



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

TLAKOVÉ NÁDOBY TLAKOVODNÍCH REAKTORŮ PRESSURE VESSELS PRESSURIZED WATER REACTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RADOVAN HORVÁTH

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. LADISLAV SUK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student (ka): Radovan Horváth

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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 bakalářské práce:

Tlakové nádoby tlakovodních reaktorů

v anglickém jazyce:

Pressure vessels pressurized water reactors

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Seznámení se s problematikou tlakových nádob reaktorů. Vypracování rešerše shrnující konstrukční řešení tlakových nádob reaktorů. Seznámení se s konstrukčním prostředím CATIA a vytvoření 3D modelu Reaktoru

Cíle bakalářské práce:

- 1) Zpracovat rešerši o jednotlivých konstrukčních řešeních tlakové nádoby reaktoru.
- 2) Tvorba 3D modelu reaktoru

Seznam odborné literatury:

- 1) Matal, O.: Jaderná zařízení a jejich bezpečnost, CERN, 2011
- 2) Bečvář, J.: Jaderné elektrárny, SNTL, 1981
- 3) Matal, O.: Konstrukční cvičení (vybrané komponenty jaderně energetických zařízení)
- 4) Dokumentace ETE
- 5) Dokumentace EDU

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Suk

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 19.11.2013

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je vypracování rešerše na téma *tlakové nádoby tlakovodních reaktorů*. Dále provést přehled jednotlivých konstrukčních řešeních tlakové nádoby tlakovodního reaktoru. Práce je rozdělena do 5 kapitol, obsahuje 1 tabulku, 9 obrázků. Teoretická část je věnována historii jaderné energetiky a samotného vývoje ve světě. Dále jsou popsány jednotlivá rozdělení jadrových reaktorů. Závěr teoretické části je tvořen detailním popisem tlakové nádoby a samotného tlakovodního reaktoru. V praktické části byla vytvořena konstrukce 3D modelu sestavy a jeho úprava v programu Catia V5. Celkový model je složen z hlavní sestavy, a to těla reaktoru a podsestav, které byly postupně dosazovány.

Klíčová slova

tlakovodní reaktor, konstrukce, tlaková nádoba, materiály, koncepce, konfigurace

Abstract

The aim of this bachelor thesis is the development of research on the topic of the pressure vessels of pressurized water reactors. Next is to outline the various design solutions of pressure vessels of pressurized water reactor. The thesis is divided into five chapters, contains 1 chart and 7 graphics. The theoretical part is dedicated to the history of nuclear energy and the development itself in the world. The description of the classifications of nuclear reactors is also included in the theoretical part. Summary of the theoretical part consists of a detailed description of the pressure vessel and pressurized water reactor itself. Practical part of this thesis contains the design of 3D assembly model and its modification in the program Catia V5. The overall model is composed of a main assembly, namely the body of the reactor and sub-assemblies, which were gradually installed.

Key words

pressurized water reactor, construction, pressure vessel, materials, conception, configuration

Bibliografická citace

HORVÁTH, R. *Tlakové nádoby tlakovodních reaktorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 34 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Suk.

Prohlášení autora o původnosti práce

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci na téma: *Tlakové nádoby tlakovodních reaktorů* zpracoval samostatně. Veškeré prameny a zdroje informací, které jsem použil k sepsání této práce, jsou uvedeny v seznamu použitých pramenů a literatury.

Jméno a příjmení: Radovan Horváth

Podpis:

V Brně dne:

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Ladislavovi Sukovi za cenné rady a pomoc při tvorbě bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své přítelkyni a rodině za podporu během celého studia.

Obsah

Úvod.....	10
1. História jadrovej energetiky vo svete.....	11
1.1 Začiatok vzniku jadrovej energetiky.....	11
1.2 Obdobie po druhej svetovej vojne.....	12
1.3 Jadrová energetika v dnešnom svete.....	13
2. Základné rozdelenie jadrových reaktorov.....	14
2.1 Základné kritériá rozdelenia jadrových reaktorov.....	14
2.2 Evolúcia jadrových reaktorov.....	16
3. Reaktory chladené vodou.....	17
3.1 Tlakovodné reaktory.....	17
3.2 Základná konfigurácia tlakovodných reaktorov.....	19
3.2.1 Západná koncepcia reaktoru PWR.....	19
3.2.2 Východná koncepcia reaktoru VVER.....	21
3.2.3 Porovnanie tlakových nádob.....	22
4. Konštrukčné materiály používané v jadrovej energetike.....	26
4.1 Ocele pre tlakové nádoby.....	26
4.2 Výroba tlakových nádob.....	27
5. Konštrukcia tlakovodného reaktoru VVER-1000.....	27
5.2 Tlaková nádoba.....	28
5.3 Veko tlakovej nádoby.....	29
5.4 Horný blok.....	29
5.5 Šachta.....	30
5.6 Bočný plášť aktívnej zóny.....	31
6. Záver.....	32
7. Zoznam použitých zdrojov.....	33

Úvod

Je všeobecne známe, že základným faktorom určujúcim rozvoj spoločnosti je vytvorenie a využitie zdrojov energie. Získavanie, premena a zachovanie energie sú základné procesy skúmané fyzikou. Rast spotreby energie kladie obrovské nároky na energetické zdroje a dopyt častokrát prekračuje ponuku.

Elektrickú energiu je možné pokryť z obnoviteľných a neobnoviteľných zdrojov. Medzi klasické zdroje možno v súčasnej dobe zaradiť ropu, zemný plyn, uhlie, bridlice, energiu z prírodnej cirkulácie vody (vodné elektrárne), energiu slnečného žiarenia, geotermálnu energiu a energiu prílivu a odlivu. Avšak najväčší vplyv na svetovú energetickú bilanciu majú len uhlie, ropa, zemný plyn.

