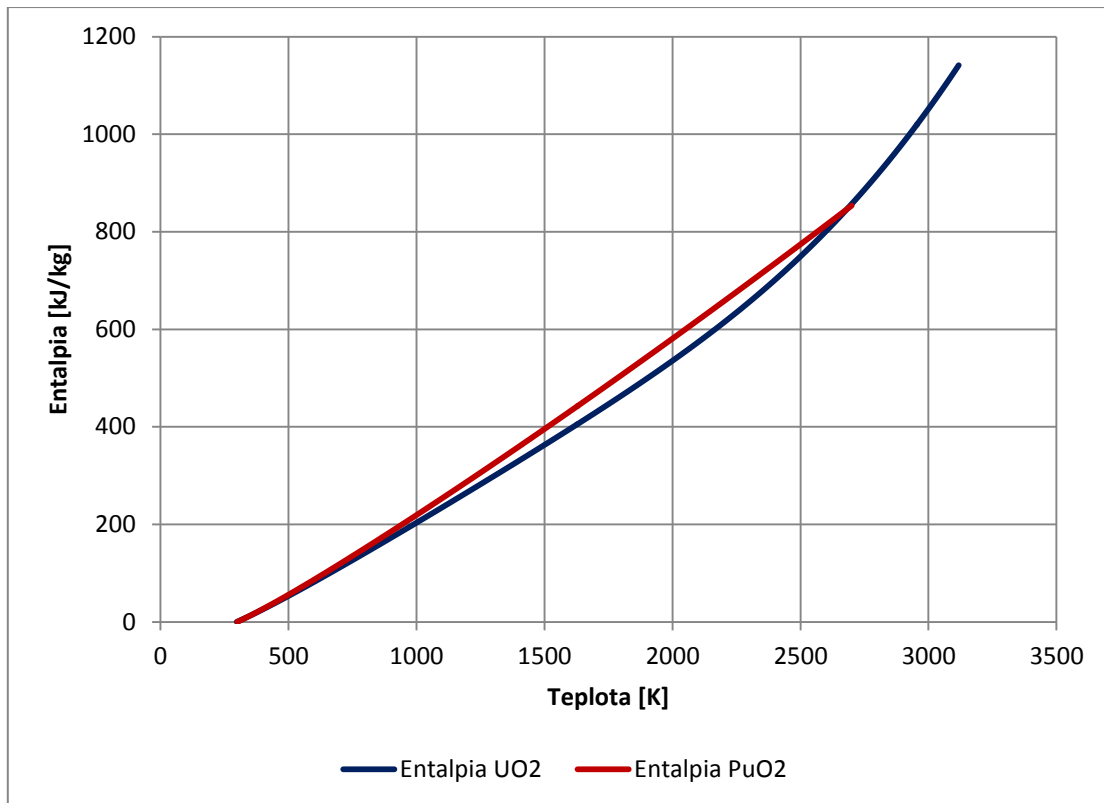
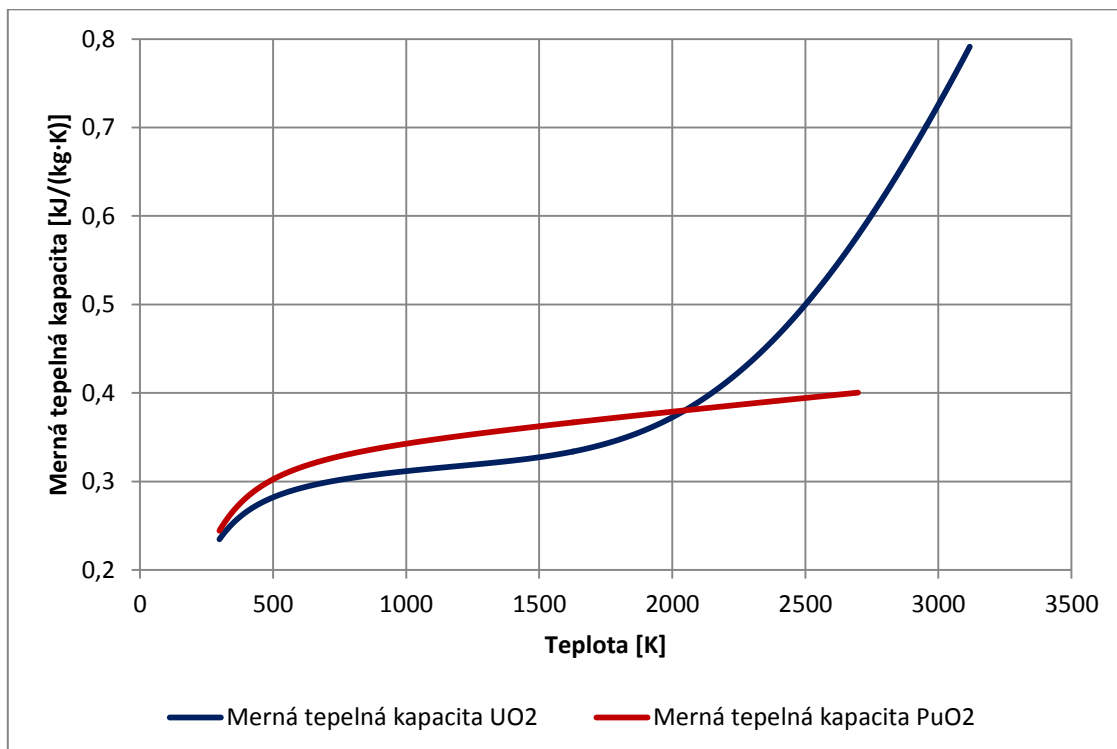
$[h(T) - h(298)]_{\text{MOX}}$	rozdiel entalpií pri teplote T a teplote 298 K MOX paliva [J/kg]
$c_{p_{\text{MOX}}}(T)$	medná tepelná kapacita MOX paliva [J/(kg·K)]
T	teplota MOX paliva [K]
θ	Einsteinova teplota [K]
E_a	aktivačná energia podelená Boltzmanovou konštantou [K]

Pre korelácie (6) a (7) sú potrebné konštanty uvedené v tabuľke 4 – 1.

Konštantá	UO_2	PuO_2
C_1 [J/(kg·K)]	302,27	322,49
C_2 [J/(kg·K ²)]	$8,463 \cdot 10^{-3}$	$1,4679 \cdot 10^{-2}$
C_3 [J/(kg)]	$8,741 \cdot 10^7$	0
θ [K]	548,68	587,41
E_a [K]	18531,7	-

Tabuľka 4-1 Konštanty pre korelácie (6) a (7) [27]

Grafickú závislosť entalpie a mernej tepelnej kapacity jednotlivých zložiek MOX paliva na teplote znázorňujú grafy na obrázkoch 4 – 2 a 4 – 3.

Obrázok 4-2 Graf závislosti entalpie UO₂ a PuO₂ na teploteObrázok 4-3 Graf závislosti mernej tepelnej kapacity UO₂ a PuO₂ na teplote

Entalpiu a tepelnú kapacitu MOX paliva so zložkami UO₂ a PuO₂ možno spočítať ako sumu entalpie, resp. tepelnej kapacity molárných podielov jednotlivých komponentov.

[28] Túto skutočnosť vyjadrujú rovnice (8) a (9) s koeficientmi molárnych podielov patriacich MOX palivu navrhovaného pre ALLEGRO.

$$h_{MOX} = (1 - y) \cdot h_{UO_2} + y \cdot h_{PuO_2} \quad (8)$$

h_{MOX} ALLEGRO pre	výsledná merná entalpia MOX paliva navrhovaného pre uvažovanú teplotu [J/kg]
h_{UO_2}	merná entalpia čistého UO_2 pre uvažovanú teplotu [J/kg]
h_{PuO_2}	merná entalpia čistého PuO_2 pre uvažovanú teplotu [J/kg]
y	molárny podiel PuO_2 v MOX palive [-]

$$c_{p_{MOX}} = (1 - y) \cdot c_{p_{UO_2}} + y \cdot c_{p_{PuO_2}} \quad (9)$$

$c_{p_{MOX}}$	výsledná merná tepelná kapacita MOX paliva navrhovaného pre ALLEGRO pre uvažovanú teplotu [J/kg·K]
$c_{p_{UO_2}}$	merná tepelná kapacita čistého UO_2 pre uvažovanú teplotu [J/kg·K]
$c_{p_{PuO_2}}$	merná tepelná kapacita čistého PuO_2 pre uvažovanú teplotu [J/kg·K]

4.1.1.4 SKUPENSKÉ TEPLA PALIVA MOX

Zmena skupenstva (fázy) z tuhého do tekutého (tavenie) predstavuje stratu usporiadania atómov do kryštalickej mriežky. Pri stechiometrických zlúčeninách bez prímеси v tuhej fáze sa tak deje pri konštantnej teplote. Pri nestechiometrických zmesiach alebo ak zmes obsahuje pridané komponenty v tuhom skupenstve, tavenie prebieha pri istom tepelnom rozsahu za koexistencie kvapalného aj tuhého skupenstva, ktoré sa môže postupne vyskytovať s rôznou kryštalickou mriežkou. Pri absencii experimentálne zistených hodnôt skupenského tepla, sa dá toto aproximovať hodnotou rozdielu entalpií v kvapalnom a tuhom skupenstve. Z tohto dôvodu je niekedy v anglickej literatúre skupenské teplo označované ako entalpia zmeny skupenstva (enthalpy of fusion) a označované ako ΔH_{fus} .

Na základe odporúčaní publikovanými v literárnom zdroji [27] je hodnota skupenského tepla čistého UO_2 a PuO_2 nasledovná:

$$\Delta h_{fus_{UO_2}} = 70 \pm 4 \frac{kJ}{mol} = 259,3 \pm 14,8 \frac{kJ}{kg} \quad (10)$$

$$\Delta h_{fus_{PuO_2}} = 66,5 \pm 5,4 \frac{kJ}{mol} = 240,9 \pm 19,6 \frac{kJ}{kg} \quad (11)$$

Následne skupenské teplo MOX $\Delta H_{fus_{MOX}}$ paliva možno získať z rovnice (13).

$$\Delta h_{fus_{MOX}} = (1 - y) \cdot \Delta h_{fus_{UO_2}} + y \cdot \Delta h_{fus_{PuO_2}} \quad (12)$$

$\Delta h_{fus_{MOX}}$	merné skupenské teplo tavenia MOX paliva [kJ/mol; kJ/kg]
$\Delta h_{fus_{UO_2}}$	merné skupenské teplo tavenia čistého UO_2 [kJ/mol; kJ/kg]
$\Delta h_{fus_{PuO_2}}$	merné skupenské teplo tavenia čistého PuO_2 [kJ/mol; kJ/kg]
y	molárny podiel PuO_2 v MOX palive [-]

4.1.2 VLASTNOSTI KONŠTRUKČNEJ OCELE

V súčasnom štádiu projektu ALLEGRO je možné zjednodušené uvažovať, že ako konštrukčná oceľ všetkých komponentov vnútri tlakovej nádoby reaktora je použitá oceľ 15 – 15 Ti. Nakoľko vo voľne dostupnej literatúre nie sú k dispozícii fyzikálne vlastnosti oceli s týmto označením, pre účely tejto práce ju nahradíme oceľou značenou ako typ 316, ktorej zloženie je ocele 15 – 15 Ti najbližšie z ocelí s voľne dostupnými fyzikálnymi vlastnosťami. Absenciu zložky titánu v oceli 316 zanedbáme.

4.1.2.1 ENTALPIA A TEPELNÁ KAPACITA OCELE TYPU 316

Experimentálne dáta pre mernú tepelnú kapacitu v závislosti na teplote nehrdzavejúcej ocele typu 316 $c_{pSS}(T)$ sú sumarizované v [28]. Po spracovaní programom Microsoft Excel boli aproximované koreláciou (13). Integráciou (13) podľa teploty za predpokladu konštantného tlaku systému získame zmenu mernej entalpie ocele typu 316 Δh_{SS} počas izobarickej zmeny teploty z T_1 na T_2 , túto skutočnosť vyjadruje rovnica (14).

$$c_{pSS}(T) = 1,34 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,462 \quad (13)$$

$c_{pSS}(T)$ merná tepelná kapacita ocele typu 316 [kJ/(kg·K)]
 T teplota [K]

$$\Delta h_{SS} = \int_{T_1}^{T_2} c_{pSS}(T) dT \quad (14)$$

Δh_{SS} zmena mernej entalpie ocele typu 316 [kJ/kg]
 $T_{1,2}$ teplota začiatku, konca deja izobarickej zmeny teploty [K]

4.1.2.2 OSTATNÉ VLASTNOSTI OCELE TYPU 316

Tabuľka 4 – 2 zoskupuje ďalšie potrebné vlastnosti konštrukčnej ocele typu 316, ktorých závislosti na rôznych veličinách nie je potrebné pre účel tejto práce funkčne vyjadriť. Jednotlivé hodnoty boli vyhladané priamo v [28], teplota solidus a liquidus [29].

Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Hustota pri 298 K	ρ_{SS}	7955 [kg/m ³]
Teplota počiatku tavenia (solidus)	$T_{S\ SS}$	1644 [K]
Teplota úplného roztavenia (liquidus)	$T_{L\ SS}$	1672 [K]
Merné skupenské teplo topenia	Δh_{fuss}	270 [kJ/kg]
Tepelná kapacita roztavenej ocele typu 316	$c_{pliquidSS}$	775 [J/(kg·K)]

Tabuľka 4-2 Vlastnosti ocele typu 316

4.1.3 VLASTNOSTI KARBIDU BÓRU

Ako absorbér neutrónov je navrhovaný karbid bóru B_4C , ktorý je bežne používaný v dnešných tlakovodných reaktoroch. Je súčasťou havarijných, radiacích aj regulačných tyčí a tieniacich blokov (konštrukcia aktívnej zóny ALLEGRO je popísaná v kapitole 2.4). Aby prítomnosť B_4C v aktívnej zóne bolo možné zohľadniť pri bilanciách, je potrebné vyhladať a stanoviť referenčné hodnoty fyzikálnych vlastností určujúcich charakteristiky tohto materiálu. Všetky potrebné hodnoty sú obsiahnuté v tabuľke 4 – 3,

čerpané z [28], [30]. Funkčnú závislosť tepelnej kapacity karbidu bóru $c_{p_{B_4C}}$ vyjadruje rovnica (15) [31].

$$c_{p_{B_4C}}(T) = -2,85 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,501 \quad (15)$$

$c_{p_{B_4C}}(T)$ merná tepelná kapacita karbidu bóru [kJ/(kg·K)]
 T teplota [K]

Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Hustota pri 298 K	ρ_{B_4C}	2510 [kg/m ³]
Teplota tavenia	$T_{T_{B_4C}}$	2723 [K]
Merné skupenské teplo topenia	$\Delta h_{fu_{B_4C}}$	1690 [kJ/kg]

Tabuľka 4-3 Vlastnosti karbidu bóru B₄C

4.1.4 MATERIÁLOVÁ BILANCIA AKTÍVNEJ ZÓNY, REFLEKTORA A TIENENIA

Na základe údajov poskytnutých zo strany ÚJV Řež, a.s., boli v kapitole 2.4 zhrnuté a z dôvodu citlivosti údajov zjednodušene popísané konštrukčné dáta aktívnej zóny a tlakovej nádoby reaktora ALLEGRO. Na základe týchto údajov bolo pomocou jednoduchej geometrie približne spočítané množstvo rôzneho materiálu nachádzajúceho sa v jednotlivých častiach tlakovej nádoby reaktora.

4.1.4.1 PALIVOVÁ KAZETA

Všetky konštrukčné údaje sú uvedené pri teplote 25°C. Spracované informácie sú čerpané z [26] alebo sú už uvedené vyššie v tejto práci.