V dnešnej dobe sú zásoby klasických palív obrovským tempom vyčerpávané a pohľad do budúcnosti nie je nijako optimistický. Obnoviteľné zdroje majú nízku výkonovú hustotu a ich využívanie je obmedzené na menšie energetické jednotky. Predpokladá sa, že ich podiel na celkovej spotrebe energie bude asi 5 % až 10 %. Jediným riešením tejto komplikovanej situácie vo svete môže byť využitie energie z jadrových reakcií, a to buď jadrovým štiepením alebo jadrovej syntézy.

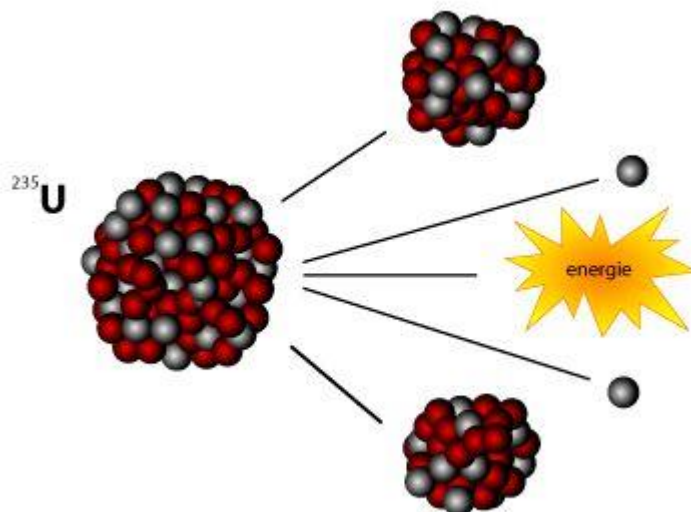
V jadrovom reaktore sa uvoľní z každého gramu úplne rozštiepenej látky, tvorenej buď izotopom uránu (^{235}U) alebo izotopom plutónia (^{239}Pu) energia vysoká cca 1 MWdeň. Z toho vyplýva, že aj keď štiepenie alebo jadrová syntéza využíva len asi jednu tisícinu energetického ekvivalentu hmoty, na druhej strane energetický výťažok z jednotkovej hmotnosti je asi miliónkrát efektívnejší ako dnešné konvenčné spôsoby získavania energie.

Výber témy mojej záverečnej práce bola skutočnosť, že hoci je téma v súčasnosti veľmi aktuálna, nie je problematika dostatočne popísaná.

1. História jadrovej energetiky vo svete

1.1 Začiatok vzniku jadrovej energetiky

Väčšina svetových odborníkov sa zhoduje, že zrod jadrovej éry nastal objavením štiepnej reakcie nemeckými chemikmi Ottom Hahnom a Fritzom Strassmanom. Tí v roku 1938 ostreľovali vzorky uránu pomalými neutrónmi a našli atómy iného prvku – Bária medzi reakčnými produktmi. Hahn zistil, že získané Bárium je forma Rádia, čím nevznikol nový prvok, ale prebehol rozpad jadra Uránu. Nemecký vedec rozštiepil atóm Uránu na dva približne rovnako ťažké prvky, pričom došlo k emisií väčšieho počtu neutrónov a uvoľnilo sa veľké množstvo energie.[1]



Obr. 1 Štiepenie uránu. [1]

Zásluhou dlhoročného úsilia Američana talianskeho pôvodu Enrica Fermiho a jeho skupiny vedcov sa prišlo na princíp reťazového jadrového štiepenia, a to spustením človekom vytvoreného jadrového reaktoru na svete v Chicagu koncom roka 1942. Bolo to prvé reťazové štiepenie jadier uránu, ktoré sa stalo základom dnešnej jadrovej energetiky.

Objav jadrovej energetiky mal negatívny dopad na spoločnosť počas druhej svetovej vojny, kedy boli nové poznatky zneužitú na vývoj a následnú výrobu prvej atómovej bomby na svete v USA, v júli 1945. O dva mesiace neskôr 6. a 9. augusta 1945, v priebehu poslednej fázy vojny v Pacifiku, Spojené štáty americké (USA) zhodili dve atómové bomby na japonské mestá Hirošimu a Nagasaki. [2]

1.2 Obdobie po druhej svetovej vojne

Vplyv krízy päťdesiatych rokov, politickým usporiadaním sveta a priradenie významu strategickej suroviny ako primárnym zdrojom energie prinútili svetové veľmoci, aby vážne uvažovali s jadrovou energiou ako ďalšou z možností k fosílnym palivám. Vznikali mnohé technológie a projekty, stavali sa a uvádzali do prevádzky rôzne druhy reaktorov. Hlavnou úlohou projektov bolo overovanie prijatých koncepcií, ktoré bude možné použiť pre masové uplatnenie energetických reaktorov. Neskôr sa ukázalo, že pre priemyselné využitie sa hodia iba niektoré typy reaktorov a elektrární. Vôbec prvá jadrová elektráreň bola postavená v ZSSR v meste Obninsk. Do prevádzky bola uvedená 27. júna 1954. Elektráreň slúžila okrem výroby elektriny aj na výrobu izotopov plutónia a realizáciu experimentov. [3]

Americký prezident Dwight Eisenhower v októbri 1953 predložil program „Atómy pre mier“ a usiloval o obmedzenie počtu jadrových zbraní a zároveň vyslovil podporu pre jadrovú energetiku. V Európe sa verejnosti oznamuje v roku 1958 začiatok „atómového veku“ na Svetovej výstave v Bruseli postavením objektu Atómium. Táto udalosť bola považovaná za katalyzátor vývoja európskej jadrovej energetiky, ktorá v tej dobe prekonávala rôzne formy predsudkov voči energii z jadra. [3]

V sedemdesiatych rokoch vznikali problémy ako ropné krízy, komplikované dobývanie a ťaženie uhlia a tie vyústili do značného rozvoja jadrovej energetiky. Svetové veľmoci si uvedomovali, aké možnosti poskytuje toto nové energetické odvetvie priemyslu, zamerané aj na vývoj a výrobu zariadení, komponentov a systémov pre jadrové elektrárne. Absolútnou prioritou sa stala bezpečnosť a to viedlo k rozvoju systémov kvality, diagnostiky a testovania. Týmto sa jadrový priemysel dostal na prvé

miesto v úrovni technológií a bezpečnosti, pred dovtedy bezkonkurenčný letecký priemysel. [3]

1.3 Jadrová energetika v dnešnom svete

V súčasnosti má jadrová energetika za sebou viac ako polstoročnú históriu. Priniesla pre spoločnosť široké možnosti rozvoja vďaka pomerne lacnému, silnému a spoľahlivému zdroju elektrickej energie. Treba povedať ale, že po počiatočnom masovom rozvoji nasledoval čiastočný útlm. Tento útlm bol spôsobený hlavne veľkou kritikou verejnosti po černobyľskej havárii. [3]

Avšak k 1. februáru 2014 bolo v 30 štátoch sveta podľa štatistík WNA (World Nuclear Association – Svetová jadrová asociácia) v prevádzke 434 reaktorov s celkovou inštalovanou kapacitou 374 335 MW_e. Tieto reaktory sa celosvetovo podieľajú na výrobe asi 13 % svetovej elektriny. Vo výstavbe ich je 70 v 14 krajinách, u 173 reaktorov sa výstavba plánuje. Celkovo vo svete sa v budúcnosti predbežne uvažuje o vybudovaní ďalších 310 reaktorov, ktorých výkon by mal dosiahnuť asi 350 000 MW. [4]

2. Základné rozdelenie jadrových reaktorov

Energetické zariadenia možno klasifikovať mnoho spôsobmi, pričom môžeme vychádzať buď z ich fyzikálnych vlastností alebo inžinierskych aspektov. Jadrový reaktor môžeme charakterizovať druhom štiepnej reakcie, na ktorej je založená jeho funkcia. Najdôležitejšou fyzikálnou charakteristikou jadrového reaktora je energia neutrónov, spôsobujúcich štiepenie. Podľa toho delíme reaktory na dve základné skupiny, a to na: [6]

reaktory tepelné (termálne) – energia neutrónov je menšia ako $1,6 \cdot 10^{-20}$ J (0,1 eV)

reaktory nadtepelné (epitermálne) – neutróny s energiami $1,6 \cdot 10^{-19}$ až $1,6 \cdot 10^{-16}$ J (1 až 1000 eV)

2.1 Základné kritériá rozdelenia jadrových reaktorov

Jadrové reaktory môžeme triediť podľa mnohých hľadísk. Medzi dôležité hľadisko patrí schopnosť zúčastniť sa produkcie jadrového paliva alebo spôsob využitia jadrového reaktora. Z konštrukčného hľadiska ide predovšetkým o delenie podľa štyroch základných zložiek: **paliva, moderátoru, chladiva a podľa prevedenia aktívnej zóny**. Niekedy je do rozdelenia zahrnutý aj povlakový materiál. [6]

Detailnejšie rozdelenie jadrových reaktorov je popísané v tabuľke č. 1.