Palivový prútik		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Výška paliva v prútika	h_{pvp}	86 [cm]
Priemer palivovej pelety	d_{pel}	0,542 [cm]
Hustota paliva	ρ_s	11,084 [g/cm ³]
Výška pokrytia prútika	h_{pok}	130 [cm]
Vnútorý priemer pokrytia	$d_{pok\ in}$	0,565 [cm]
Vonkajší priemer pokrytia	$d_{pok\ out}$	0,655 [cm]
Hustota oceli pokrytia	ρ_{ss}	7,955 [g/cm ³]

Tabuľka 4-4 Špecifikácia palivového prútiku

Na základe údajov v tabuľke 4 – 4 je hmotnosť paliva v jednom palivovom prútiku m_{pp} získaná podľa rovnice (16) a hmotnosť pokrytia jedného palivového prútiku m_{pok} podľa (17).

$$m_{pp} = \frac{\rho_s \cdot \pi \cdot d_{pel}^2 \cdot h_{pvp}}{4} \quad (16)$$

$$m_{pp} = \frac{11,084 \cdot 3,1415 \cdot 0,542^2 \cdot 86}{4}$$

$$m_{pp} = 219,9230 [g]$$

$$m_{pok} = \frac{\rho_{ss} \cdot \pi \cdot (d_{clad\ out}^2 - d_{clad\ in}^2) \cdot h_{clad}}{4} \quad (17)$$

$$m_{pok} = \frac{7,955 \cdot 3,1415 \cdot (0,655^2 - 0,565^2) \cdot 130}{4}$$

$$m_{pok} = 89,1791 [g]$$

Obálka kazety		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Vnútoraná vzdialenosť dvoch protiľahlých strán šesťuholníka	a_{hex}	10,6 [cm]
Hrúbka obalu kazety	t_{wrap}	0,2 [cm]
Výška obalu kazety	h_{wrap}	300 [cm]
Hustota oceli obalu	ρ_{ss}	7,955 [g/cm ³]

Tabuľka 4-5 Špecifikácia obalu kazety

Na základe údajov v tabuľke 4 – 5 je hmotnosť obalu kazety m_{wrap} vypočítaná podľa rovnice (18).

$$m_{wrap} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot [(a_{hex} + 2 \cdot t_{wrap})^2 - a_{hex}^2] \cdot h_{wrap} \cdot \rho_{ss} \quad (18)$$

$$m_{wrap} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot [(10,6 + 2 \cdot 0,2)^2 - 10,6^2] \cdot 300 \cdot 7,955$$

$$m_{wrap} = 17856,8896 [g]$$

Axiálne tienenie		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Celková konštrukčná výška	$h_{ax.t.}$	100 [cm]
Objemové zastúpenie B ₄ C	$v_{B_4C\ ax.t.}$	0,5 [-]
Objemové zastúpenie oceli	$v_{ss\ ax.t.}$	0,1 [-]
Hustota karbidu bóru	ρ_{B_4C}	2,510 [g/cm ³]

Tabuľka 4-6 Axiálne tienenie palivovej kazety

Na základe údajov v tabuľke 4 – 6 je hmotnosť oceli v axiálnom tienení jednej kazety $m_{ss\ ax.t.}$ vypočítaná podľa rovnice (19) a hmotnosť karbidu bóru v axiálnom tienení jednej kazety $m_{B_4C\ ax.t.}$ vypočítaná podľa rovnice (20).

$$m_{ss\ ax.t.} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot a_{hex}^2 \cdot h_{ax.t.} \cdot v_{ss\ ax.t.} \cdot \rho_{ss} \quad (19)$$

$$m_{ss\ ax.t.} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10,6^2 \cdot 100 \cdot 0,1 \cdot 7,955$$

$$m_{ss\ ax.t.} = 7740,7412 [g]$$

$$m_{B_4C\ ax.t.} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot a_{hex}^2 \cdot h_{ax.t.} \cdot v_{B_4C\ ax.t.} \cdot \rho_{B_4C} \quad (20)$$

$$m_{B_4C\ ax.t.} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10,6^2 \cdot 100 \cdot 0,5 \cdot 2,510$$

$$m_{B_4C \text{ ax.t.}} = 12211,9801 [g]$$

Axiálny reflektor		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Celková konštrukčná výška	$h_{ax.r.}$	60 [cm]
Objemové zastúpenie oceli	$v_{ss \text{ ax.r.}}$	0,75 [-]

Tabuľka 4-7 Axiálny reflektor palivovej kazety

Na základe údajov v tabuľke 4 – 7 je hmotnosť oceli v axiálnom reflektore jednej kazety $m_{ss \text{ ax.r.}}$ vypočítaná podľa rovnice (21).

$$m_{ss \text{ ax.r.}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot a_{hex}^2 \cdot h_{ax.r.} \cdot v_{ss \text{ ax.r.}} \cdot \rho_{ss} \quad (21)$$

$$m_{ss \text{ ax.r.}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10,6^2 \cdot 60 \cdot 0,75 \cdot 7,955$$

$$m_{ss \text{ ax.r.}} = 34833,3353 [g]$$

Z vyššie spočítaného je možné jednoducho získať hodnoty celkových hmotností jednotlivých komponentov obsiahnutých v jednej palivovej kazete, a to hmotnosť paliva v jednej palivovej kazete $m_{pk p}$, hmotnosť oceli v jednej palivovej kazete $m_{pk ss}$ a hmotnosť karbidu bóru v jednej palivovej kazete $m_{pk B_4C}$. Tieto hodnoty sú zhrnuté v tabuľke 4 – 8.

$$m_{pk p} = 169 \cdot m_{pp} = 37166,9870 [g]$$

$$m_{pk ss} = 169 \cdot m_{pok} + m_{wrap} + m_{ss \text{ ax.t.}} + m_{ss \text{ ax.r.}}$$

$$= 75502,2340 [g]$$

$$m_{pk B_4C} = m_{B_4C \text{ ax.t.}} = 12211,9801 [g]$$

Palivová kazeta		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Hmotnosť paliva v jednej palivovej kazete	$m_{pk p}$	37,17 [kg]
Hmotnosť oceli v jednej palivovej kazete	$m_{pk ss}$	75,23 [kg]
Hmotnosť karbidu bóru v jednej palivovej kazete	$m_{pk B_4C}$	12,21 [kg]

Tabuľka 4-8 Hmotnosť komponentov v jednej palivovej kazete

4.1.4.2 RIADIACA A HAVARIJNÁ KAZETA

Riadiace kazety slúžiace k regulácii výkonu reaktora a havarijné kazety slúžiace k odstávke reaktora sú totožné. Pri bilancii sú uvažované plne zasunuté do aktívnej zóny. V aktívnej zóne ALLEGRO je 6 riadiacich kaziet a 4 havarijné kazety.

Axiálne tienenie v riadiacich a havarijných kazetách je totožné s tým v palivových kazetách. Hmotnosti jednotlivých zložiek sa preto nemenia:

$$m_{ss \text{ ax.t.}} = 7740,7412 [g]$$

$$m_{B_4C \text{ ax.t.}} = 12211,9801 [g]$$

Axiálny reflektor je v radiaciach a havarijných kazetách iba v dolnej časti a jeho konštrukčná výška je 30 cm, t. j. polovica z konštrukčnej výšky axiálneho reflektoru v palivových kazetách. Preto:

$$m_{ss\ ax.r.} = 17416,6677 [g]$$

Absorbér		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Celková konštrukčná výška	h_{abs}	86 [cm]
Objemové zastúpenie B ₄ C	$V_{B_4C\ abs}$	0,33 [-]
Objemové zastúpenie oceli	$V_{ss\ abs}$	0,23 [-]

Tabuľka 4-9 Absorbér radiacej a havarijnej kazety

Na základe údajov v tabuľke 4 – 9 je hmotnosť oceli v absorbére jednej radiacej resp. havarijnej kazety $m_{ss\ abs}$ vypočítaná podľa rovnice (22) a hmotnosť karbidu bóru v absorbére jednej radiacej resp. havarijnej kazety $m_{B_4C\ abs}$ vypočítaná podľa rovnice (23).

$$m_{ss\ abs} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot a_{hex}^2 \cdot h_{abs} \cdot v_{ss\ abs} \cdot \rho_{ss} \quad (22)$$

$$m_{ss\ abs} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10,6^2 \cdot 86 \cdot 0,23 \cdot 7,955$$

$$m_{ss\ abs} = 15311,1860 [g]$$

$$m_{B_4C\ abs} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot a_{hex}^2 \cdot h_{abs} \cdot v_{B_4C\ abs} \cdot \rho_{B_4C} \quad (23)$$

$$m_{B_4C\ abs} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10,6^2 \cdot 86 \cdot 0,33 \cdot 2,510$$

$$m_{B_4C\ abs} = 6931,5199 [g]$$

Tandem		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Celková konštrukčná výška	h_{tand}	129 [cm]
Objemové zastúpenie oceli	$V_{ss\ tand}$	0,13 [-]

Tabuľka 4-10 Tandem radiacej a havarijnej kazety

Na základe údajov v tabuľke 4 – 10 je hmotnosť oceli v tandeme jednej radiacej resp. havarijnej kazety $m_{ss\ tand}$ vypočítaná podľa rovnice (24).

$$m_{ss\ tand} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot a_{hex}^2 \cdot h_{tand} \cdot v_{ss\ tand} \cdot \rho_{ss} \quad (24)$$

$$m_{ss\ tand} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10,6^2 \cdot 129 \cdot 0,13 \cdot 7,955$$

$$m_{ss\ tand} = 12981,2229 [g]$$

Z vyššie spočítaného je možné jednoducho získať hodnoty celkových hmotností jednotlivých komponentov obsiahnutých v jednej riadiacej resp. havarijnej kazete, a to hmotnosť oceli v jednej riadiacej resp. havarijnej kazete $m_{hk\ ss}$ a hmotnosť karbidu bóru v jednej riadiacej resp. havarijnej kazete $m_{hk\ B4C}$. Tieto hodnoty sú zhrnuté v tabuľke 4 – 11.

$$\begin{aligned} m_{hk\ ss} &= m_{wrap} + m_{ss\ ax.t.} + m_{ss\ ax.r.} + m_{ss\ abs} + m_{ss\ tand} \\ &= 53449,8178 [g] \\ m_{hk\ B4C} &= m_{B4C\ ax.t.} + m_{B4C\ abs} = 19143,5000 [g] \end{aligned}$$

Riadiaca a havarijná kazeta		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Hmotnosť oceli v jednej riadiacej resp. havarijnej kazete	$m_{hk\ ss}$	53,45 [kg]
Hmotnosť karbidu bóru v jednej riadiacej resp. havarijnej kazete	$m_{hk\ B4C}$	19,14 [kg]

Tabuľka 4-11 Hmotnosť jednotlivých komponentov v jednej riadiacej resp. havarijnej kazete

4.1.4.3 OCEĽOVÁ KAZETA

Oceľové kazety slúžia ako výplň šiestich pozícií pre experimentálne kazety počas prevádzky so štartovacou MOX aktívnou zónou.

Axiálne tienenie v oceľových kazetách je totožné s tým v palivových kazetách. Hmotnosti jednotlivých zložiek sa preto nemenia:

$$m_{ss\ ax.t.} = 7740,7412 [g]$$

$$m_{B4C\ ax.t.} = 12211,9801 [g]$$

Ostatná konštrukčná výška oceľovej kazety (285 cm) je vyplnená axiálnym tienením.

Axiálny reflektor		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Celková konštrukčná výška	$h_{ax.r.}$	195 [cm]
Objemové zastúpenie oceli	$V_{ss\ ax.r.}$	0,75 [-]

Tabuľka 4-12 Axiálny reflektor oceľovej kazety

$$\begin{aligned} m_{ss\ ax.r.} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot a_{hex}^2 \cdot h_{ax.r.} \cdot v_{ss\ ax.r.} \cdot \rho_{ss} \\ m_{ss\ ax.r.} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10,6^2 \cdot 195 \cdot 0,75 \cdot 7,955 \\ m_{ss\ ax.r.} &= 113208,3397 [g] \end{aligned} \quad (25)$$

Z vyššie spočítaného je možné jednoducho získať hodnoty celkových hmotností jednotlivých komponentov obsiahnutých v jednej oceľovej kazete, a to hmotnosť oceli v jednej oceľovej kazete $m_{ok\ ss}$ a hmotnosť karbidu bóru v jednej oceľovej kazete $m_{ok\ B4C}$. Tieto hodnoty sú zhrnuté v tabuľke 4 – 13.

$$m_{ok\ ss} = m_{wrap} + m_{ss\ ax.t.} + m_{ss\ ax.r.} = 138805,9705 [g]$$

$$m_{ok\ B_4C} = m_{B_4C\ ax.t.} = 12211,9801 [g]$$

Oceľová kazeta		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Hmotnosť oceli v jednej oceľovej kazete	$m_{ok\ ss}$	138,81 [kg]
Hmotnosť karbidu bóru v jednej oceľovej kazete	$m_{ok\ B_4C}$	12,21 [kg]

Tabuľka 4-13 Hmotnosť komponentov v jednej oceľovej kazete

4.1.4.4 REFLEKTOROVÁ KAZETA

Reflektorové kazety v počte 174 kusov zoradené do 4 sústredných kruhov okolo aktívnej zóny tvoria reflektor aktívnej zóny slúžiaci pre minimalizáciu úniku neutrónov. Sú tvorené oceľovými blokmi celkovej konštrukčnej výšky 195 cm o objemovej hustote ocele väčšej ako je tomu pri axiálnom reflektore, nakoľko nie je potrebné tak intenzívne chladenie. Z oboch strán je reflektorová kazeta tvorená 50 cm axiálneho tienenia.

Axiálne tienenie je opäť totožné s tým v palivových kazetách:

$$m_{ss\ ax.t.} = 7740,7412 [g]$$

$$m_{B_4C\ ax.t.} = 12211,9801 [g]$$

Radiálny reflektor		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Celková konštrukčná výška	$h_{rad.\ r.}$	195 [cm]
Objemové zastúpenie oceli	$v_{ss\ rad.\ r.}$	0,8 [-]

Tabuľka 4-14 Radiálny reflektor reflektorovej kazety

$$m_{ss\ rad.r.} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot a_{hex}^2 \cdot h_{rad.r.} \cdot v_{ss\ rad.r.} \cdot \rho_{ss} \quad (26)$$

$$m_{ss\ rad.r.} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10,6^2 \cdot 195 \cdot 0,8 \cdot 7,955$$

$$m_{ss\ rad.r.} = 120755,5623 [g]$$

Z vyššie spočítaného je možné jednoducho získať hodnoty celkových hmotností jednotlivých komponentov obsiahnutých v jednej reflektorovej kazete, a to hmotnosť oceli v jednej reflektorovej kazete $m_{rk\ ss}$ a hmotnosť karbidu bóru v jednej reflektorovej kazete $m_{rk\ B_4C}$. Tieto hodnoty sú zhrnuté v tabuľke 4 – 15.

$$m_{rk\ ss} = m_{wrap} + m_{ss\ ax.t.} + m_{ss\ rad.r.} = 146353,1931 [g]$$

$$m_{rk\ B_4C} = m_{B_4C\ ax.t.} = 12211,9801 [g]$$

Reflektorová kazeta		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Hmotnosť oceli v jednej reflektorovej kazete	$m_{rk\ ss}$	146,35 [kg]

Hmotnosť karbidu bóru v jednej reflektorovej kazete	$m_{rk B4C}$	12,21 [kg]
---	--------------	------------

Tabuľka 4-15 Hmotnosti komponentov v jednej reflektorovej kazete

4.1.4.5 RADIÁLNE TIENENIE

Kazety radiálneho tienenia v počte 198 kusov sú usporiadané do 3 sústredných kruhov okolo reflektora aktívnej zóny. Slúžia pre zmiernenie neutrónového toku dopadajúceho na nosné komponenty aktívnej zóny a tlakovú nádobu reaktora spôsobujúceho neutrónové krehnutie konštrukčnej ocele. Kazety radiálneho tienenia sú tvorené blokmi radiálneho tienenia s vysokým zastúpením karbidu bóru o celkovej konštrukčnej výške 195 cm a blokmi axiálneho tienenia o celkovej konštrukčnej výške 50 cm.

Axiálne tienenie je opäť totožné s tým v palivových kazetách:

$$m_{ss ax.t.} = 7740,7412 [g]$$

$$m_{B_4C ax.t.} = 12211,9801 [g]$$

Radiálne tienenie		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Celková konštrukčná výška	$h_{rad.t.}$	195 [cm]
Objemové zastúpenie B ₄ C	$v_{B_4C rad.t.}$	0,7 [-]
Objemové zastúpenie oceli	$v_{ss rad.t.}$	0,1 [-]

Tabuľka 4-16 Radiálne tienenie v kazete radiálneho tienenia

$$m_{ss rad.t.} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot a_{hex}^2 \cdot h_{rad.t.} \cdot v_{ss rad.t.} \cdot \rho_{ss} \quad (27)$$

$$m_{ss rad.t.} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10,6^2 \cdot 195 \cdot 0,1 \cdot 7,955$$

$$m_{ss rad.t.} = 15094,4453 [g]$$

$$m_{B_4C rad.t.} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot a_{hex}^2 \cdot h_{rad.t.} \cdot v_{B_4C rad.t.} \cdot \rho_{B_4C} \quad (28)$$

$$m_{B_4C rad.t.} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10,6^2 \cdot 195 \cdot 0,7 \cdot 2,510$$

$$m_{B_4C rad.t.} = 33338,7057 [g]$$

Z vyššie spočítaného je možné jednoducho získať hodnoty celkových hmotností jednotlivých komponentov obsiahnutých v jednej kazete radiálneho tienenia, a hmotnosť oceli v jednej kazete radiálneho tienenia $m_{krt ss}$ a hmotnosť karbidu bóru v jednej kazete radiálneho tienenia $m_{krt B_4C}$. Tieto hodnoty sú zhrnuté v tabuľke 4 – 17.

$$m_{krt ss} = m_{wrap} + m_{ss ax.t.} + m_{ss rad.t.} = 22835,1865 [g]$$

$$m_{krt B_4C} = m_{B_4C ax.t.} + m_{B_4C rad.t.} = 45550,6858 [g]$$

Kazeta radiálneho tienenia		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Hmotnosť oceli v jednej	$m_{krt ss}$	22,84 [kg]

kazete radiálneho tienenia		
Hmotnosť karbidu bóru v jednej kazete radiálneho tienenia	$m_{krt\ B_4C}$	45,55 [kg]

Tabuľka 4-17 Hmotnosti komponentov v jednej kazete radiálneho tienenia

4.1.4.6 AKTÍVNA ZÓNA, REFLEKTOR A TIENENIE

V tabuľke 4 – 18 sú uvedené celkové hmotnosti aktívnej zóny, bilancie radiálneho reflektora obklopujúceho ju sú v tabuľke 4 – 19 a radiálneho tienenia v tabuľke 4 – 20.