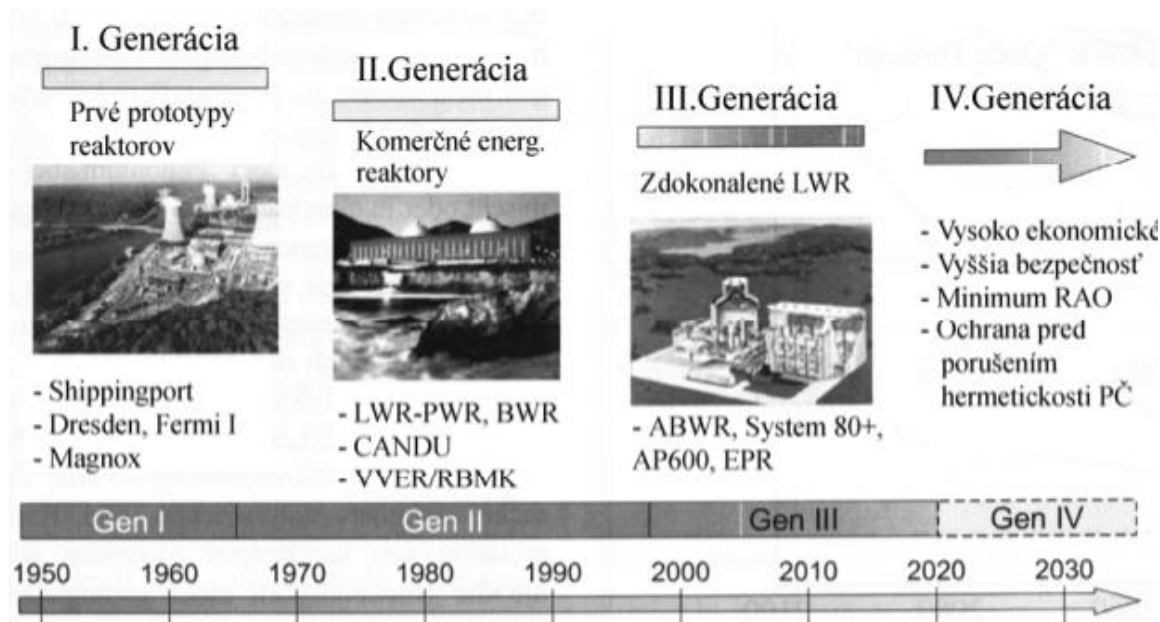
Tlakové nádoby tlakovodných reaktorov

Charakteristika	Druhy
Použitie	školské, výskumné, produkčné, transportné, stacionárne energetické, špeciálne
Použitý druh exoenergetickej jadrovej reakcie	štiepne, termojadrové
Palivový cyklus	burnery, konvertory, pseudobreedery, breedery
Energia neutrónov	tepelné, nadtepelné, rýchle
Usporiadanie aktívnej zóny	homogénne, heterogénne
Počet konštrukčných zložiek aktívnej zóny	trojzložkové, dvojzložkové, jednozložkové
Štiepny materiál	^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , (^{241}Pu)
Množivý materiál	^{232}Th , ^{238}U , (^{240}Pu)
Chemická väzba štiepneho alebo množivého materiálu	kov, oxid, karbid, (nitrid, silicid), fluorid
Moderátor	C, H_2O , D_2O , Be, (BeO), organické zlúčeniny, (izomerické polyfenyly), ZrH_2
Reflektor	C, H_2O , D_2O , Be, (BeO), organické zlúčeniny (izomerické polyfenyly)
Chladivo	CO_2 , N_2 , He, NO_2 , (disociujúce plyny), H_2O , D_2O , organické zlúčeniny (izomerické polyfenyly), roztavené soli (fluoridy LiF, BeF_2 , ZrF_4), tekut kovy (Na, K, Hg)
Konštrukčné usporiadanie reaktora Konceptné usporiadanie chladiacich okruhov	tlaková nádoba, tlakové (kanály) rúrky vonkajšie s chladiacimi slučkami, vnútorné integrované v nádobe reaktora

Tab. 1 [6]

2.2 Evolúcia jadrových reaktorov

Ako možno z nasledujúceho obrázku č. 2 vidieť, mali svoj generačný vývoj.



Obr. 2 Evolúcia jadrových reaktorov. [6]

Z hľadiska vývoja rozdeľujeme energetické jadrové reaktory do nasledujúcich skupín:

- *Prvá generácia:* Prvá generácia jadrových reaktorov bola predstavená v rokoch 1950 – 1970 a boli v nej prototypy reaktorov ako Shippingport, Dresden, Fermi 1 v USA, Obninsk v ZSSR alebo Magnox reaktory v Anglicku. [6]
- *Druhá generácia:* Druhá generácia zahŕňala reaktory komerčného charakteru v rokoch 1970 – 1990 známe ako LWR – ľahkovodné reaktory s obohateným uránom, PWR – tlakovodné reaktory a BWR – varné reaktory. CANDU reaktory, inak známe ako ťažkovodné reaktory, alebo reaktory moderované a chladené ťažkou vodou, boli predstavené v Kanade. V Rusku boli najviac používané reaktory typu VVER-440 a VVER-1000 a varný kanálový RBMK-1000. [6]
- *Tretia generácia:* U tretej generácii začal vývoj v 90-tych rokoch, kedy bol skonštruovaný pokročilý ľahkovodný reaktor (ALWR) a pokročilý varný reaktor (ABWR) a systém 80+. Primárne boli tieto reaktory postavené vo východných ázijských krajinách. Očakávanie je také, že nové typy týchto reaktorov by mali byť postavené v rokoch 2010 – 2030. [6]

- *Štvrtá generácia:* Kým prvé dve generácie jadrových reaktorov produkujú ekonomickú, a verejne prijateľnú elektrinu, nová generácia jadrových reaktorov môže rozšíriť všetky obzory a využitia energie z jadra. Zaradenie štvrtej generácie reaktorov do prevádzky sa plánuje na rok 2030. [6]

Táto generácia by mala spĺňať nasledujúce požiadavky:

- Bezpečnosť;
- Ekonomická výhodnosť;
- Minimálny vplyv na životné prostredie;
- Minimálna produkcia rádioaktívneho odpadu

3.Reaktory chladené vodou

Táto skupina je taktiež zaradená medzi reaktory energetické. Patria sem reaktory chladené jak obyčajnou, ľahkou, tak aj vodou ťažkou. Prevedenie môže byť tlakovodné (PWR) alebo varné (BWR, BHW). Tepelná energia z tlakovodného reaktoru je predávaná v parnom generátore prostredníctvom tlakovej vody primárneho okruhu vode a z nej vyrobenej pary, ktorá poháňa turbínu, na rozdiel od varného reaktoru, kde sa para vyrába priamo v reaktore. [7]

3.1 Tlakovodné reaktory

Tlakovodné reaktory sú reaktory chladené vodou. Nedochádza pri nich k varu vody v aktívnej zóne a obyčajná voda sa používa ako chladivo. Predovšetkým sú to tlakovodné reaktory PWR (pressurized light-water-moderated and cooled reactor) a VVER (Vodo-vodný energetický reaktor). [7]

V súčasnej dobe zaujímajú reaktory typu PWR medzi jadrovými reaktormi výsadné postavenie z hľadiska veľkosti výkonu na jednotku, ale aj čo sa týka počtu prevádzkovaných a objednaných jednotiek. Dlhodobo sú na trhu na popredných priečkach. Nevýhodou tlakovodných reaktorov sú vyššie požiadavky na štiepny materiál, kvôli absorpcii neutrónov v ľahkovodnom chladiči a v konštrukčných materiáloch aktívnej zóny reaktoru. Nezanedbateľná je aj nízka účinnosť tepelného obehu (okolo 30 % až 34 %) daná nízkymi parametrami sýtej sekundárnej pary. [7]

Charakteristika tlakovodného reaktoru: [5]

- použitie obecného paliva vo forme UO_2 ;
- kompaktné usporiadanie aktívnej zóny;
- kompenzácia prebytočnej reaktivity kyselinou boritou;
- riadenie reaktoru absorpčnými tyčami, ktoré sú zasúvané zhora;
- dobrá znalosť tepelných a fyzikálnych vlastností a technológie vody;
- pomerne jednoduchý systém chladenia reaktoru;
- problémy korózie a erózie v primárnom okruhu (rastú s tlakom, teplotou a rýchlosťou vody);
- kampaňový spôsob výmeny paliva pod vrstvou vody;
- vysoká stabilita reaktoru daná veľkou hodnotou záporného teplotného súčiniteľa reaktivity;
- požiadavky na systém zabezpečenia (ochranná obálka).

Tlakovodné reaktory boli vyvinuté v USA, tak isto ako v Európe a v Sovietskom zväze.

3.2 Základná konfigurácia tlakovodných reaktorov

3.2.1 Západná koncepcia reaktoru PWR

Základná koncepcia, ktorá bola prijatá západnými krajinami, sa od spustenia prvej jadrovej elektrárne s reaktormi typu PWR prakticky nezmenila. Vývoj reaktorov PWR sa ustálil v niektorých smeroch, objavuje sa tendencia smerujúca k zväčšeniu bezpečnosti a technologicnosti celého projektu. [7]

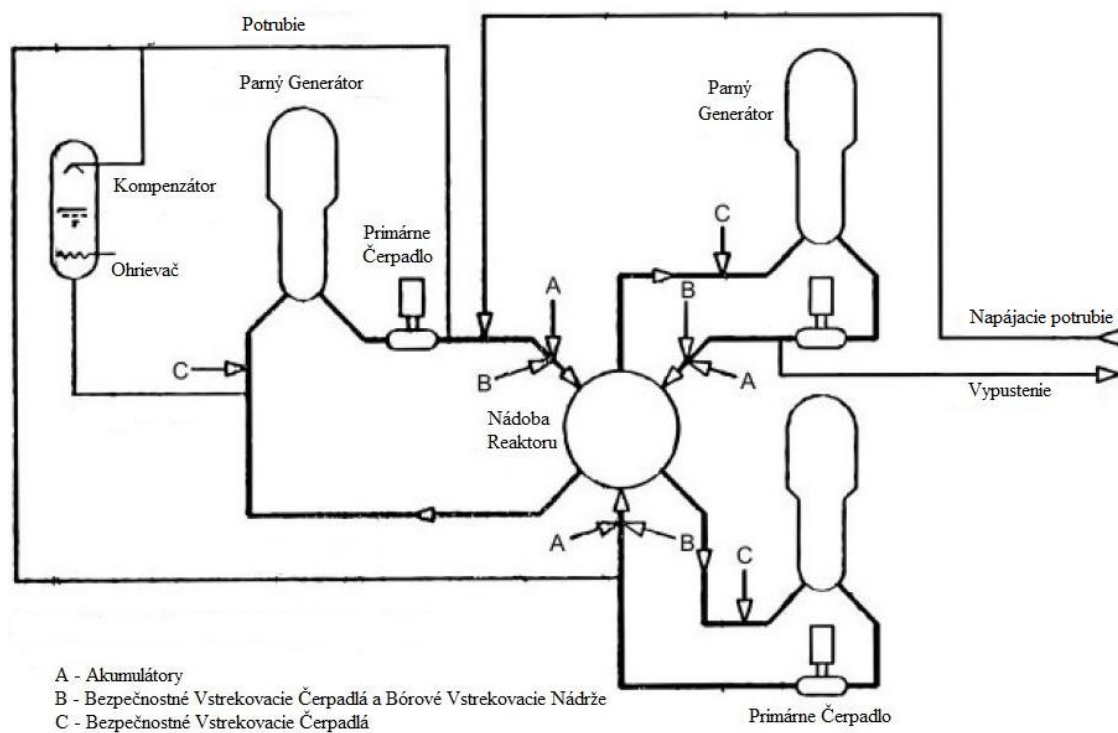
Existujú dva hlavné systémy toku, *primárny systém* a *sekundárny systém*, využívané na transport a premenu tepla. Teplo, ktoré je generované z paliva do podoby elektrickej energie má predovšetkým priemyselné využitie. Primárny systém prevedie teplo z paliva do parného generátoru, kde sa sekundárny systém naštartuje. Para vytvorená v parnom generátore je prevedená sekundárnym systémom do hlavnej turbíny generátoru, kde je energia konvertovaná na elektrinu. Po prechode cez turbínu, para je vedená do hlavného kondenzátora. Studená voda, prechádzajúca cez teplosmenné trubky v kondenzátore z externého zdroja, odstraňuje prebytočné teplo z pary, čo spôsobuje jej kondenzáciu na vonkajšej časti trubiek. Kondenzát je napumpovaný späť do parného generátoru pre opätovné použitie. Systém umožňuje pomerne jednoduché zvyšovanie jednotkového výkonu až na hranicu 1000 – 1300 MW_e.

Primárny systém, taktiež nazývaný chladiaci systém pozostáva z dvoch, troch, alebo štyroch chladiacich smyčiek, ktoré sú pripojené na reaktor. Počet smyčiek sa volí podľa výkonu reaktoru. Každá z nich sa skladá z hlavného obehového čerpadla a vertikálneho prietochného parného generátoru. Tento systém je postavený troma hlavnými dodávateľmi, ktoré pozostávajú z rovnakých komponentov, ale sú usporiadané mierne rozdielnymi spôsobmi. [7]

V systéme sekundárnom, voda je čerpaná do parogenerátorov a prechádza na jeho vonkajšie strany trubiek. Vzniknutá para putuje cez hlavné potrubie do turbíny, ktorá dá následne do pohybu elektrický generátor. Využitá para opúšťa turbínu a kondenzuje v kondenzátore. Vzniknutý kondenzát je potom prečerpaný potrubím cez nízko tlakové ohrievače vody, potom čerpadlami tlačené cez vysokotlakové napájače vody a nakoniec späť do parogenerátoru. Kondenzátor je udržiavaný v podtlaku, s použitím buď vákuového čerpadla, alebo prúdového čerpadla. Chladenie pary je