Aktívna zóna pozostáva z 81 palivových kaziet, 6 riadiacich a 4 havarijných kaziet. Nižšie je spočítaná celková hmotnosť paliva v aktívnej zóne $m_{AZ\ p}$, celková hmotnosť oceli v aktívnej zóne $m_{AZ\ ss}$ a celková hmotnosť karbidu bóru v aktívnej zóne $m_{AZ\ B_4C}$.

$$\begin{aligned}
 m_{AZ\ p} &= 81 \cdot m_{pk\ p} = 3010525,9470 [g] \\
 m_{AZ\ ss} &= 81 \cdot m_{pk\ ss} + 10 \cdot m_{hk\ ss} + 6 \cdot m_{ok\ ss} \\
 &= 7483014,9550 [g] \\
 m_{AZ\ B_4C} &= 81 \cdot m_{pk\ B_4C} + 10 \cdot m_{hk\ B_4C} + 6 \cdot m_{ok\ B_4C} \\
 &= 1253877,2687 [g]
 \end{aligned}$$

Aktívna zóna		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Hmotnosť paliva v aktívnej zóne	$m_{AZ\ p}$	3,01 [t]
Hmotnosť oceli v aktívnej zóne	$m_{AZ\ ss}$	7,48 [t]
Hmotnosť karbidu bóru v aktívnej zóne	$m_{AZ\ B_4C}$	1,25 [t]

Tabuľka 4-18 Hmotnostná bilancia aktívnej zóny

Radiálny reflektor aktívnej zóny pozostáva zo 174 reflektorových kaziet usporiadaných do 4 sústredných kruhov okolo aktívnej zóny. Nižšie je spočítaná celková hmotnosť oceli v radiálnom reflektore aktívnej zóny $m_{RR\ ss}$ a celková hmotnosť karbidu bóru v radiálnom reflektore aktívnej zóny $m_{RR\ B_4C}$.

$$\begin{aligned}
 m_{RR\ ss} &= 174 \cdot m_{rk\ ss} = 25465455,5994 [g] \\
 m_{RR\ B_4C} &= 174 \cdot m_{rk\ B_4C} = 2124884,5374 [g]
 \end{aligned}$$

Radiálny reflektor		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Hmotnosť oceli v radiálnom reflektore aktívnej zóny	$m_{RR\ ss}$	25,47 [t]
Hmotnosť karbidu bóru v radiálnom reflektore aktívnej zóny	$m_{RR\ B_4C}$	2,12 [t]

Tabuľka 4-19 Hmotnostná bilancia radiálneho reflektora

Radiálne tienenie pozostáva zo 198 kaziet radiálneho tienenia usporiadaných do 3 sústredných kruhov okolo radiálneho reflektora. Nižšie je spočítaná celková hmotnosť oceli v radiálnom tienení $m_{RT\ ss}$ a celková hmotnosť karbidu bóru v radiálnom tienení $m_{RT\ B_4C}$.

$$m_{RT\ ss} = 198 \cdot m_{krt\ ss} = 4521366,927 [g]$$

$$m_{RT\ B_4C} = 198 \cdot m_{krt\ B_4C} = 9019035,7884 [g]$$

Radiálne tienenie		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Hmotnosť oceli v radiálnom tienení	$m_{RT\ ss}$	4,52 [t]
Hmotnosť karbidu bóru v radiálnom tienení	$m_{RT\ B_4C}$	9,02 [t]

Tabuľka 4-20 Hmotnostná bilancia radiálneho tienenia

Pre celkový obraz o hmote vnútroreaktorových komponentov sú celkové hmotnosti paliva $m_{c\ p}$, oceli $m_{c\ ss}$ a karbidu bóru $m_{c\ B_4C}$ zhrnuté v tabuľke 4 – 21. Hmotnosť ostatných vnútroreaktorových konštrukcií (nosný plášť, kôš aktívnej zóny a pod.) je zanedbaná.

Celková hmotnosť vnútroreaktorových komponentov		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Celková hmotnosť paliva	$m_{c\ p}$	3,01 [t]
Celková hmotnosť oceli	$m_{c\ ss}$	37,47 [t]
Celková hmotnosť karbidu bóru	$m_{c\ B_4C}$	12,40 [t]

Tabuľka 4-21 Celková hmotnosť vnútro – reaktorových komponentov

4.1.5 TEPELNÁ BILANCIA ŤAŽKEJ HAVÁRIE ALLEGRO

Následná časť práce sa zaoberá teplom, ktoré je generované v reaktore po jeho odstavení, tepelnou kapacitou vnútroreaktorových komponentov a procesom nahrievania a degradácie týchto častí.

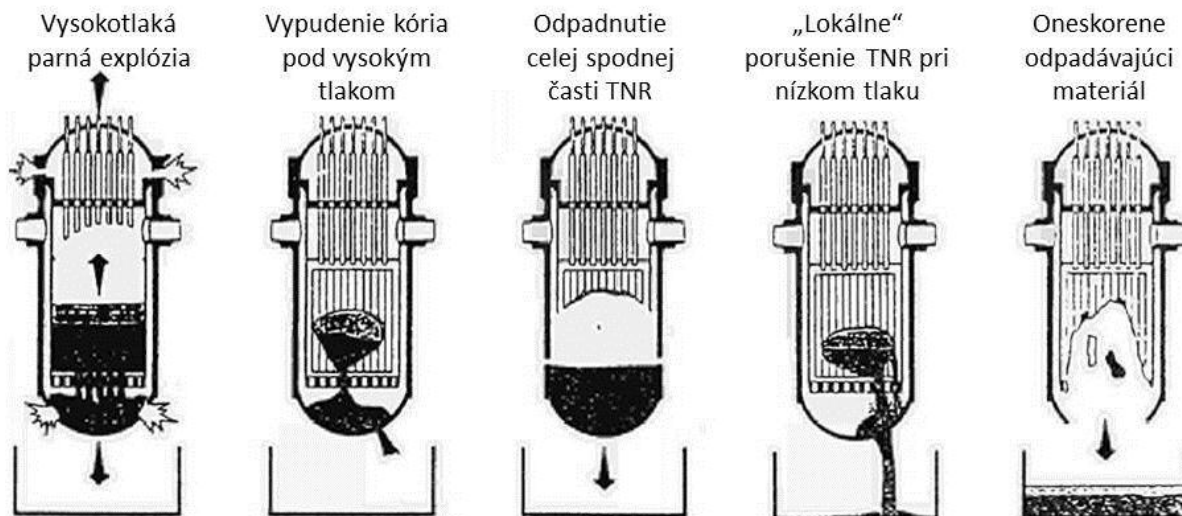
4.1.5.1 SPÔSOBY ROZTAVENIA AKTÍVNEJ ZÓNY

Pre voľbu vhodnej konštrukcie lapača taveniny a jeho dimenzionálny návrh je potrebné poznať vstupné dáta a ich okrajové hodnoty. Tie plynú z hraničných scenárov a podmienok, ktoré môžu nastať. Boli zvolené dva konkrétne scenáre:

- I. minimálny rozsah roztavenia materiálov v tlakovej nádobe reaktora je obmedzený iba na hmotu aktívnej zóny (palivo, pokrytie a obálka kazety vo výške paliva). Takto je do lapača taveniny dodaná vysokoenergetická tavenina s maximálnym tepelným tokom na jednotku plochy.
- II. maximálny rozsah roztavenia materiálov tlakovej nádoby reaktora. Lapač taveniny musí byť schopný prijať všetok roztavený materiál a efektívne ho stabilizovať.

Oba scenáre sú čisto hypotetické. Cieľom tejto práce však nie je simulovať jednotlivé scenáre ťažkých havárií, ktorých priebeh by určil presné vstupné parametre kória dodaného do lapača taveniny.

Spôsob úniku kória z tlakovej nádoby reaktora a tým pádom spôsob jeho dodania do lapača taveniny má taktiež významný vplyv podmienky, ktorým musí lapač taveniny odolať a teda aj na jeho parametre. Obrázok 4 – 4 znázorňuje najreprezentatívnejšie spôsoby úniku kória z tlakovej nádoby reaktora.



Obrázok 4-4 Spôsoby úniku kória z TNR [32]

4.1.5.2 ZOSTATKOVÝ VÝKON REAKTORA ALLEGRO

Paralelne so spracovaním tejto práce prebieha v ÚJV Řež, a. s. simulácia tavenia aktívnej zóny reaktora ALLEGRO kódom MELCOR. Prvé výsledky tejto simulácie predstavujú údaje o zostatkovom tepelnom výkone aktívnej zóny po zastavení štiepnej reťazovej reakcie v závislosti na čase. Výstupné hodnoty sú zhrnuté v tabuľke 4 – 22 a zobrazené grafom na obrázku 4 – 4. V súčasnom stave projektu ALLEGRO je väčšina komponentov v predbežnom (preliminary) štádiu návrhu. Nie sú známe technické parametre kľúčových zariadení, ktoré sú potrebné ako vstupné dáta pre výpočty a simulácie jednotlivých dejov prebiehajúcich v reaktore. Preto nie je možné určiť schopnosť odvádzať teplo DHR systémami, mieru prirodzenej cirkulácie hélia či iné spôsoby chladenia aktívnej zóny po odstavení.

Z tohto dôvodu a pre zachovanie konzervatívneho prístupu je pre účely tejto práce uvažované, že všetko teplo produkované v aktívnej zóne je po jej úspešnom odstavení absorbované materiálmi v aktívnej zóne a následne hmotami, ktoré ju obklopujú. Je teda uvažovaný adiabatický priebeh havárie – teplo nie je z priestoru tlakovej nádoby reaktora odvádzané ani privádzané. Množstvo tepla, ktoré je k dispozícii pochádza z nahriatej aktívnej zóny a hmôt, ktoré ju obklopujú a z rozpadu nestabilných jadier po odstavení reaktora – zostatkový výkon aktívnej zóny.

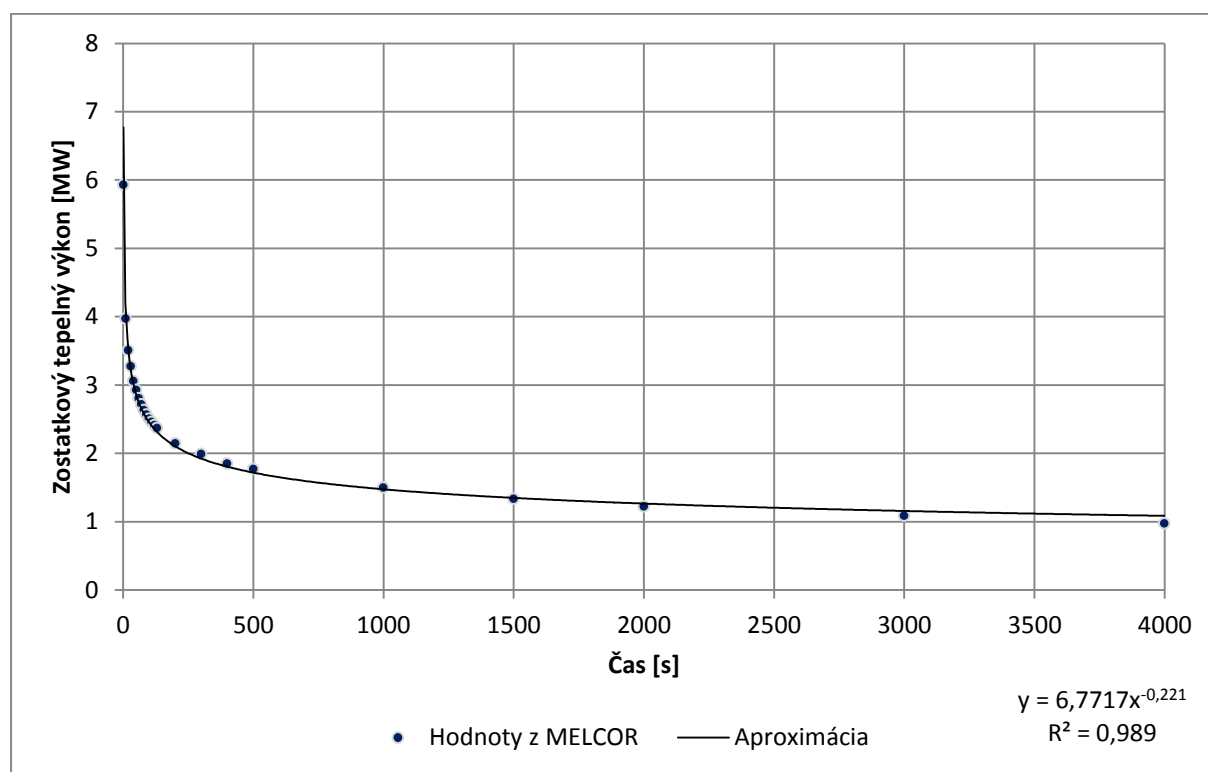
Zanedbané je teplo odvedené héliom v rámci prípadnej funkčnosti DHR systémov alebo prirodzenou cirkuláciou, teplo v podobe strát stenou tlakovej nádoby reaktora a tiež je zanedbané teplo, ktoré sa absorbuje do konštrukčných štruktúr tlakovej nádoby reaktora (nosný plášť, kôš aktívnej zóny, a pod.). Toto teplo nie je možné bližšie určiť v súčasnom stave projektu. Ďalej je predpokladaný konštantný tlak prostredia počas celého procesu nahrievania a tavenia aktívnej zóny.

Tabuľka 4 – 22 predstavuje spracované výstupné dáta z programu MELCOR poskytnuté od ÚJV Řež, a. s. Krivka zostatkového výkonu aktívnej zóny na obr. 4 – 4 vznikla

preložení funkčnej závislosti bodmi získanými z výstupných dát MELCOR. Celkové teplo, ktoré sa po odstavení reaktora absorbuje do materiálov v tlakovej nádobe reaktora získame integráciou tejto funkcie. Pre zachovanie konzervatívneho prístupu je uvažovaný konštantný výkon 1 MWt po uplynutí času 4000 sekúnd po odstavení reaktora.

Čas [s]	Zostatkový výkon [MWt]	Čas [s]	Zostatkový výkon [MWt]
1	5,92791	120	2,41235
10	3,97128	130	2,36898
20	3,50794	200	2,14415
30	3,27235	300	1,99052
40	3,05885	400	1,84873
50	2,92721	500	1,76836
60	2,80491	1000	1,49495
70	2,71591	1500	1,33472
80	2,6313	2000	1,22117
90	2,56558	3000	1,08733
100	2,50242	4000	0,971485
110	2,45655	5000	0,909323

Tabuľka 4-22 Hodnoty zostatkového tepelného výkonu reaktora ALLEGRO [26]



Obrázok 4-5 Priebeh zostatkového tepelného výkonu aktívnej zóny ALLEGRO

Rovnica (30) vyjadruje funkčnú závislosť okamžitého zostatkového tepelného výkonu p_z na čase po odstavení reaktora t . Táto funkcia bola získaná aproximáciou funkčnej závislosti výstupných dát simulácie kódom MELCOR.

$$p_z[MWt] = 6,7717 \cdot t^{-0,221} \quad (30)$$

Teplo uvoľnené rozpadom nestabilných jadier v istom časovom úseku t_1 až t_2 tak, že $(t_1, t_2) \in <0, 4000>$ Q je možné získať integráciou rovnice (30) v čase. Toto vyjadruje rovnica (31).

$$Q[MJ] = \int_{t_1}^{t_2} p_z dt \quad (31)$$

Celkové teplo uvoľnené počas prvých 4000 sekúnd od odstavenia reaktora Q_1 je teda podľa rovnice (32):

$$Q_1 = \int_1^{4000} 6,7717 \cdot t^{-0,221} dt = 5561,15 [MJ] \quad (32)$$

Tepelný výkon aktívnej zóny po uplynutí prvých 4000 sekúnd od odstavenia je uvažovaný konštantný na úrovni 1 MWt. Teplo uvoľnené v časovom intervale t_3 až t_4 tak, že $(t_3, t_4) \in (4000, \infty)$ Q_2 je možné získať z rovnice (33).

$$Q_2[MJ] = 1 \cdot (t_4 - t_3) + 5552,46 + \quad (33)$$

4.1.5.3 TEPELNÁ KAPACITA K DISPOZÍCII PO OdstAVENÍ REAKTORA

Po odstavení reaktora je na základe vyššie popísaných konzervatívnych predpokladov všetko teplo absorbované komponentmi aktívnej zóny a hmotami, ktoré ju obklopujú. Následná časť práce je venovaná výpočtu celkovej tepelnej kapacity týchto hmôt.

Palivo MOX

Priemerná teplota paliva za prevádzky $T_{P\text{MOX}}$ bola stanovená na 1173 K [26]. Tepelná degradácia paliva začína pri teplote $T_{S\text{MOX}}$ 2977 K a úplné roztavenie zmesi nastane pri $T_{L\text{MOX}}$ 3022 K (fázový diagram pre MOX palivo je uvedený na obrázku 4 – 1).

Priebeh mernej tepelnej kapacity MOX paliva v závislosti na teplote popísaný v kapitole 4.1.1.3, obrázok 4 – 3, rovnica (7), bol aproximovaný polynómom (34) pre UO_2 a (35) pre PuO_2 . Koeficienty polynómov (34) a (35) sú zaokrúhlené, pre výpočet boli použité hodnoty s päťnásť miestnym desatinným rozvojom.

$$\begin{aligned} c_{p\text{UO}_2}(T) \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right] &= -7,5629 \cdot 10^{-21} \cdot T^6 + 7,4327 \cdot 10^{-17} \cdot T^5 \\ &\quad - 2,9514 \cdot 10^{-13} \cdot T^4 + 6,6525 \cdot 10^{-10} \cdot T^3 \\ &\quad - 8,7997 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 6,4377 \cdot 10^{-4} \cdot T \\ &\quad + 0,1161 \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} c_{p\text{PuO}_2}(T) \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right] &= -1,7112 \cdot 10^{-20} \cdot T^6 + 1,7275 \cdot 10^{-16} \cdot T^5 \\ &\quad - 7,0447 \cdot 10^{-13} \cdot T^4 + 1,4853 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 \\ &\quad - 1,7154 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 1,0750 \cdot 10^{-3} \cdot T \\ &\quad + 0,046325 \end{aligned} \quad (35)$$

Teplo absorbované pri ohreve z prevádzkovej teploty 1173 K na teplotu úplného roztavenia 3022 K je dané integráciou tepelnej kapacity funkčne závislej na teplote v danom teplotnom intervale. Následne je mernú entalpiu MOX paliva potrebnú pre

ohrev z prevádzkovej teploty na teplotu počiatku degradácie paliva možné získať podľa rovnice (38).

$$\Delta h_{UO_2} = \int_{T_{PMOX}}^{T_{LMOX}} c_{p_{PuO_2}}(T) dT = \int_{1173}^{3022} c_{p_{UO_2}}(T) dT = 810,334 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \Delta h_{PuO_2} &= \int_{T_{PMOX}}^{T_{LMOX}} c_{p_{PuO_2}}(T) dT = \int_{1173}^{3022} c_{p_{UO_2}}(T) dT \\ &= 701,062 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \end{aligned} \quad (37)$$

$$\Delta h_{MOX} = (1 - y) \cdot \Delta h_{UO_{2,1}} + y \cdot \Delta h_{PuO_{2,1}} \quad (38)$$

$$\Delta h_{MOX} = 0,75 \cdot 810,334 + 0,25 \cdot 701,062 = 783,016 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (39)$$

Obdobne získame rozdiel mernej entalpie konštrukčnej oceli. Prevádzková teplota oceľového pokrytia paliva $T_{p\ clad}$ bola stanovená na 773 K [26]. Teplota počiatku tavenia oceľového pokrytia paliva $T_{S\ ss}$ je 1644 K a teplota úplného roztavenia $T_{L\ ss}$ je 1672 K.

$$c_{p_{SS}}(T) \left[\frac{kJ}{kg} \right] = 1,34 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,462 \quad (40)$$

$$\Delta h_{SS} \left[\frac{kJ}{kg} \right] = \int_{T_1}^{T_2} c_{p_{SS}}(T) dT \quad (41)$$

Merná entalpia potrebná pre ohriatie oceľového pokrytia paliva z prevádzkovej teploty $T_{p\ pok}$ na teplotu roztavenia oceľového pokrytia paliva $T_{L\ ss}$ je $\Delta h_{SS\ pok}$. Toto vyjadruje rovnica (40).

$$\begin{aligned} \Delta h_{SS\ pok} &= \int_{T_{p\ pok}}^{T_{L\ ss}} c_{p_{SS}}(T) dT = \int_{773}^{1672} c_{p_{SS}}(T) dT \\ &= 562,608 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \end{aligned} \quad (42)$$

Prevádzková teplota ostatných komponentov v aktívnej zóne (reflektorové a tieniace bloky kaziet, oceľové, riadiace a havarijné kazety) $T_{p\ ss}$ bola konzervatívne stanovená na 750 K.

Výpočet mernej entalpie potrebnej pre ohriatie ocele Δh_{SS} v aktívnej zóne (s vylúčením oceľového pokrytia) z prevádzkovej teploty $T_{p\ ss}$ na teplotu úplného roztavenia $T_{L\ ss}$ vyjadruje rovnica (43).

$$\Delta h_{SS} = \int_{T_{p\ ss}}^{T_{L\ ss}} c_{p_{SS}}(T) dT = \int_{750}^{1672} c_{p_{SS}}(T) dT = 575,581 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (43)$$

Výpočet mernej entalpie potrebnej pre ohriatie karbidu bóru $\Delta h_{B_4C_1}$ v aktívnej zóne z prevádzkovej teploty T_{pB_4C} rovnej 750 K na teplotu úplného roztavenia T_{LB_4C} rovnej 2743 K vyjadruje rovnica (44). Funkčná závislosť tepelnej kapacity karbidu bóru na teplote $c_{pB_4C}(T)$ je uvedená v rovnici (15).

$$\begin{aligned}\Delta h_{B_4C} &= \int_{T_{pB_4C}}^{T_{LB_4C}} c_{pB_4C}(T) dT = \int_{750}^{2743} c_{pB_4C}(T) dT \\ &= 5166,050 \left[\frac{kJ}{kg} \right]\end{aligned}\quad (44)$$

Merná entalpia potrebná na roztavenie látky (zmena skupenstva) nazývaná merné latentné teplo tavenia označované ako Δh_{fus} je energia dodaná danej látke využitá pre narušenie kryštalickej mriežky a uvoľnenie molekúl. Jednotlivé hodnoty sú uvedené nižšie, zdroje a legendy sú vyššie v tejto kapitole.

$$\Delta h_{fusMOX} = 0,75 \cdot 259,3 + 0,25 \cdot 240,9 = 254,7 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (45)$$

$$\Delta h_{fusSS} = 270 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (46)$$

$$\Delta h_{fusB_4C} = 1690 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (47)$$

Následne je možné pomerne jednoducho spočítať celkové teplo potrebné dodať hmotám uvažovaných pre rozsah roztavenia I (minimálny rozsah) pre úplné roztavenie príslušných materiálov – rovnica (48).

$$\begin{aligned}\Delta H_I &= m_p \cdot (\Delta h_{MOX} + \Delta h_{fusMOX}) + m_{ss\ pok} \cdot (\Delta h_{ss\ pok} \\ &\quad + \Delta h_{fusSS}) + m_{ss\ I} \cdot (\Delta h_{SS} + \Delta h_{fusSS})\end{aligned}\quad (48)$$

$$\begin{aligned}\Delta H_I &= 3010,770 \cdot (783,016 + 254,7) + 1220,773 \\ &\quad \cdot (562,608 + 270) + 414,637 \cdot (575,581 + 270) \\ &= 4491358,736 [kJ] = 4491,359 [MJ] = 4,5 [GJ]\end{aligned}$$

Obdobne je možné získať celkové teplo potrebné dodať hmotám uvažovaných pre rozsah roztavenia II (maximálny rozsah) pre úplné roztavenie príslušných materiálov – rovnica (49).

$$\begin{aligned}\Delta H_{II} &= m_p \cdot (\Delta h_{MOX} + \Delta h_{fusMOX}) + m_{ss\ pok} \cdot (\Delta h_{ss\ pok} \\ &\quad + \Delta h_{fusSS}) + m_{ss\ li} \cdot (\Delta h_{SS} + \Delta h_{fusSS}) + m_{B_4C\ II} \\ &\quad \cdot (\Delta h_{B_4C} + \Delta h_{fusB_4C})\end{aligned}\quad (49)$$

$$\begin{aligned}\Delta H_{II} &= 3010,770 \cdot (783,016 + 254,7) + 1220,773 \\ &\quad \cdot (562,608 + 270) + 36209,227 \\ &\quad \cdot (575,581 + 270) + 12401 \cdot (5166,050 + 1690) \\ &= 119780459,993 [kJ] = 119780,460 [MJ] \\ &= 119,9 [GJ]\end{aligned}$$

Rozsah roztavenia I		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Hmotnosť paliva	m_p	3010,770 [kg]
Hmotnosť oceli pokrytia paliva	$m_{ss\ pok}$	1220,773 [kg]
Hmotnosť ostatnej ocele	$m_{ss\ I}$	414,637 [kg]
Rozsah roztavenia II		
Veličina	Značka	Hodnota [Jednotka]
Hmotnosť paliva	m_p	3010,770 [kg]
Hmotnosť oceli pokrytia paliva	$m_{ss\ pok}$	1220,773 [kg]
Hmotnosť ostatnej ocele	$m_{ss\ II}$	36209,227 [kg]
Hmotnosť karbidu bóru	$m_{B4C\ II}$	12401 [kg]

Tabuľka 4-23 Hmotnosť jednotlivých komponentov rôznom rozsahu roztavenia

Z vypočítaných hodnôt ΔH_I a ΔH_{II} je zrejmé, že uvažovaný minimálny rozsah roztavenia prebehne ešte počas prvých 4000 sekúnd od odstavenia reaktora. To znamená, že zostatkový výkon ešte nepoklesol na úroveň 1 MWt. Naopak pri uvažovanom maximálnom rozsahu roztavenia je zostatkový tepelný výkon taveniny na úrovni 1 MWt (reálne pod touto hodnotou) a hlavné zaťaženie pre lapač taveniny predstavuje množstvo hmoty do neho dodanej.

4.2 ZHODNOTENIE

Priebeh degradácie kória a množstvo roztaveného materiálu dodaného do lapača taveniny silne závisí od scenáru ťažkej havárie. Pri zlyhaní DHR systémov pri zachovaní tlaku primárneho okruhu (napr. úplná strata napájania elektrárne – station blackout) sa predpokladá skoré pretavenie tlakovej nádoby reaktora a do lapača taveniny je dodané relatívne malé množstvo vysoko energetickej taveniny s vysokým zostatkovým výkonom – vysoká objemová hustota výkonu. Naopak, pri udalostiach spojených so stratou tlaku primárneho okruhu sa predpokladá akumulácia väčšieho množstva taveniny v spodnej časti tlakovej nádoby reaktora a až jej neskoršie pretavenie. To má za následok dodanie veľkého množstva taveniny s nižším zostatkovým výkonom do lapača taveniny. Simulácia degradácie aktívnej zóny za rôznych okolností je možná pri známych konštrukčných riešeniach celého primárneho okruhu (DHR systémy, zariadenie pre výmenu paliva, tepelné výmenníky a pod.) napríklad pomocou kódu MELCOR. Výstupom simulácie je hmota, zloženie a úroveň zostatkového tepelného výkonu pre rôzne scenáre ťažkej havárie.

Lapač taveniny musí byť dimenzovaný pre všetky situácie, ktoré môžu nastať. Pre účely tejto práce boli zvolené dve krajné možnosti rozsahu roztavenia aktívnej zóny a ostatných komponentov tlakovej nádoby reaktora. Rozsah roztavenia I predstavuje minimálne množstvo vysoko energetickej taveniny dodanej do lapača taveniny. Podobný priebeh ťažkej havárie sa dá predpokladať napríklad pri úplnom výpadku napájania elektrárne. V tomto prípade je nutné dostatočné množstvo obetného materiálu pre nariadenie taveniny s cieľom zabezpečiť menší tepelný tok na jednotku plochy, ktorý nepoškodí štruktúry lapača taveniny určené pre konečnú stabilizáciu taveniny. Rozsah roztavenia II predstavuje maximálne množstvo taveniny, ktoré musí lapač taveniny prijať a efektívne stabilizovať.

5 ANALÝZA VLASTNOSTÍ TAVENINY

V súčasnosti je majoritná časť komerčne prevádzkovaných jadrových reaktorov chladených a moderovaných ľahkou vodou (LWR). Z toho dôvodu je aj hlavná časť výskumnej činnosti v oblasti jadrovej energetiky orientovaná na problematiku LWR. Je tomu tak aj pri skúmaní vlastností taveniny vnútroreaktorových komponentov – kória, vznikajúcej roztavením vplyvom zostatkového tepelného výkonu počas a po nadprojektovej havárii jadrového reaktora. Pre modelovanie procesov spojených s ťažkou haváriou je potrebné poznať, okrem kompletného návrhu systémov a zariadení elektrárne, ktoré jej priebeh ovplyvňujú, aj charakteristiky vzniknutého kória, ale aj čiastočných procesov sprevádzajúcich priebeh ťažkej havárie až po konečnú stabilizáciu taveniny. Za účelom zistenia dostatočne presných charakteristík týchto procesov a vlastností látok, ktoré sa ich zúčastňujú v minulosti prebehlo niekoľko komplexných programov. Avšak kórium vznikajúce pri ťažkej havárii rýchleho plynom chladeného reaktora (GFR) je, samozrejme, odlišné od toho vznikajúceho pri ťažkej havárii LWR. Touto problematikou sa zaoberá nasledujúca kapitola.

5.1 PROCESY V TLAKOVEJ NÁDOBE REAKTORA

Po odstavení reaktora, ak nedochádza k sústavnému odvodu zostatkového tepla niektorým z bezpečnostných systémov, dôjde v dôsledku nahriatia aktívnej zóny a štruktúr, ktoré ju obklopujú k postupnej tepelnej degradácii materiálu pokračujúcej až do roztavenia materiálu. Následne sa tekutý materiál nazývaný kórium hnaný prevažne gravitáciou zhromažďuje na dne tlakovej nádoby reaktora, kde v závislosti na jeho zložení rozvrstviuje a postupne interaguje so stenou tlakovej nádoby reaktora, až dôjde k narušeniu jej integrity. Spôsob uvoľnenia kória z tlakovej nádoby reaktora závisí na množstve faktorov, ktoré sú ovplyvnené priebehom ťažkej havárie.

Pre porozumenie týmto procesom bolo v minulosti realizovaných niekoľko programov, ktoré pozostávali z množstva vykonaných experimentov skúmajúcich rôzne procesy počas tavenia komponentov aktívnej zóny LWR a následne vlastnosti taveniny typickej pre tento typ reaktora. Najrozsiahlejšie z nich boli RASPLAV a MASCA. Hlavným cieľom týchto projektov bolo riešenie problémov sprevádzajúcich IVR prístup k ťažkej havárii. Tento problém zahŕňa riešenie rôznych otázok, ako:

- tepelno hydraulické správanie kória,
- vzájomné fyzikálne chemické interakcie jednotlivých komponentov kória,
- tepelná a chemická interakcia kória so stenou tlakovej nádoby reaktora,
- chladenie vonkajšieho povrchu steny tlakovej nádoby reaktora pomocou zaplavenia reaktorovej šachty,
- mechanické namáhanie tlakovej nádoby reaktora.

5.1.1 ROZVRSTVENIE KÓRIA

Experimenty vykonané v rámci programu RASPLAV ukázali, že rozvrstvenie nastalo u kória, ktoré obsahovalo istý podiel uhlíka. Pri kontrolných experimentoch s kóriom bez obsahu uhlíka nenastalo žiadne rozvrstvenie. Ten istý set experimentov odhalil dôležité správanie sa pri teplotách kória počas procesu tavenia – medzi teplotami solidus a liquidus. Kórium bolo nezávisle na obsahu uhlíka medzi teplotami solidus a liquidus rozdelené do dvoch fáz. Oxidované zirkónium ZrO_x sa tavelo pri teplote mierne nad teplotou solidus, zatiaľ čo keramická fáza $(UZr)O_{2-x}$ ostávala tuhá. Pri podobnom

rozdelení fáz dochádza k pohybu tekutej zložky cez póry a praskliny v tuhej fáze. Takto dôjde k rozdeleniu jednotlivých zložiek kória aj bez prítomnosti uhlíka. [34]

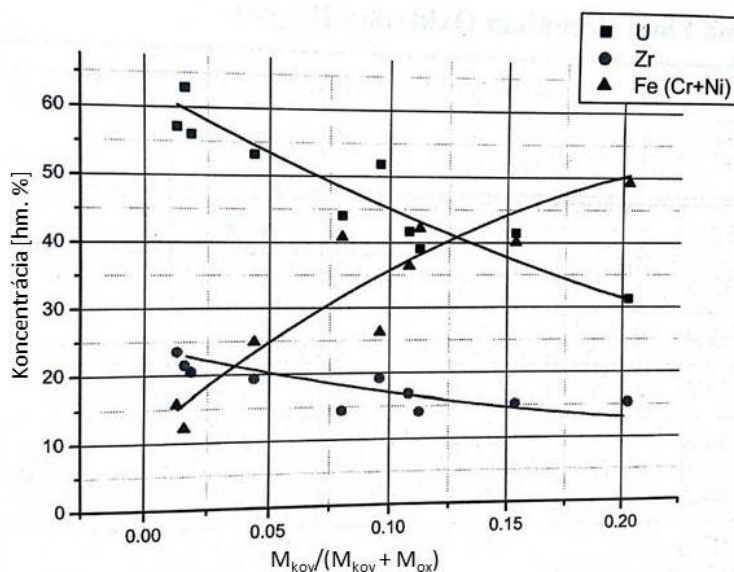
Proces oddelenia komponentov kória a ich následný pohyb môže nastať pri priebehu ťažkej havárie, najmä pri priebehu nahrievania aktívnej zóny. Projekt MASCA nadviazal na výsledky programu RASPLAV v tejto oblasti a zameral sa na skúmanie rozvrstvenia vplyvom malých množstiev nečistôt v kóriu (ako uhlík) alebo vplyvom separácie tuhej a tekutej fázy počas teplotného intervalu solidus – liquidus. [34]