Tlakové nádoby tlakovodných reaktorov

dosiahnuté za pomoci skondenzovanej chladiacej vody, čerpanej cez kondenzátor, obehovými vodnými čerpadlami, ktoré zabezpečujú prítok vody z externých zdrojov, ako napr. oceán, jazero, rieka, alebo chladiaca veža. [7]



Obr. 3 Prepojenie primárnych okruhov. [7]

3.2.2 Východná koncepcia reaktoru VVER

V roku 1964 bol zapojený prvý tlakovodný reaktor typu VVER (Vodo-vodný energetický reaktor) s výkonom 210 MW v novovoronežskej jadrovej elektrárni, ďalší s elektrickým výkonom 365 MW bol zapojený neskôr. Tieto reaktory patrili medzi reaktory VVER prvej generácie. Ďalším typom reaktorov tejto rady sú reaktory s výkonom 440 MW (reaktory VVER druhej generácie) a konečné reaktory s výkonom 1000 MW (tretia generácia). Tak isto ako vo verziách reaktorov PWR západnej Európy a USA, každý reaktor má primárny chladiaci a sekundárny parný obeh. Prvé jadrové elektrárne s tlakovodnými reaktormi boli vyvinuté Sovietmi v rokoch 1956 až 1970. Tieto elektrárne postupne využívali nasledovné verzie:

- *VVER-210 (Prototyp)* – Novovoronež 1 Rusko (ukončený roku 1984)
- *VVER-365 (Prototyp)* – Novovoronež 2 Rusko (ukončený v roku 1990)
- *VVER-440* – Novovoronež 3 a 4 (prvý štandardizovaný model V230s)
- *VVER-440 Model V230* – používaný v Rusku, Bulharsku, Slovensku a vo východnom Nemecku.

Koncepcia jadrových elektrární typu VVER-440 používa šesť cirkulačných smyčiek, každá smyčka obsahuje horizontálny parný generátor, hlavné obehové čerpadlo a dve hlavné sekčné armatúry. U vyššej výkonovej jednotky VVER-1000 sa znížil počet smyčiek na štyri. V tomto usporiadaní je zväčšený priemer potrubia a príslušné komponenty sú tak isto konštruované na vyšší výkon. Komponenty sa nelíšia koncepčným pojatím, ale sú však vynechané sekčné armatúry. Nevýhodou týchto reaktorov sú vyššie požiadavky na štiepny materiál, dané predovšetkým vysokou absorpciou neutrónov vo vodíku ľahkej vody a v konštrukčných materiáloch aktívnej zóny reaktoru. Ďalšou nevýhodou je nízka účinnosť termodynamického cyklu (okolo 30 – 40 %) daná nízkymi parametrami sekundárnej pary. [7]

3.2.3 Porovnanie tlakových nádob

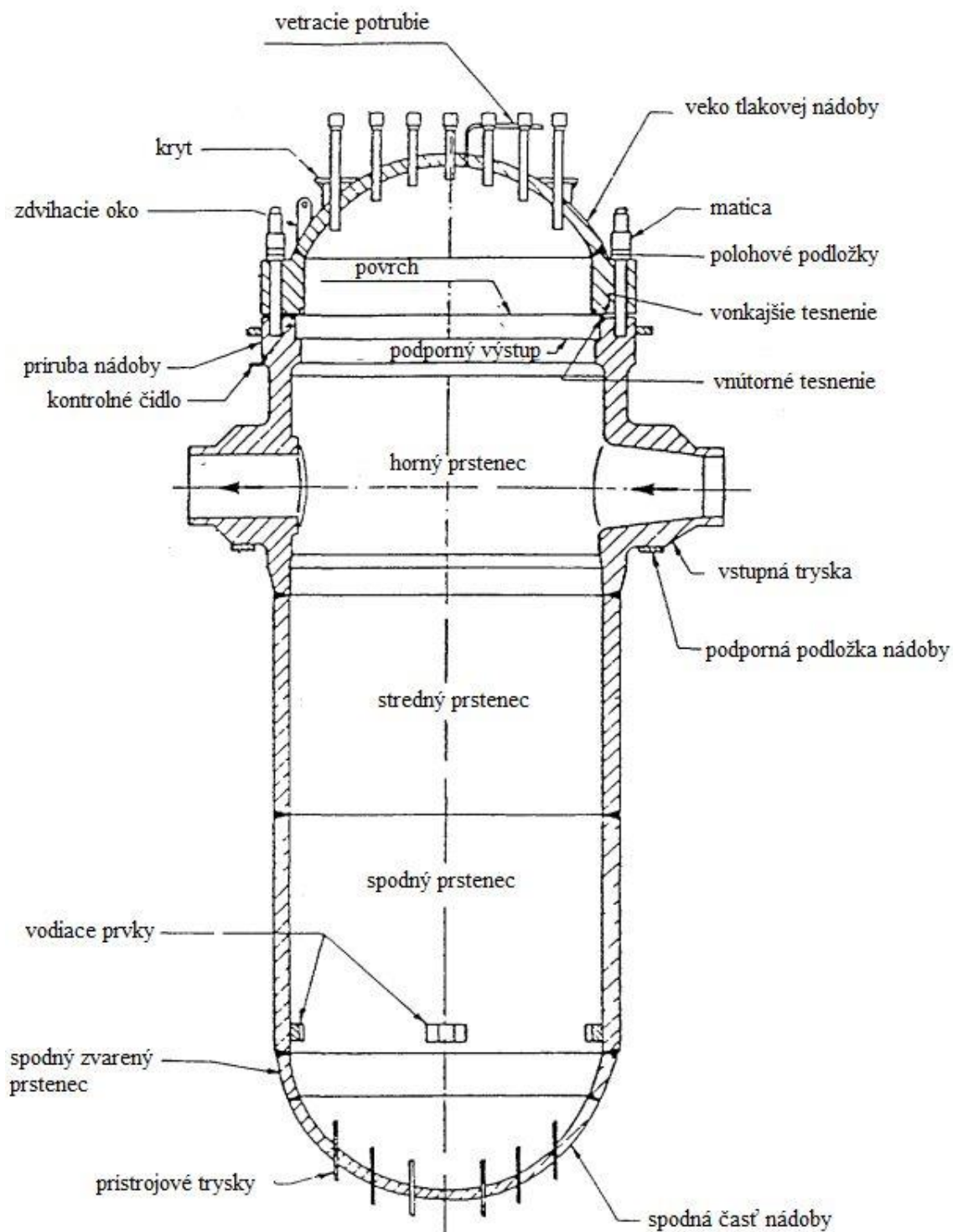
Táto časť obsahuje popis tlakových nádob tlakovodných reaktorov a zahŕňa návrhové prvky, ktoré špecifikujú rozdiely medzi rôznymi komponentami tlakových nádob západnej a východnej koncepcie. Západné typy tlakových nádob PWR boli navrhnuté spoločnosťami ako sú Babcock & Wilcox (B & W) Company, Mitsubishi Heavy Industries, Siemens a pod. Pri tlakových nádobách východnej koncepcie bola sovietska (dnes ruská) firma OKB Gidropress, ktorá bola zároveň hlavným projektantom a vývojárom pre všetky jadrové elektrárne v bývalom Sovietskom zväze. Niektoré malé úpravy boli vykonávané aj v českej spoločnosti ŠKODA. Tlakové nádoby boli vyrábané na troch miestach: Izhorské závody pri Petrohrade (Rusko), v oblasti atómovej elektrárni na rieke Volga (Rusko) a už v spomínanej Českej republike v podniku ŠKODA.