Rôzne možnosti rozvrstvenia kória boli skúmané v sérii malých experimentov. Hlavné poznatky sú zhrnuté nasledovne: Pri obsahu uhlíka v kóriu nad 0,2 hm. % dochádza k vytvoreniu hornej vrstvy s malou hustotou bohatou na zirkónium. Takisto obsah uhlíka v tejto hornej vrstve je výrazne väčší (1,5 hm. %) v porovnaní s ochudobneným ostatným objemom kória (0,1 hm. %). Tento efekt je pripisovaný formácii karbidom zirkónia (ZrC_x) a jeho oxikarbidom (ZrC_xO_y). Tvorenie oxikarbidov nastáva už pri relatívne nízkych teplotách, avšak počas experimentov nedošlo k ich roztaveniu (teplota tavenia oxikarbidov presahuje $3000^\circ C$) a tak isto nie sú rozpustné v ostatnej tavenine. Vplyvom rozdielu hustôt došlo k ich separácii po roztavení oxidickej časti kória. [34]

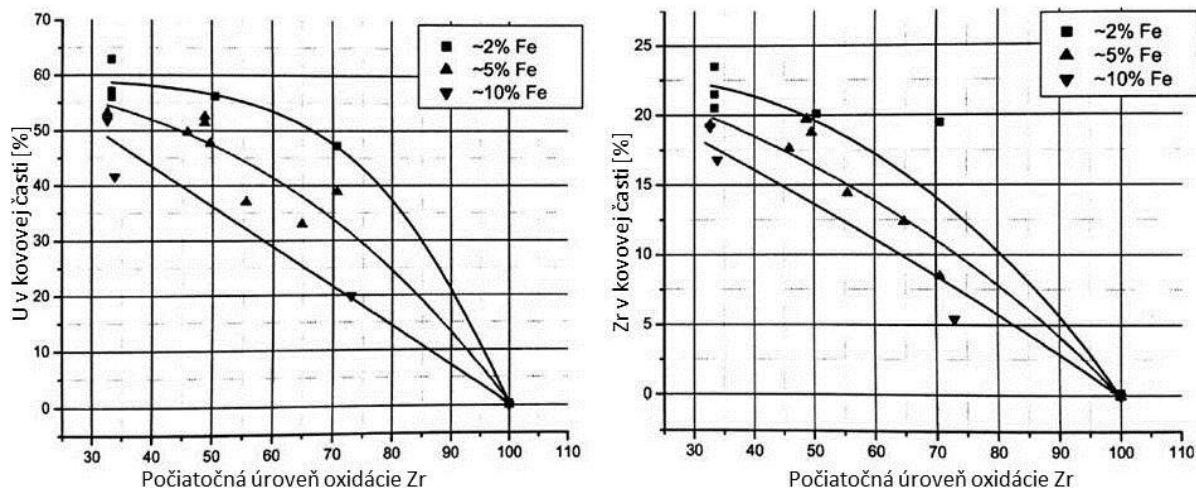
5.1.2 INTERAKCIA KÓRIA A OCELE

Štúdium interakcií kória s oceľou je dôležitým spektrom interakcií nastávajúcich počas ťažkej havárie. Vďaka značnému rozdielu teplôt tavenia takáto interakcia môže nastať medzi tekutou oceľou a kóriom (v LWR je za kórium považovaná zmes paliva a zirkónia), alebo tekutou oceľou, ale tuhým kóriom. Séria experimentov s rôznymi podmienkami a na rôznych experimentálnych základniach bola prevedená v rámci projektu MASCA za účelom získania kvantitatívnych a kvalitatívnych experimentálnych dát v tejto problematike. V experimentoch boli postupne menené nasledujúce parametre: zloženie kória (zmena úrovne oxidácie zirkónia, pomer uránu a zirkónia), zloženie kovu (experimenty prebiehali s nehrdzavejúcou oceľou a čistým železom). [33]

Záverom experimentov zameraných na problematiku interakcie kória s oceľou (železom) jednoznačne ukázali, že oceľ (železo) extrahuje kovové zirkónium a urán z oxidického kória. To vedie k zväčšeniu hmotnosti kovovej časti taveniny, k nárastu jeho hustoty a potenciálne k zmene konfigurácie vrstiev. Transport uránu do kovovej časti taveniny je úzko spojený s prítomnosťou voľného (neoxidovaného) zirkónia vo vsádzke kória. Množstvo uránu a zirkónia transportovaného do kovovej časti je závislé aj na hmotnostnom podiele kovovej taveniny k oxidickému kóriu. Obrázok 5 – 1 zobrazuje výsledky koncentrácie uránu a zirkónia v kovovej časti získané pri experimentoch s čiastočne oxidovaným kóriom v závislosti na relatívnom hmotnostnom podiele kovovej časti taveniny. Obrázok 5 – 2 zobrazuje dáta koncentrácie uránu a zirkónia v kovovej časti v závislosti na počiatkovej úrovni oxidácie kória (a zirkónia v ňom obsiahnutom). Koncentrácia extrahovaného uránu a zirkónia do kovovej časti taveniny klesá s mierou oxidácie kória. [33]



Obrázok 5-1 Závislosť koncentrácie extrahovaného U, Zr a ocele na hmotnostnom podiele kovovej časti taveniny [33]



Obrázok 5-2 Závislosť koncentrácie extrahovaného U, Zr a ocele na miere počiatkovej oxidácie Zr [33]

Po interakcii je úroveň oxidácie zložiek oxidickej časti kória vyššia ako počiatková miera. So zvyšujúcim sa hmotnostným podielom ocele (železa) rastie aj miera dodatočnej oxidácie oxidickej časti kória až po jej úplné zoxidovanie pri veľkých množstvách ocele (železa). [33]

5.1.3 ROZDELENIE ŠTIEPNYCH PRODUKTOV

Experimenty s kóriom a oceľou vykonané v programe MASCA ukázali značný pohyb komponentov kória ako urán a zirkónium medzi oxidickou a kovovou časťou taveniny. Počas interakcie kória a ocele je nezanedbateľná časť uránu, zirkónia a kyslíka transportovaná do kovovej časti taveniny, ktorá pôvodne tieto zložky neobsahovala. [33]

Experimenty skúmajúce správanie sa štiepných produktov v podmienkach pri tavení aktívnej zóny sa zamerali na rozdelenie málo prchavých štiepných produktov medzi oddelenú oxidickú a kovovú časť taveniny. Pre simulovanie štiepných produktov boli zvolené prvky Mo, Ru, Sr, Ba, Ce a La.

Závery experimentov ukázali koncentrovanie kovových štiepných produktov ako Mo a Ru do kovovej časti taveniny, zatiaľ čo Sr, Ba, Ce a La ostali v oxidickej časti. Miera migrácie štiepných produktov závisí na teplote, ktorá je počas procesu dosiahnutá – s rastúcou teplotou rastie aj miera rozdelenia kovových a oxidických štiepných produktov medzi kovovou a oxidickou časťou taveniny. Tiež pôvodné zloženie kória má značný vplyv na kinetiku týchto procesov. Zvýšenie podielu uránu voči zirkóniu v kóriu zvyšuje množstvo migrovaných štiepných produktov a naopak. Pri nahradení železa v tavenine nehrdzavejúcou oceľou nebol zaznamenaný významnejší vplyv na rozdelenie štiepných produktov medzi kovovú a oxidickú časť taveniny. [33]

5.2 PROCESY PO PRETAVENÍ TLAKOVEJ NÁDOBY REAKTORA

Po pretavení kória z tlakovej nádoby reaktora pokračuje množstvo procesov ovplyvňujúcich ďalší priebeh ťažkej havárie. V prípade ťažkej havárie GFR je majoritná interakcia s obetným materiálom. V prípade LWR môže nastať táto interakcia za prítomnosti vody, ktorá má značný vplyv na priebeh týchto procesov, avšak v prípade demonštračnej jednotky GFR je prítomnosť vody v počiatočnej fáze po pretavení tlakovej nádoby reaktora počas pobytu kória v systéme dočasného zadržania vysoko nepravdepodobná.

5.2.1 INTERAKCIA KÓRIA S OBETNÝM MATERIÁLOM

Experimenty skúmajúce interakciu kória s obetným materiálom mali dve hlavné úlohy:

- identifikovať najdôležitejšie fyzikálne a chemické procesy umožňujúce lepšie porozumenie a posúdenie hlavných javov,
- poskytnúť dôveryhodné kvantitatívne experimentálne dáta pre ohodnotenie výsledkov výpočtových simulácií.

Je potrebné uvedomiť si nesmiernu komplexnosť procesov tohto fenoménu vzájomných fyzikálnych a chemických interakcií viac fázového systému s rôznymi komponentmi. Preto požadovať úplné porozumenie všetkým detailom procesov podieľajúcich sa na vzájomnej interakcii kória s obetným materiálom je nereálne. Avšak, v súčasnosti poznáme hlavné deje, ktoré významne ovplyvňujú priebeh ťažkej havárie. [32]

Teplota degradácie obetného materiálu a entalpia potrebná na jeho roztavenie sú jeho charakteristickými vlastnosťami, avšak aj produkty jeho rozpadu značne ovplyvňujú ďalšie procesy (napr. množstvo uvoľnených plynov a pod.). Priebeh interakcie a rozpadu obetného materiálu môžu tiež ovplyvniť viaceré okolnosti, ako napr. podmienky, ktorým bol vystavený počas prevádzky reaktora (najmä teplota) a doba vystavenia týmto podmienkam. [32]

Vlastnosti kória závisia od zastúpenia kovovej a oxidickej fázy, tak isto aj od ich zloženia, ktoré môže nadobudnúť široké spektrum v závislosti od priebehu procesov, z ktorých niektoré sú popísané vyššie v tejto kapitole. Všeobecne je predpokladané, že oxidická časť kória je z počiatku interakcie ťažšia ako kovová v dôsledku vysokého podielu ťažkých prvkov. Po začatí interakcie sa predpokladá jej nariadenie ľahkými oxidmi uvoľnenými z obetného materiálu. Postupne hustota oxidickej časti taveniny klesne natoľko, že vytvorí hornú vrstvu roztaveného materiálu. Všeobecne je predpokladané vytvorenie škrupiny na spodnom okraji oxidickej vrstvy taveniny uvážením typických podmienok prenosu tepla do kovovej vrstvy a to vďaka vysokej teplote liquidus oxidickej fázy taveniny a jej nízkej tepelnej vodivosti. Aj keď je väčšina

štiepných produktov v oxidickej časti taveniny, predpokladá sa pokračovanie tavenia obetného materiálu vďaka vysokej tepelnej vodivosti kovovej vrstvy, ktorá tvorí styčnú plochu medzi oxidickou fázou taveniny a obetným materiálom. Plyny uvoľnené z obetného materiálu majú veľký vplyv na oxidickú časť taveniny a jej škrupinu bez ohľadu na existenciu a hrúbku kovovej vrstvy. [32]

5.2.2 EXPERIMENTY SKÚMAJÚCE INTERAKCIU KÓRIA S OBETNÝM MATERIÁLOM

BETA

Experimentálne zariadenie BETA bolo postavené a prevádzkované od roku 1984 na Kersnforschungszentrum Karlsruhe za účelom štúdie interakcie taveniny a obetného materiálu vo valcovej betónovej nádobe. Tavenina typicky pozostávala z 300 kg nehrdzavejúcej ocele a 150 kg oxidov (Al_2O_3 , CaO , SiO_2). Tavenina bola nahrievaná na teplotu cca 2000°C pomocou indukcie. Indukčným ohrevom je nahrievaná kovová časť taveniny a oxidy prijímajú energiu princípom prenosu tepla z kovovej časti.

Interakcia s obetným materiálom je v experimentoch projektu BETA dominantne vedená kovovou časťou taveniny. Hlavným dôvodom je indukčný princíp ohrevu, ktorý generuje teplo v kovovej časti taveniny, zatiaľ čo oxidická časť ostáva chladnejšia, potenciálne pod bodom tavenia obetného materiálu. Výsledky experimentov ukazovali nižšiu teplotu oxidov ako pri použití taveniny s vysokým podielom UO_2 kvôli odlišnej teplote tuhnutia tejto fázy a absencii priameho ohrevu oxidickej časti taveniny. [32]

Výsledky experimentov BETA ukazujú, že pri vysokých vstupných teplotách taveniny, kedy je charakteristický malý vplyv škrupiny na rozhraní taveniny a obetného materiálu, je postup taveniny dominantný smerom nadol. Táto interakcia je sprevádzaná prudkým uvoľňovaním plynov z obetného materiálu, ktoré v podobe bublín v tavenine stúpajú k jej povrchu. Objem taveniny pripomína proces prudkého varu, až sú časti taveniny vymrštené z jej objemu do priestoru nad ňou a zachytávajú sa na stenách nádoby. Jav „varu“ taveniny zintenzívnil prenos tepla do obetného materiálu, čo malo za následok zintenzívnenie jeho tavenia. Postup taveniny prebiehal konštantou rýchlosťou cca 1mm/s . [32]

BETA II

Experimenty programu BETA II prebiehali v rokoch 1990 až 1992. Skúmaný bol najmä vplyv prítomnosti zirkónia v tavenine. Súčasne bol pridaný aj karbid bóru pre priblíženie podmienkam pri roztavení aktívnej zóny LWR. Prevedenie experimentálnej základne bolo podobné ako pri programe BETA s tou istou technikou ohrevu. Vylepšená bola technológia merania skúmaných veličín. [32]

Výsledky ukázali, že interakciám počas prvých dvoch až troch minút dominuje prudká oxidácia zirkónia. Napriek množstvu tepla uvoľneného pri oxidácii zirkónia a indukčnému ohrevu je stuhnutie taveniny dosiahnuté pomerne skoro – cca 150 sekúnd od počiatku interakcie. Toto je pripisované opäť prudkému uvoľňovaniu plynov, ktoré pohybujú objemom taveniny, čo spôsobuje zlepšenie podmienok prenosu tepla. [32]

SANDIA

Séria experimentov v rámci programu SANDIA pokrýva široké spektrum interakcií kov – betón. Bola použitá tavenina, ktorá je bližšia tavenine vznikajúcej pri nadprojektovej havárii LWR, vrátane obsahu UO_2 . Skúmané boli tri druhy obetných materiálov

umiestnených v polo guľovej betónovej nádobe – vápenec, vápenec s kremičitým pieskom a čadičový betón. Čadičový betón je zložením blízky kremičitému betónu, avšak nahradzuje cca 20 % SiO_2 vyšším obsahom Al_2O_3 , MgO a Fe_2O_3 . Systém ohrevu využíval indukčný princíp. Okrem interakcií taveniny a obetného materiálu boli v tomto programe skúmané aj interakcie pevných častíc o vysokej teplote, ktoré simulovali odpadávajúce kusy komponentov aktívnej zóny, s obetným materiálom.

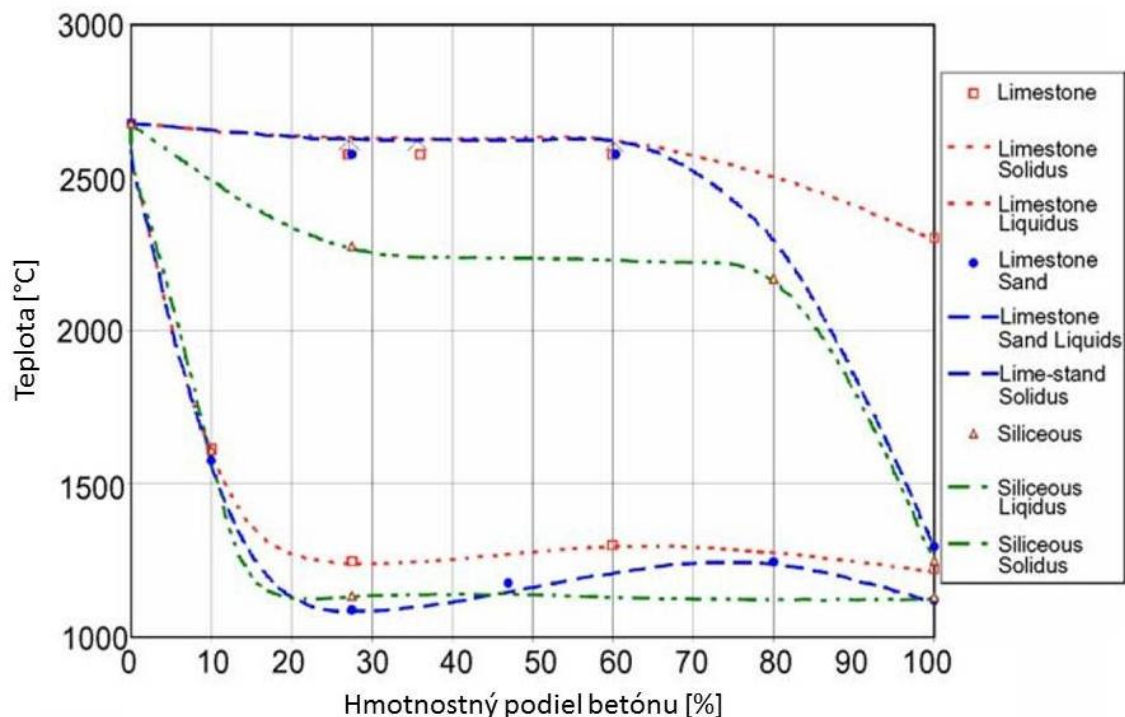
Všetky druhy použitého materiálu vykazovali taktiež značnú a takmer rovnakú intenzitu uvoľňovania plynov, čo spôsobovalo zintenzívnenie prestupu tepla z taveniny do obetného materiálu. Počas prvej, vysokoenergetickej reakcie bol zaznamenaný dokonca vznes taveniny od povrchu obetného materiálu vplyvom vytvorenia vrstvy plynov (najmä H_2O a CO_2). Výsledky týchto experimentov potvrdili závery programu BETA. [32]

V ďalšej sérii experimentov programu SANDIA bola skúmaná možnosť chladiť taveninu interagujúcu s obetným materiálom zaplavením jej povrchu vodou a zastaviť tak pokračujúcu eróziu obetného materiálu. V prvom experimente bol povrch taveniny zaplavený po 12 minútach interakcie s obetným materiálom, v druhom experimente už po 1 minúte. Výsledky oboch experimentov ukázali, že vplyvom vytvorenia nepriepustnej vrstvy zo stuhnutých ľahkých oxidov uvoľnených z obetného materiálu na povrchu taveniny sa veľmi zhoršia podmienky prestupu tepla z taveniny do vody. Pokračujúca erózia na dne nádoby nebola zaplavením povrchu taveniny takmer vôbec ovplyvnená. [32]

Špecifické experimenty malých rozmerov

Dôležité dáta dopĺňajúce závery experimentov so širokým záberom skúmanej problematiky boli získané z úzko zameraných experimentov, spravidla vykonaných v menšom rozsahu použitého materiálu. Z veľkého množstva vykonaných experimentov bol vybraný jeden, ktorého cieľom bolo overenie teplôt solidus a liquidus získaných pri predchádzajúcich experimentoch, ktoré ukázali neočakávané výsledky voči zaužívaným hodnotám používaných v simulačných kódach. [35]

Výsledky ukázali, že teplota solidus skúmaných tavenín je stovky stupňov pod konvenčne prijatou hodnotou, ktorá bola uplatnená napríklad kódom CORON a teplota liquidus je značne nad vypočítanou hodnotou. Dôsledkom tohto širokého intervalu tuhnutia taveniny je značné zvýšenie viskozity, lebo aj pri vysokých teplotách ostáva zmes tuhých častíc a taveniny. Preto nie je možné ani vtedy očakávať Newtonovské chovanie viskóznej taveniny. [35]



Obrázok 5-3 Fázový diagram zmesi kória a rôznych druhov betónu [35]

Legenda : Limestone – vápenc; Limestone Sand – vápenc s pieskom; Siliceous – kremičitý betón; Solidus – teplota počiatku tavenia; Liquidus – teplota úplného roztavenia

5.3 ZHODNOTENIE

Pre úspešnú simuláciu priebehu ťažkej havárie je potrebné blízke porozumenie jednotlivým procesom, ktoré postupne ovplyvňujú jej priebeh. Za týmto účelom bolo v minulosti zahájených niekoľko programov, ktorých náplňou bolo vypracovanie a realizácia experimentov zameraných na jednotlivé skúmané skutočnosti.

Vlastnosti a správanie kória typického pre LWR je silne ovplyvnené prítomnosťou relatívne veľkého množstva zirkónia. Táto skutočnosť ovplyvňuje nie len fyzikálne vlastnosti taveniny, ale aj celkovú tepelnú bilanciu procesu, keďže oxidácia zirkónia je silne exotermická reakcia. Zo súčasného návrhu demonštračnej jednotky GFR je zrejmé, že zirkónium bude v kóriu s typickým zložením pre GFR absentovať. Z tohto dôvodu je potrebné, na základe hore uvedených príkladov výsledkov program ako RASPLAV a MASCA, vytvoriť komplexnú analýzu vplyvu zirkónia na jednotlivé procesy prebiehajúce počas nadprojektovej havárie LWR a identifikovať rozdiely v správaní kória bez prítomnosti zirkónia. Zároveň je potrebné zhodnotenie ostatných rozdielov taveniny LWR a GFR a ich vplyv na procesy sprevádzajúce ťažkú haváriu. Následne budú stanovené výsledky experimentov pôvodne skúmajúcich problematiku LWR, ktoré je možné považovať za relevantné. Pre objasnenie ostatných vlastností kória a procesov prebiehajúcich počas ťažkej havárie GFR bude potrebné vykonať obdobné experimenty. Vďaka rozsiahlym skúsenostiam s touto experimentálnou činnosťou nebude nutný taký rozsah, ako tomu bolo v minulosti.

6 NÁVRH OPATRENÍ PRE ZMIERNENIE ŤAŽKEJ HAVÁRIE GFR

Aj keď sled udalostí, ktorý by mohol viesť až k hypotetickému roztaveniu aktívnej zóny a následnému úniku taveniny mimo tlakovú nádobu reaktora sa javí ako veľmi nepravdepodobný, súčasné bezpečnostné štandardy prevádzky jadrových zariadení vyžadujú zabezpečenie zamedzenia úniku štiepných produktov a rádioaktívneho žiarenia mimo priestor kontajnementu aj v podobných situáciách. Túto funkciu plnia v moderných jadrových elektrárnach dva systémy. Prvý prístup reprezentuje zadržanie kória v tlakovej nádobe reaktora a jej externé chladenie. Tento prístup bol zvolený napríklad v projekte AP1000. Nakoľko však tento prístup nedokáže pokryť rozsah možných scenárov a neistôt, ktoré sú v súčasnom štádiu vývoja demonštračnej jednotky GFR a zaručiť tak minimalizáciu negatívnych následkov ťažkej havárie za všetkých okolností, bol zvolený prístup stabilizácie kória až po pretavení tlakovej nádoby reaktora – externá stabilizácia. Za týmto účelom je do projektu elektrárne zahrnuté zariadenie nazývané lapač aktívnej zóny, ktorého všeobecný popis, funkcie a rôzne aktuálne inštalované verzie pre LWR sú uvedené v kapitole 3. Nasledujúca kapitola sa zaoberá možnosťou použitia lapača taveniny pre demonštračnú jednotku GFR s výkonom 75 MWt.

6.1 ANALÝZA POUŽITIA LAPAČA TAVENINY

Pri navrhovaní každého zariadenia je potrebné zvážiť súbor všetkých požiadaviek, ktoré má dané zariadenie spĺňať. Pri prvotnom, koncepčnom návrhu lapača taveniny je potrebné zvážiť najmä rozmerové možnosti daného energetického celku, termomechanické podmienky a podobne. Tieto vstupné dáta tvoria takzvané projektové východiská (design basis), ktorých popis je náplňou tejto časti práce.

6.1.1 ROZMEROVÉ KRITÉRIÁ

Dostupnosť priestoru v kontajnmente všetkých jadrových reaktorov je obmedzený. Z tohto dôvodu je potrebné koncipovať všetky komponenty jadrovej elektrárne, ktoré sú umiestnené v kontajnmente v efektívnom rozmiestnení. Na obrázku 6 – 1 je vyobrazený kontajnment pre demonštračnú jednotku GFR vypracovaný spoločnosťou VUJE, a.s. Primárny okruh v ochrannej oceľovej obálke je umiestnený pod úrovňou zemského povrchu v zúženej časti kontajnementu. Pod ním sa v zobrazenom návrhu nachádza iba betónová základná platňa. Železobetónová časť kontajnementu nad povrchom zeme pripomína klasické kontajnmenty dnešných jadrových elektrární s LWR a má rovnakú funkciu.



Obrázok 6-6-1 Kontajment demonštračnej jednotky GFR [23]

Zvolenie koncepcie lapača taveniny predstavuje zohľadnenie maximálneho množstva taveniny, ktoré je nutné pri naplnení scenára ťažkej havárie stabilizovať a priestorového rozloženia ostatných komponentov v kontajmente. Rozľahlý kontajment EPR umožňuje umiestniť komoru pre stabilizáciu taveniny mimo priestor priamo pod tlakovou nádobou reaktora, čo so sebou nesie rôzne výhody. Avšak pri súčasnom koncepčnom návrhu kontajmentu demonštračnej jednotky GFR takéto umiestnenie nie je možné. Zúžená spodná časť kontajmentu presne vymedzuje priestor pre umiestnenie systému stabilizácie taveniny a to bezprostredne pod primárnym okruhom.

Súčasný stav návrhu demonštračnej jednotky GFR a jej kontajmentu zahŕňa iba predbežné hodnoty rozmerov jednotlivých komponentov, prípadne fundované odhady. Detailný návrh doposiaľ nebol vypracovaný. Súbor týchto rozmerov, ktoré ovplyvnia dimenzionálny návrh lapača taveniny uvádza tabuľka 6 – 1. Veľkosť dostupného priestoru pod oceľovou ochrannou obálkou bude musieť byť prispôbený použitému konceptu lapaču taveniny.

Veličina	Rozmer [jednotka]
Vnútorý priemer zúženej časti kontajmentu	24 [m]
Vnútorý priemer ochrannej oceľovej obálky	17 [m]
Vonkajší priemer tlakovej nádoby reaktora	3,4 [m]

Tabuľka 6-1 Hlavné rozmery ovplyvňujúce lapač taveniny [26]

6.1.2 SCHOPNOSŤ ZACHYTIŤ KÓRIUM

Hlavnou úlohou lapača taveniny je zabrániť nekontrolovanému šíreniu taveniny po kontajmente a jej prípadnému pretaveniu mimo priestory kontajmentu. Preto musí byť lapač taveniny navrhnutý tak, aby pojal všetku taveniny unikajúcu z tlakovej nádoby reaktora pri akomkoľvek scenári.

Táto úloha je obzvlášť náročná pri scenároch ťažkej havárie, po ktorých nasleduje únik kória z tlakovej nádoby reaktora pod vysokým tlakom (výtrisk). Značná časť kória môže byť v tomto prípade vysokou rýchlosťou vypudená z tlakovej nádoby reaktora aj iným smerom ako priamo nadol. V prípade, že nie sú prijaté konštrukčné opatrenia, ktoré zohľadňujú aj túto možnosť úniku kória, je schopnosť lapača taveniny zachytiť kórium značne limitovaná.

Pri scenároch s nízkotlakým únikom kória je cesta jeho úniku jednoduchšie predvídateľná, keďže hnacou silou tohto procesu je najmä gravitácia. Kórium vytečie jedným alebo viacerými prúdmi z tlakovej nádoby reaktora (lokálne porušenie tlakovej nádoby reaktora pri nízkom tlaku) alebo dôjde k odpadnutiu celej spodnej časti tlakovej nádoby reaktora spolu s akumulovaným kóriom.

Hlavné zaťaženie počas úniku a kolekcie kória v lapači taveniny predstavuje tepelný šok štruktúr vystavených tepelnému toku z taveniny a mechanické zaťaženie spojené napríklad s rázovým odpadnutím celej spodnej časti tlakovej nádoby reaktora. Vystavenie priamemu kontaktu s kóriom štruktúr iných, ako na to určených by znamenalo ich okamžitú tepelnú a chemickú degradáciu. Pri návrhu lapača taveniny je potrebné zohľadniť všetky tieto skutočnosti.

6.1.3 UCHOVANIE A CHLADENIE KÓRIA

Kórium úspešne zachytené v lapači taveniny musí byť naďalej kontrolované a postupne stabilizované v tomto zariadení. Z tohto pohľadu je lapač taveniny akási bariéra, ktorá musí byť pripravená odolať pôsobeniu kória. Konkrétny spôsob zaťaženia jeho štruktúr a teda aj návrh zariadenia závisí opäť na predchádzajúcom scenári (zostatkový výkon, objemová hustota tepelného výkonu, zloženie taveniny a pod.).

Schopnosť finálnej stabilizácie kória prakticky vyjadruje schopnosť lapača taveniny odolať pôsobeniu kória a zároveň efektívne odvádzať tepelný výkon produkovaný rozpadom nestabilných jadier. Toto zabezpečí zabránenie postupu kória a prípadnému narušeniu integrity kontajnementu alebo poškodeniu iných dôležitých vnútrokontajnementových štruktúr. Jedným z hlavných problémov určujúcich návrh lapača taveniny je udržanie tepelného toku z taveniny cez štruktúry lapača taveniny do chladiaceho média na úrovni, ktorá nespôsobí vystúpenie teplôt štruktúr lapača taveniny na hodnoty počiatku tepelnej degradácie materiálu. To je dosiahnuté nariadením kória obetným materiálom a jeho chladením cez chladiaci systém lapača taveniny. V prípade, že je možné zvoliť koncepciu lapača taveniny bez navrhovaného chladiaceho systému je tepelný tok odvádzaný kondukciou a radiáciou do okolitých, na to určených a dostatočnú tepelnú kapacitu poskytujúcich štruktúr.

Hlavnou úlohou je nájsť a navrhnuť systém, ktorý umožní efektívne chladiť kórium uniknuté z tlakovej nádoby reaktora pri udržaní prijateľnej ceny zariadenia.

6.1.4 NUKLEÁRNE KRITÉRIUM

Je nevyhnutné udržať taveninu v podkritickom stave za všetkých situácií, t. j. aj pri rozvrstvení. Pri tavenine uniknutej z LWR nehrozí obnovenie kritickosti po narušení geometrie aktívnej zóny. Avšak kvôli relatívne vysokému obohateniu paliva v GFR je potrebné overiť toto riziko aj pre tento typ reaktora. Po vylúčení obnovenia kritickosti nie je potrebné zakomponovať do obetného materiálu prvky absorbujúce neutróny. V opačnom prípade, tzn. obnovenie kritickosti aj po narušení pôvodnej geometrie

aktívnej zóny je potrebné tento problém riešiť, napríklad vrstvou materiálu absorbujúceho neutróny na dne tlakovej nádoby reaktora, ktorý sa v prípade roztavenia aktívnej zóny okamžite pridá do taveniny a zabezpečí jej opätovnú podkritickosť.

Ďalej je žiadúce, aby bola rádio - kontaminácia ostatných komponentov kontajneru a výskyt plyných rádioaktívnych prvkov v priestore kontajneru čo najnižší. Z tohto dôvodu je potrebné navrhnuť systém stabilizácie taveniny až na jej konečné stuhnutie a v čo najkratšom časovom úseku vytvoriť povrchovú škrupinu, ktorá zabráni úniku plynov z taveniny. Táto požiadavka je však očividne do istej miery podradená základnej funkčnosti lapača taveniny – stabilizovať taveninu za akýchkoľvek podmienok, kedy časový okamžik dosiahnutia tohto stavu nie je prvoradý.

6.1.5 SPOĽAHLIVOSŤ

Ako posledná úroveň zabránenia šíreniu rádioaktivity do životného prostredia, sú na lapač taveniny kladené veľké požiadavky na spoľahlivosť. Je vyžadovaná úplná nezávislosť zachovania plnej funkčnosti pri výpadku napájania – pasívne fungovanie. Tak isto musí lapač taveniny bez akéhokoľvek narušenia funkčnosti (tzn. aj systémy chladenia a pod.) vydržať všetky možné scenáre ťažkej havárie aj udalosti jej predchádzajúce (zemetrasenie, výbuch, ejakcia taveniny pod vysokým tlakom a pod.). Toto je možné dosiahnuť dvoma základnými prístupmi, a to opatreniami, ktoré zabránia najnáročnejším udalostiam, napr. úmyselné odtlakovanie primárneho okruhu v prípade tavenia aktívnej zóny. Druhý prístup spočíva v prijatí konštrukčných opatrení pre zvládnutie podobných situácií.

6.2 FYZIKÁLNE PRINCÍPY STABILIZÁCIE TAVENINY GFR

Väčšina v súčasnosti stavaných a projektovaných atómových elektrární majú aktívnu zónu s veľkým tepelným výkonom. Hlavným dôvodom je ekonomickosť takéhoto prístupu. Logicky, v prípade ťažkej havárie je potrebné stabilizovať veľké množstvá roztaveného paliva a ostatných materiálov, ktoré podľahli degradácii. Výnimku tvoria experimentálne reaktory a jednotky stavané za účelom overenia danej technológie – demonštračné reaktory. To je prípad aj demonštračnej jednotky GFR. Nároky kladené na lapač taveniny pre reaktor o výkone 75 MWt možno považovať za úmerne zmenšené nárokom kladené na reaktor rovnakej koncepcie a konštrukcie s väčším výkonom. To je možné s výhodou využiť pri dimenzovaní a prvotnom návrhu nového, doposiaľ nenavrhovaného lapača taveniny pre GFR. Na rozdiel od lapačov taveniny navrhovaných pre reaktory chladené tekutými kovmi, ktorých koncepcia je diametrálne odlišná od odhadov možného prevedenia lapača taveniny pre GFR, tie navrhované a aplikované pre LWR sú koncepčne bližšie. Táto skutočnosť bola využitá pri zostavovaní nadchádzajúcej časti práce, kde sú zhrnuté fyzikálne princípy, ktoré sú využité pre stabilizáciu taveniny v lapači taveniny pre demonštračnú jednotku GFR.