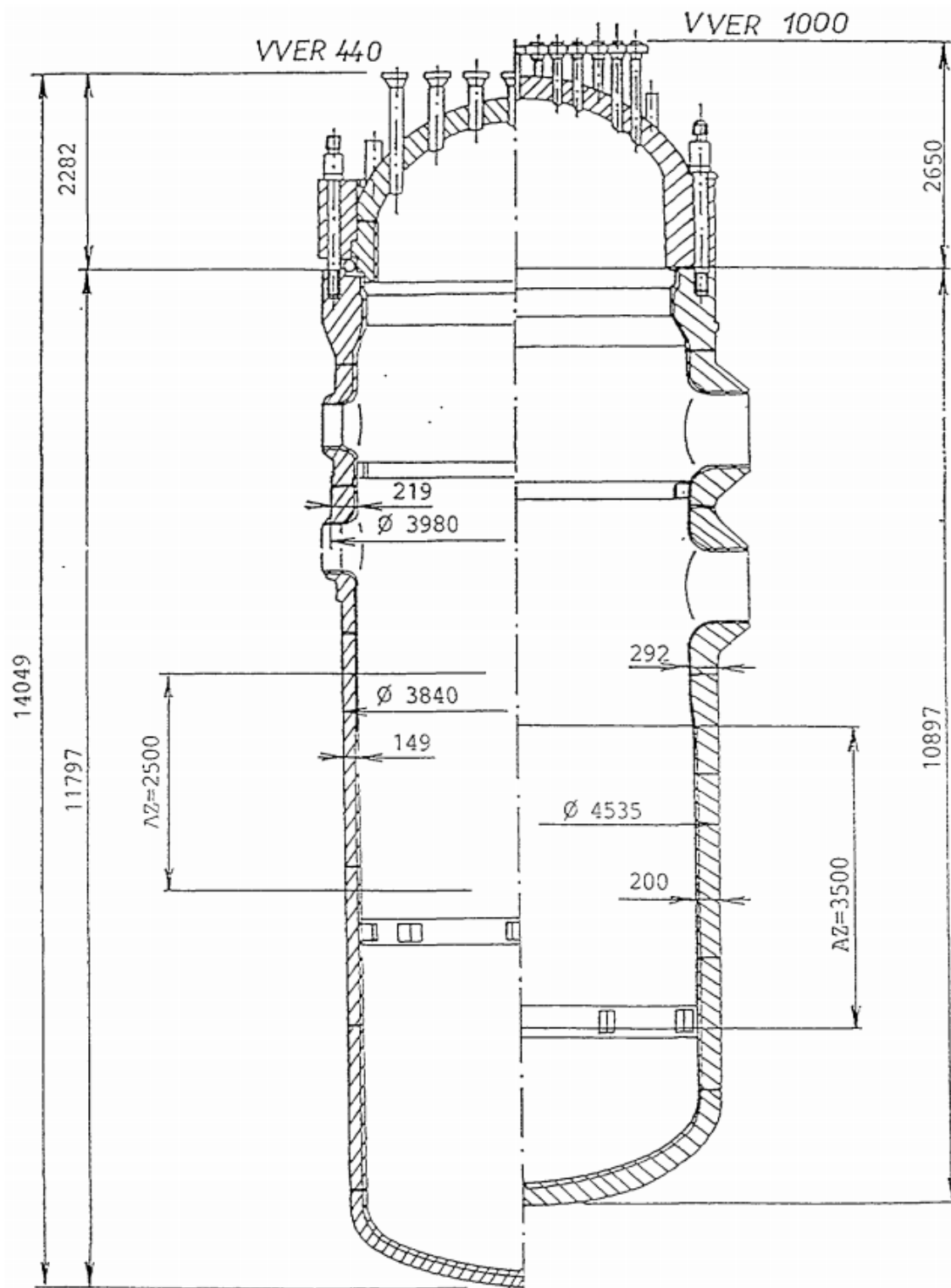
Západnými spoločnosťami navrhnutá tlaková nádoba je zobrazená a popísaná na Obr. 4. Táto nádoba je jednou z typických nádob, používaných v USA. Avšak, je potrebné povedať, že existujú významné rozdiely vo veľkosti, konštrukcii trysiek, návrhov opracovania materiálu a ďalších odlišných prvkov od rôznych dodávateľov.