6.2.1 VŠEOBECNÝ PRÍSTUP

Geometria reaktorovej šachty

Problematika stabilizácie taveniny v závislosti od zvolenej koncepcie reaktorovej šachty je predmetom množstva skúmaní. Výsledky ukazujú, že schopnosť efektívne zhromaždiť a dlhodobo stabilizovať kórium silne závisí aj na geometrii reaktorovej šachty. Tá musí v prípade pretavenia tlakovej nádoby reaktora umožňovať hladký prechod kória do

priestorov na to určených. Nesmie pritom dôjsť k narušeniu konštrukcie kontajnementu alebo iných štruktúr potrebných pre zaistenie bezpečnosti aj po ťažkej havárii a podobne.

Minimalizácia uvoľnenia rádionuklidov

Jednou z požadovaných funkcií lapača taveniny, je zabrániť šíreniu rádionuklidov mimo priestor kontajnementu a minimalizovať množstvo aktivovaného materiálu vnútri kontajnementu. Zároveň je potrebné zabezpečenie jednoduchej dekontaminácie v prípade naplnenia hypotetického scenáru ťažkej havárie reaktora.

Jedným z možných spôsobov minimalizácie úniku rádionuklidov mimo samotnú taveninu je jej prudké schladenie na hraničnú teplotu T_h cca 2300°C (v závislosti od zloženia taveniny obsahujúcej rádionuklidy). Prudkým ochladením taveniny pod túto teplotu spôsobí vytvorenie škrupiny na povrchu taveniny. Toto využívajú takzvané mokré koncepty lapača taveniny, čo je jednou z ich hlavných výhod.

Pasívne princípy

Väčšina spúšťacích mechanizmov systémov stabilizácie taveniny musí byť podnietená signálom. Pre vyhovenie bezpečnostným štandardom moderných jadrových reaktorov štvrtej generácie sú vyžadované systémy, ktoré pracujú výhradne pasívne – k svojej funkčnosti nepotrebujú zdroj elektrickej energie. Splnením kritéria úplnej pasívnosti sa vyznačujú takzvané suché koncepty lapača taveniny. Využívajú fyzikálne princípy umožňujúce efektívne chladenie taveniny bez potreby zdroja vody.

Jedným z princípom uplatnených v suchých konceptoch lapača taveniny je roztečenie kória po veľkej, na to určenej ploche. Týmto sa dosiahne zvýšenie teplovýmennej plochy taveniny a zmenší sa hrúbka jej vrstvy. Takto je možné efektívne odvieť teplo kondukciou a radiáciou do štruktúr kontajnementu. Avšak, pri tomto koncepte hrozí riziko narušenia podporných štruktúr kontajnementu a ohrozenie jeho funkčnosti.

Druhým princípom je nariadenie kória veľkou masou obetného materiálu pripraveného vo vrstvách v priestore pod tlakovou nádobou reaktora. Toto zabezpečí zníženie objemovej hustoty zostatkového výkonu hmoty na úroveň, že generované teplo môže byť odvedené tak, ako je popísané vyššie – cez kondukciu a/alebo radiáciu do štruktúr kontajnementu (tepelných kapacít).

Oba prístupy čisto suchej koncepcie lapača taveniny sú priestorovo veľmi náročné a keďže priestor dostupný v ochrannej budove kontajnementu je výrazne obmedzený a ekonomicky nákladný, koncepty lapačov taveniny využívajúce iba suché princípy stabilizácie taveniny sú prakticky nepoužiteľné.

Relatívne pasívne fungujúce systémy využívajúce nejaký druh chladiaceho systému a nádrže tepelnej kapacity. Tieto systémy obsahujú nádrže teplotnosného média (napr. vody) umožňujúce absorbovať a odvieť generované zostatkové teplo cez chladiaci systém taveniny v dostatočnej miere pre jej konečnú stabilizáciu. Hnacia sila týchto systémov je prednostne čerpaná napríklad z potenciálnej energie gravitačného poľa Zeme (prípadne akumulovaná tlaková energia).

Všeobecná stratégia

Pre dlhodobú bezpečnú prevádzku systémov využívajúcich popísané princípy je potrebné zabezpečiť efektívny odvod tepla akumulovaného v kotajmente. Celkový návrh

kontajnementu musí umožňovať prirodzenú cirkuláciu pary a vody v celom chladiacom systéme lapača taveniny a kontajnementu. Pasívny odvod tepla z kontajnementu je možné dosiahnuť pomocou viacerých systémov. V súčasne prevádzkovaných LWR sú podobné systémy osvedčené v praxi.

Obetný materiál

Obetný materiál v lapačoch taveniny predstavuje termín pre materiál zámerne vystavený pôsobeniu kória uvoľneného z tlakovej nádoby reaktora za účelom vzájomnej interakcie, roztavenia obetného materiálu a teda nariedeniu kória.

Experimenty ukázali, že oxidická a metalická fáza taveniny (palivo a oceľ) sú vždy oddelené, či už pri samotnom procese tavenia, alebo v samotnom lapači taveniny. Podobne aj štiepne produkty, ktorých radiačný rozpad je zdrojom zostatkového výkonu kória, sú na základe ich chemického správania rozložené v oxidickej a metalickej fáze kória. To spôsobí rozdelenie zostatkového tepelného výkonu na cca 50% v oxidickej časti taveniny, 30% v metalickej a 20% v plynných produktoch. [34]

Počas dočasného zadržania kória dôjde vďaka radiačnému prenosu tepla k roztaveniu značnej časti ostatných vnútroreaktorových štruktúr, čo zabezpečí dostatok kovového materiálu pre zriadenie objemového tepelného výkonu metalickej časti taveniny. Z tohto dôvodu je ako dodatočný obetný materiál volená zmes oxidov, pre LWR typicky veľmi blízka bežnému kremičitému betónu. Je potrebné, aby výsledná hustota oxidickej časti taveniny po interakcii s obetným materiálom bola nižšia ako hustota metalickej časti. Tak kovový, vysoko tepelne vodivý materiál klesne na dno lapača taveniny, kde je z neho odvádzané teplo cez chladiaci systém.

Zdroj chladiacej kapacity

Ako zdroj chladiacej vody je všeobecne v LWR reaktoroch používaná voda z bazénu skladovania paliva a zo zbernej nádrže kontajnementu, kde je gravitačnou cestou zachytávaná všetka voda, ktorá sa rôznym spôsobom dostala do priestoru kontajnementu (únik vody pri LOCA, voda zo sprchových systémov, kondenzát vznikajúci pri chladení stien kontajnementu a pod.). V súčasnom štádiu projektu demonštračnej jednotky GFR nie je určené, či sa bude palivo vybrané po kampani z reaktora skladovať a chladiť v bazéne vyhoreného paliva s vodou, ako je tomu pri LWR, bude navrhnutý spôsob plynového chladenia použitého paliva pre jeho suché skladovanie v kontajnemente alebo bude použité palivo skladované mimo priestor kontajnementu. Jediný zdroj chladiacej vody k dispozícii vo vnútri kontajnementu v súčasnom návrhu projektu predstavuje nádrž vody, umiestnená nad úrovňou výmenníkov tepla DHR slučiek – horná nádrž kontajnementu. Táto nádrž je pôvodne určená ako zásobník tepelnej kapacity pre odvod zostatkového tepla z aktívnej zóny. Pre využitie vody v tejto nádrži ako chladiace médium systému chladenia taveniny lapača taveniny je potrebné primerane upraviť jej kapacitu.

Voda v hornej nádrži kontajnementu je počas prevádzky DHR systémov vyparovaná, rovnako tomu bude aj pri chladení taveniny. Z tohto dôvodu je nutné do návrhu kontajnementu zahrnúť kondenzačné systémy a zbernú nádrž kontajnementu, v ktorej sa bude vznikajúci kondenzát zhromažďovať a opäť gravitačne prúdiť do chladiaceho systému lapača taveniny.

6.3 KONCEPČNÝ NÁVRH LAPAČA TAVENINY

Posledným z cieľov práce je vytvoriť koncepčný a dimenzionálny návrh riešenia systému zachytenia a stabilizácie taveniny. Na základe rozboru dostupných metód a princípov používaných pri súčasných lapačoch taveniny LWR bola zvolená koncepcia mokrej stabilizácie. Po pretavení tlakovej nádoby reaktora je kórium zachytené v systéme dočasného zadržania, kde začína interakcia s obetným materiálom a pokračuje žiaduce tavenie vnútroreaktorových komponentov (reflektorové a tieniace kazety) vplyvom radiačného tepelného toku z taveniny. Po pretavení brány dochádza k vyliatiu akumulovanej taveniny do komory určenej pre roztečenie a konečnú stabilizáciu taveniny. Táto komora ma pasívne chladené dno a bočné steny a tiež tu dôjde k zaplaveniu už roztečenej taveniny, čím sa zintenzívni jej chladenie, zabráni sa ďalšiemu radiačnému nahrievaniu štruktúr nad lapačom taveniny a vytvorí sa akási škrupina, ktorá zabráni ďalšiemu šíreniu plyných štiepných produktov.

6.3.1 SYSTÉM DOČASNÉHO ZADRŽANIA

Systém dočasného zadržania kória je tvorený ochrannou oceľovou obálkou, ktorá je pôvodne určená na poskytnutie záložného pretlaku v prípade havárie typu LOCA aby nedošlo k úplnej strate tlaku v primárnom okruhu. Toto opatrenie má za účel znížiť mernú prácu cirkulačných dúchadiel DHR systému a umocniť mieru prirodzenej cirkulácie chladiaceho hélia pre celkové zlepšenie schopnosti chladit' odstavenú aktívnu zónu pri takomto typu havárie. Využitie tohto už navrhovaného bezpečnostného prvku aj pre opatrenia minimalizujúce následky ťažkej havárie zjednodušuje celý koncept a nepridáva na komplexnosti systému, čo je jednou z vedľajších požiadaviek kladených na systém stabilizácie taveniny.

Dno ochrannej oceľovej obálky je voči pôsobeniu kória chránené vrstvou žiaruvzdorného materiálu, pravdepodobne zliatinou volfrámu. Aplikácia žiaruvzdorných materiálov je v priemysle dobre zvládnutá a taktiež boli vykonané experimenty, ktoré potvrdili možnosť takejto aplikácie pri pôsobení kória vznikajúceho v LWR. Táto vrstva má za účel zabrániť poškodeniu steny ochrannej oceľovej obálky na nežiadúcom mieste vplyvom tepelného toku počas interakcie kória s obetným materiálom alebo pôsobeniu vzniknutej taveniny po roztavení obetného materiálu. Bez žiaruvzdornej vrstvy je nechaný kruh okolo osi spodnej hlavy ochrannej oceľovej obálky s priemerom približne 2 m. Tento kruh slúži ako „brána“ pre ďalší postup kória. K postupu kória do komory stabilizácie dôjde jedine v prípade narušenia steny oceľovej obálky a práve táto brána je k tomu určená. Nad žiaruvzdornou vrstvou je umiestnený obetný materiál. Jeho účel je popísaný vyššie v tejto práci. Konkrétne zloženie a množstvo obetného materiálu závisí na viacerých faktoroch, napríklad miera potrebnej objemovej hustoty, ktorá musí byť dosiahnutá pre efektívne chladenie bez narušenia funkcie lapača taveniny, miera podkritickosti taveniny, zastúpenie jednotlivých komponentov kória (oxidy / kovy), potrebná výsledná hustota oxidickej časti aby došlo k žiadanému rozvrstveniu a podobne. Vyriešenie tejto komplexnej úlohy nie je v rozsahu tejto práce. Pre ilustráciu je uvedené typické zloženie obetného materiálu pre LWR v tabuľke 6 – 2. Prípadnou alternatívou s dobrými vlastnosťami potrebnými pre obetný materiál (rozpustenie oxidov paliva, nízka hustota, obsah prvku absorbujúceho neutróny) je tetraboritan sodný ($\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), nazývaný aj borax, ktorý je široko využívaný a relatívne lacný minerál. Vhodnou alternatívou sa javí aj kombinácia kremičitého betónu a boraxu pre využitie kladných vlastností oboch látok.

Bloky obetného materiálu umiestnené po obvode tlakovej nádoby reaktora slúžia pre absorpciu radiačného tepelného toku do horných priestorov ochrannej ocelevej obálky, ktorý by mohol spôsobiť degradáciu ostatných komponentov primárneho okruhu a ich následný pád by znamenal dodatočné namáhanie štruktúr lapača taveniny a ohrozenie jeho plnej funkčnosti.

Komponent	Objemové percento zastúpenia [%]
Al ₂ O ₃	10,7
CaO	13,6
Fe ₂ O ₃	3,21
MgO	1,0
K ₂ O	2,41
SiO ₂	59,0
Na ₂ O	1,89
TiO ₂	0,6
CO ₂	2,31
H ₂ O – voľná voda	5,28

Tabuľka 6-2 Zloženie obetného materiálu typického pre LWR [15]

6.3.2 KOMORA STABILIZÁCIE TAVENINY

Komora stabilizácie taveniny má za účel zachytiť a následne procesom roztečenia a chladenia taveniny ju uviesť do stavu konečnej stabilizácie. Stabilizáciou taveniny je myslený stav, kedy je zabránené jej akémukoľvek ďalšiemu postupu mimo štruktúry lapača taveniny a je zastavené uvoľňovanie štiepných produktov mimo objem taveniny. Toto je dosiahnuté jej úplným stuhnutím.

Tavenina je dodaná do komory stabilizácie taveniny po pretavení brány systému dočasného zadržania, ktorú tvorí kruh spodnej časti ochrannej ocelevej obálky okolo jej axiálnej osi. Tavenina už nariadená obetným materiálom zo systému dočasného zadržania sa začne roztekať po povrchu komory stabilizácie taveniny, ktorý je pokrytý tenkou vrstvou obetného materiálu. Ten má za účel zabrániť narušeniu chladiaceho systému vplyvom veľkých lokálnych tepelných tokov počas procesu roztekania taveniny. Vplyvom nahriatia štruktúr komory stabilizácie sú spustené pasívne ventily, dodávajúce chladiacu vodu do systému chladenia komory stabilizácie.

Komora pre stabilizáciu taveniny má tvar štvorca vpísaného do kruhu podstavy kontajneru. Skosené vrcholy tohto štvorca umožňujú prúdenie chladiacej vody do bočných konštrukcií komory stabilizácie taveniny. Dno a bočné steny komory pre stabilizáciu taveniny sú tvorené chladiacimi elementmi, ktorých popis je nižšie v práci. Bočné štruktúry komory pre stabilizáciu sú upevnené na „I“ podporných nosníkoch tak, aby bolo umožnené prúdenie vody.

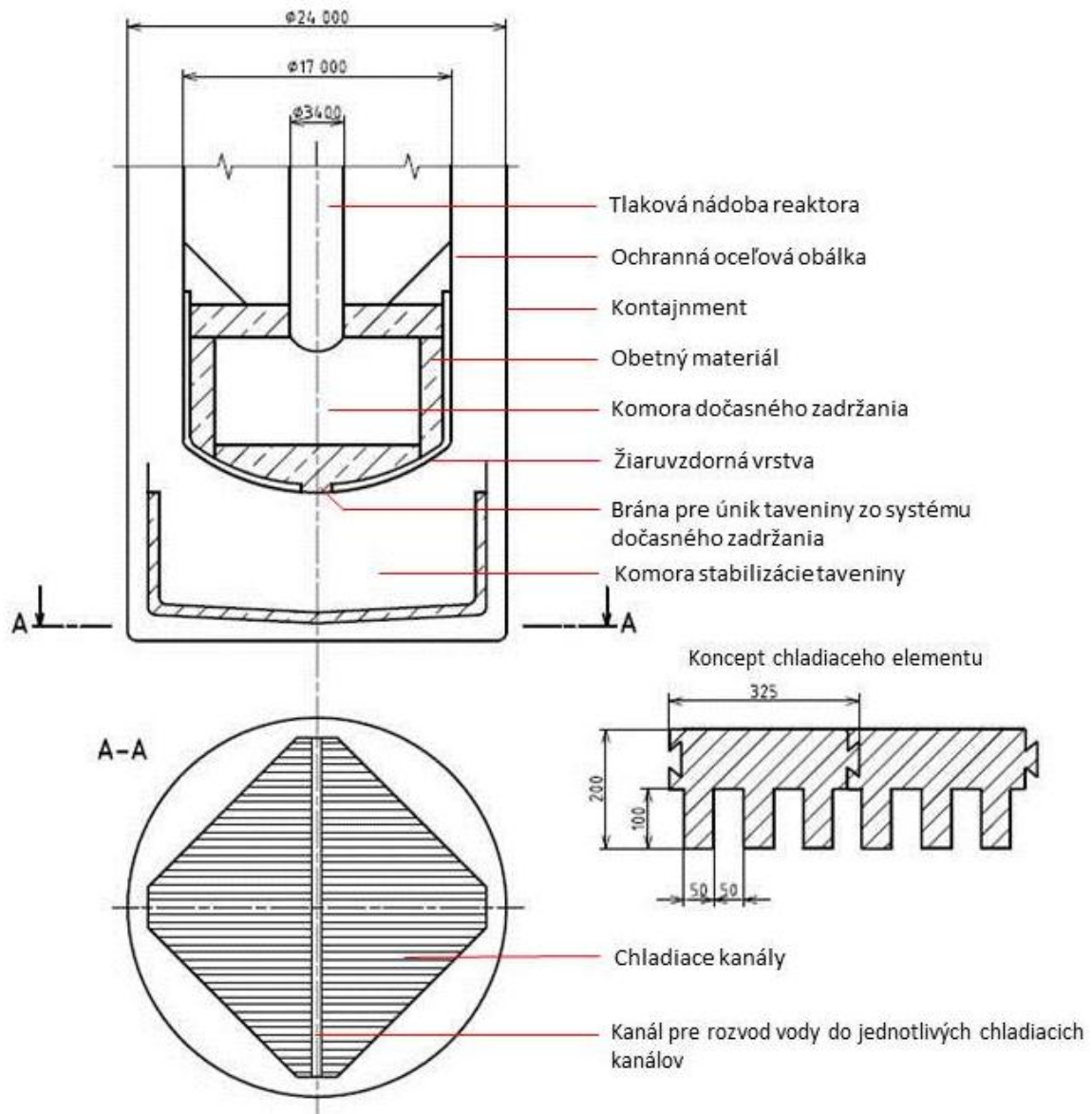
6.3.3 ODVOD TEPLA

Odvod zostatkového tepelného výkonu z taveniny sa deje dvomi spôsobmi súčasne: cez systém chladiacich kanálov tvoriacich dno a bočné steny lapača taveniny a z povrchu taveniny cez var vody, ktorá ju zaplaví. Chladiaca voda je privádzaná gravitáciou z bazénov v hornej časti kontajneru, pôvodne určených ako zásoba tepelnej kapacity pre DHR systémy a zo zbernej nádrže kontajneru, kde je zhromažďovaný kondenzát chladiacej vody vznikajúci na stenách kontajneru, prípadne iná voda uvoľnená v kontajneru (sprchové systémy a podobne). Voda je privádzaná do rozvodného kanála

podstavy lapača taveniny, odkiaľ je hydrostatickým tlakom vtlačaná do chladiacich kanálov, ktoré sú tvorené chladiacimi elementmi (obrázok 6 - 2). Dno, nie je vodorovné, ale kanály, ktoré ho tvoria sú pri strednom rozvodnom kanály najplytšie a pri okrajoch podstavy najhlbšie. Toto skosenie zabezpečí efektívny odvod pary, ktorá je tvorená vplyvom intenzívneho tepelného toku. Je tak zabránené vytvoreniu parného vankúša. Koeficient prestupu tepla by v tomto prípade prudko poklesol a mohol by spôsobiť lokálne narušenie chladiaceho systému komory stabilizácie taveniny.

Bočné steny komory pre stabilizáciu taveniny sú tiež tvorené chladiacimi elementmi podobnej koncepcie ako tie, ktoré sú na dne. Ich účel je zefektívniť odvod tepla v bočných stenách komory stabilizácie, tvoria priestor pre odvod pary zo spodných chladiacich kanálov a zároveň poskytujú cestu vode tlačenej hydrostatickým tlakom, ktorá sa prelieva cez okraj bočnej steny a priamo tak zaplavuje povrch taveniny. Toto výrazne zredukuje radiačný prestup tepla z povrchu taveniny od ostatných štruktúr kontajneru a zabezpečí rýchlejšie vytvorenie škрупiny na povrchu taveniny, čo je definované ako jedna z požiadaviek na zmiernenie uvoľňovania štiepných produktov mimo objem taveniny.

Na obrázku 6 – 2 je zobrazený koncept lapača taveniny pre demonštračnú jednotku GFR, ktorého popis je náplňou tejto kapitoly práce.



Obrázok 6-2 Schéma konceptu lapača taveniny demonštračnej jednotky GFR

7 ZÁVER

Plynom chladený reaktor pracujúci s rýchlym neutrónovým spektrom GFR patrí k atraktívnym konceptom štvrtej generácie reaktorov najmä vďaka možnosti uzatvoriť palivový cyklus a vysokej teplote chladiaceho média na výstupe z aktívnej zóny, ktorá umožňuje relatívne vysokú účinnosť premeny energie, prípadne priemyselné využitie tohto vysoko parametrického tepla. Z dôvodu absencie prevádzkových skúseností s touto technológiou je pred samotnou výstavbou energetického reaktora GFR potrebné vypracovať projekt demonštračnej jednotky tejto technológie. Hlavnými cieľmi demonštračnej jednotky GFR sú overenie héliových technológií a testovanie vysokoteplotne odolného karbidického paliva.

Nároky na bezpečnosť jadrových reaktorov v súčasnosti požadujú prijatie opatrení, ktoré zamedzia úniku rádioaktívnych látok do životného prostredia aj v prípade nadprojektovej havárie. Súčasný stav projektu demonštračnej jednotky GFR nešpecifikuje konečné prevedenie niektorých komponentov, ako je napríklad systém odvodu zostatkového tepla z aktívnej zóny. Z tohto dôvodu nie je možné dostatočne presne určiť konkrétne vstupné parametre taveniny, ktorú má lapač taveniny stabilizovať. S prihliadnutím na tieto skutočnosti bol zvolený lapač taveniny so systémom dočasného zadržania taveniny, ktorý, ako preukázali simulácie ťažkej havárie EPR, vykazuje spoľahlivú činnosť pri širokom spektre vstupných parametrov kória.

Detailný návrh lapača taveniny aktívnej zóny demonštračnej jednotky GFR vyžaduje splnenie jednotlivých medzi krokov. Prvým z nich je úspešný návrh zariadení potrebných pre zabezpečenie prevádzky reaktora a vyriešenie otázky nadradených úrovní bezpečnostných prvkov reaktora. Po určení vstupných dát, ktoré sú potrebné pre podrobné simulácie tavenia aktívnej zóny v prípade ťažkej havárie výpočtovým kódom ako je napríklad MELCOR, nasleduje vykonanie simulácií v tomto programe pre zistenie vstupných dát, ktoré tvoria prvý súbor údajov potrebných pre návrh systému stabilizácie taveniny. Predbežný výpočet a priblíženie problematiky tavenia aktívnej zóny je náplňou 4. kapitoly práce. Druhý súbor potrebných dát pre návrh lapača taveniny bude výsledkom vykonania experimentov, ktoré pomôžu určiť vlastnosti taveniny, ako je popísané v 5. kapitole.

Projekt návrhu, výstavby a následnej úspešnej prevádzky demonštračnej jednotky GFR predstavuje komplexnú výzvu, avšak aj veľkú príležitosť pre krajiny V4. Prípád úspešnej realizácie by znamenal značný impulz pre tuzemský priemysel naprieč celým spektrom oborov, so vznikom zázemia pre profesionálny rast vysokokvalifikovaných odborníkov. Tento projekt so sebou prináša aj nezanedbateľný celosvetový význam pre jadrovú energetiku v podobe rozšírenia spektra jadrových reaktorov s overenou technológiou s potenciálom uzatvorenia palivového cyklu.

8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] GOLDBERG, Stephen a Robert ROSNER. *Nuclear Reactors: Generation to Generation* [online]. 2011 [cit. 2013-06-21]. Dostupné z: <http://www.amacad.org/pdfs/nuclearreactors.pdf>
- [2] THE GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM. *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems* [online]. 2002 [cit. 2013-06-21]. Dostupné z: <http://www.gen-4.org/PDFs/GenIVRoadmap.pdf>
- [3] ROOIJEN, Willem Frederik Geert van. *Improving fuel cycle design and safety characteristics of a gas cooled fast reactor*. Amsterdam: IOS Press, c2006, xii, 144 p. ISBN 978-158-6036-966.
- [4] VAN ROOIJEN, W. F. G. Gas-Cooled Fast Reactor: A Historical Overview and Future Outlook. *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2009, vol. 2009, s. 1-11. DOI: 10.1155/2009/965757. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/stni/2009/965757/>
- [5] STAINSBY, Richard, Karen PEERS, Colin MITCHELL, Christian POETTE, Konstantin MIKITYUK a Joe SOMERS. Gas cooled fast reactor research in Europe: A Historical Overview and Future Outlook. *Nuclear Engineering and Design*. 2011, vol. 241, issue 9, s. 3481-3489. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2011.08.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549311006303>
- [6] STAINSBY, Richard. AMEC. *The Gas-Cooled Fast Reactor: History, Core design and Main Systems*. Knutsford, 2012.
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Status of fast reactor research and technology development*. Vienna, 2012. ISBN 978-920-1306-104.
- [8] BERTRAND, F., C. BASSI, F. BENTIVOGLIO, F. AUDUBERT, C. GUÉNEAU, G. RIMPAULT a C. JOURNEAU. Synthesis of the safety studies carried out on the GFR2400. *Nuclear Engineering and Design*. 2012, vol. 253, s. 161-182. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.08.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549312004256>
- [9] UDALOV, Yuriy, Igor POZNYAK, Petr SÁZAVSKÝ, Monika KISELOVÁ, Jana POSPĚCHOVÁ, Jiří ŠRANK a Tomáš OTCOVSKÝ. Analýza nových řešení pro systém pasivní bezpečnosti jaderných reaktorů typu VVER. *Bezpečnost jadrovej energie*. 2011, č. 7, 206 - 210.
- [10] ZDEBOR, Roman. MIR -1200, projekt nejen pro Českou republiku. *Jaderná energetika*. 2010, č. 1, 78 - 81. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/skodaJS.pdf>
- [11] ZVONAREV, Yu. A., D. F. TSURIKOV, V. L. KOBZAR, A. M. VOLCHEK, N. P. KISELEV, V. F. STRIZHOV, A. S. FILIPPOV a E. V. MOISEENKO. Numerical analysis of core catcher efficiency for VVER-1200. *Physics of Atomic Nuclei*. 2011, vol. 74, issue 13, s. 1845-1853. DOI: 10.1134/S1063778811130084. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1134/S1063778811130084>

- [12] MATAL, Oldřich. *Jaderná zařízení a jejich bezpečnost*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 174 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-80-214-4349-5.
- [13] FISCHER, Manfred. The severe accident mitigation concept and the design measures for core melt retention of the European Pressurized Reactor (EPR). *Nuclear Engineering and Design*. 2004, vol. 230, 1-3, s. 169-180. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2003.11.034. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549303003911>
- [14] FARMER, M.T. ARGONNE NATIONAL LABORATORY. *Melt Spreading Code Assessment, Modifications, and Applications to the EPR Core Catcher Design*. Lemont. 2009.
- [15] HA, Kwang Soon, Hwan Yeol KIM, Jongtae KIM a Jong Hwa PARK. An evaluation of a direct cooling method for the ex-vessel corium stabilization. *Nuclear Engineering and Design*. 2011, vol. 241, issue 12, s. 4737-4744. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2011.03.033. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549311002421>
- [16] STAINSBY, Richard. AMEC. *Progress with the Generation IV Gas Cooled Fast Reactor*. Knutsford, 2012.
- [17] GRIFFITH, George. *Accident Resistant SiC Clad Nuclear Fuel Development*. Idaho National Laboratory, 2011.
- [18] BĚLOVSKÝ, Ladislav. ÚJV ŘEŽ. *Current Status of the Gas Fast Reactor Demonstrator ALLEGRO*. Ljubljana, 2012.
- [19] BARLEON, L., M. DALLE DONNE a S. DORNER. *Temperature and Heat-Flux Distribution in the Molten Core Mass of a GCFR after a Hypothetical Melt-Down Accident*. Karlsruhe, 1972.
- [20] BARLEON, L., M. DALLE DONNE a S. DORNER. *Some Considerations at the Development of a Core Catcher of a Gas Cooled Fast Reactor*. Karlsruhe, 1974.
- [21] DALLE DONNE, M. a S. DORNER. *Problems of core catcher for Gas Cooled Fast Breeder Reactor*. Karlsruhe, 1975.
- [22] DALLE DONNE, M., S. DORNER a G. SCHUMACHER. *Preliminary Design of a Borax Internal Core-Catcher for a Gas Cooled Fast Reactor*. Karlsruhe, 1976.
- [23] VUJE, a.s. [online]. 2011 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.vuje.sk/sk/projekt-allegro>
- [24] MANNAN, S.I., S.c. CHETAL a BHOJE. INDIRA GANDHI CENTRE FOR ATOMIC RESEARCH. *Selection of materials for prototype fast breeder reactor*. Dostupné z: <http://www.igcar.gov.in/igc2004/PFBR.pdf>
- [26] BĚLOVSKÝ, Ladislav. *Projekt demonstračnej jednotky GFR*. Osobná komunikácia. 2014.

- [27] POPOV, S.G., J.J. CARBAJO, V.K. IVANOV a G.L. YODER. *Thermophysical properties of MOX and UO₂ fuels including the effect of irradiation*. Oak Ridge National Laboratory, 2000.
- [28] *Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: a tutorial and collection of data*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2008. ISBN 978-920-1065-087.
- [29] *MatWeb, Your Source for Materials Information* [online]. [cit. 2014-04-21].
Dostupné z:
<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=5edc39d3b0fd44efa9fdd90d049c3737&ckck=1>
- [30] *M.com - The A to Z of Materials* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z:
<http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=75>
- [31] TOULOKIAN, Y.S. *Thermophysical properties of high temperature solid materials*. New York: Macmillan, 1967.
- [32] ALSMEYER, H. et. al. *Molten corium/concrete interaction and corium coolability: a state of the art report*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1995. ISBN 92-827-5228-3.
- [33] RRC KURCHATOV ISTITUTE. *Main Results of the First Phase of MASCA Project*. 2004.
- [34] RRC KURCHATOV ISTITUTE. *Final Report of the First Phase of RASPLAV Project*. 1998.
- [35] ALLELEIN, H.J. a M. BÜRGER. Considerations on ex-vessel corium behavior: Scenarios, MCCI and coolability. *Nuclear Engineering and Design*. 2006, vol. 236, 19-21, s. 2220-2236. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2006.04.030. Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549306003025>

9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

Skratka	Popis
CMC	Ceramic Matrix Composite – kompozit s keramickou matricou
DHR	Decay Heat Removal – odvod zostatkového tepla
EBR	Experimental Breeder Reactor – experimentálny množivý reaktor
ECCS	Emergency Core Cooling System – núdzový systém chladenia aktívnej zóny
EPR	European Pressurized Reactor – európsky tlakovodný reaktor
EU	Európska únia
GBR	Gas Breeder Reactor
GCFR	Gas Cooled Fast Reactor – plynom chladený rýchly reaktor
GFR	Gas – cooled Fast Reactor – plynom chladený rýchly reaktor štvrtej generácie
GIF	Generation IV International Forum – medzinárodné fórum pre štvrtú generáciu jadrových reaktorov
HTR	High Temperature Reactor – vysokoteplotný reaktor
IVR	In Vessel Retention – zadržanie vnútri tlakovej nádoby reaktora
JE	Jadrové elektrárne
LB-LOCA	Large Break Loss of Coolant Accident – nehoda spojená so stratou chladiva primárneho okruhu veľkou prasklinou
LFR	Lead – cooled Fast Reactor – olovom chladený rýchly reaktor
LMFBR	Liquid Metal Fast Breeder Reactor- rýchly množivý reaktor chladený tekutým kovom
LOCA	Loss of Coolant Accident – nehoda spojená so stratou chladivaprimárneho okruhu
LWR	Light Water Reactor – ľahkovodný reaktor
MOX	Mixed Oxide Fuel – palivo zo zmesi oxidov
MSR	Molten Salt Reactor – reaktor s roztavenými soľami
n	Neutrón
PCRV	Prestressed Concrete Reactor Vessel – reaktorová nádoba z predopnutého betónu
SCWR	Supercritical-Water-Cooled Reactor – nadkritickou vodou chladený a moderovaný reaktor
SFR	Sodium – cooled Fast Reactor – reaktor chladený sodíkom
TMI	Tree Mile Island
TNR	tlaková nádoba reaktora
VHTR	Very High Temperature Reactor – veľmi vysokoteplotný reaktor
VVER	Vodo-vod'anoj energetičeskij reaktor – tlakovodný reaktor východnej koncepcie
ZEP	Zóna pre expanziu plynu

Značka	Jednotka	Popis
a_{hex}	m	Vnútna vzdialenosť dvoch protiľahlých strán šesťuholníka
c_p		Merná tepelná kapacita
ΔH	J	Rozdiel entalpie
Δh	J/kg	Rozdiel mernej entalpie
Δh_{fus}	J/kg	Merné skupenské teplo topenia
E_a	K	Aktivačná energia podelená Boltzmanovou konštantou
h	m	Výška
m	kg	Hmotnosť
p		Pórovitosť
\dot{p}	MWt	Tepelný výkon
Q	J	Teplo
ρ	kg/m ³	Hustota
t	s	Čas
T	K	Teplota
θ	K	Einsteinova teplota
v		Objemové zastúpenie
y		Molárne zastúpenie

10 ZOZNAM POUŽITÝCH INDEXOV

Index	Význam
I	Prvý uvažovaný rozsah roztavenia
II	Druhý uvažovaný rozsah roztavenia
in	Vnútorný
L	Liquidus
out	Vonkajší
pel	Peleta
pok	Pokrytie
pp	Palivový prútik
pvp	Palivo v palivovom prútiku
S	Solidus
ss	Nehrdzavejúca oceľ
THs	Teoretická hustota tuhej látky
wrap	Obálka kazety