Tlaková nádoba reaktoru VVER-1000 ako aj VVER-440, ako aj ich komponenty, sa musia dať prepraviť vlakom alebo po ceste. Tieto požiadavky na transport majú veľmi dôležitý vplyv na konštrukciu tlakovej nádoby, ako je napr. menší priemer nádoby, čo má za následok menšiu hrúbku reflektoru pre vodu a tým aj vyšší tok neutrónov na stenu nádoby reaktora obklopujúcu jadro. A preto sú vysoké požiadavky na materiál s vysokou odolnosťou proti krehnutiu voči rádioaktívnemu žiareniu. Takzvaný návar z austenitickej nerezovej ocele, ktorý je privarený na vnútornú časť hornej nádoby oddeľuje chladivo, vstupujúce do nádoby cez vstupné hrdlá z chladiva vystupujúceho cez výstupné hrdlá. Táto konštrukcia má za následok pomerne náhle zmeny axiálnej teploty rozdelenej v nádobe, ale konštantnej teploty okolo obvodu.

[11]

Tlakové nádoby tlakovodných reaktorov

**Obr. 4** Tlaková nádoba reaktoru PWR. [11]



Obr. 5 Porovnanie tlakových nádob reaktorov VVER-1000 a VVER-440. [11]

Ako už bolo spomenuté, použitím výkovkov na výrobu tlakovej nádoby reaktoru a ostatných komponent celého tlakového systému primárneho okruhu sú garantované vysoké hodnoty materiálových vlastností. Za posledné roky bolo tejto oblasti dosiahnutého výrazného pokroku, ktorý optimalizoval návrh a riešenia celého primárneho okruhu.

Predovšetkým bol zmenšený počet zvarových spojov na tlakovej nádobe reaktoru. Týmto sa podstatne zvýšila bezpečnosť zariadenia a taktiež sa znížili výrobné riziká, pretože s klesajúcim počtom zvarov klesá pravdepodobnosť výskytu vád a trhlín vo zváraných spojoch. Pritom sa znižujú nedeštruktívne revízie a kontroly a skracujú sa kontrolné doby.

Ďalšie konštrukčné prvky tlakových oceľových nádob sa odlišuje podľa jednotlivých výrobcov. Usporiadanie hrdiel pre vstup a výstup primárnej vody v jednej rovine je typické pre americké a západoeurópske tlakové nádoby. Pričom hrdlové prstence ruských reaktorov sú riešené tak, že pevnostná kompenzácia plôch otvorov hrdiel v osovom smere prevedená odpovedajúcim zosilnením základnej hrúbky steny. Americké a nové japonské tlakové nádoby majú iba čiastočne zosilnené hrdlové prstence a počítajú s vyťažujúcim účinkom hrdiel, ktoré sú zosilnené a prechádzajú vždy príslušným otvorom v prstenci do nádoby a sú po celej hrúbke steny privarené k nádobe.

Rozdielne je taktiež uloženie nádob. Americké sú uložené na pätkách pripojených k hrdlám a sedia na nich. Napríklad nemecké nádoby sedia na konzolách privarených blízko hrdiel a ruské majú pod spodnými hrdlami dosadací nákrúžok.

Čo sa týka dna nádob tlakovodných reaktorov, PWR reaktory americkej a nemeckej konštrukcie majú dno pologuľové a vyžadujú minimálnu hrúbku steny, nádoby VVER východnej koncepcie sú zakončené dnom eliptickým. [12]

4. Konštrukčné materiály používané v jadrovej energetike

V jadrovej energetike sa od počiatku až doteraz používajú výlučne ocele. Základnými časťami primárneho okruhu, v ktorých sa používajú feritické nelegované alebo nízkolegované ocele sú: tlaková nádoba reaktora (okrem reaktorov s tzv. množivými neutrónmi, pri ktorých sa používa nádoba z ocele austenitickej) a ďalšie tlakové nádoby, akými sú kompenzátor objemu alebo tlakové nádoby havarijnej zásoby kyseliny boritej. [8]

4.1 Ocele pre tlakové nádoby

Ak vezmeme do úvahy historický vývoj, potom ocele pre tlakové nádoby reaktorov môžu byť rozdelené do troch skupín:

1. V prvej skupine sú tzv. ocele prvej generácie. Ich charakter spočíva v tom, že majú nižšiu medzu klzu (do 500 MPa) a je z nich vyrobená najväčšia časť používaných reaktorov. Sú to ocele ASTM A212-B, A302-B. Tieto ocele sa vyznačujú vysokou plasticitou, lomovou húževnatosťou a nízkou tranzitnou teplotou. Nevýhodou nižších pevnostných vlastností majú tlakové nádoby veľkú hmotnosť a veľkú hrúbku steny (do 300 mm).
2. Druhú skupinu tvoria ocele s vysokou medzou klzu, 500 až 900 MPa, ktoré sa používajú už v zušľachtenom stave. Tieto ocele vznikli buď z ocelí používaných v prvej generácii ich modifikovaním takými prísadami, aby sa dali zušľachťovať, alebo celkovým prelegovaním. Medzi takéto ocele druhej skupiny patrí napríklad HY 130, HP 9-4-20 (zušľachtené). Ocele majú vysokú pevnosť, dostatočnú odolnosť voči krehkému porušeniu, dobré plastické vlastnosti a dostatočnú radiačnú stabilitu.
3. Do tretej skupiny patria ocele používané dnes s perspektívnym vývojom do budúcnosti. Používajú sa pri reaktoroch s veľkým výkonom. Sú to ocele s medzou klzu vyše 900 MPa, používané v zušľachtenom stave, s vysokými nárokmi na výrobu a kontrolu. Patria sem napríklad ocele A538 A, A 542. [8]

4.2 Výroba tlakových nádob

So zreteľom na požiadavky malého výskytu chýb, vysokej čistoty, dobrých plastických vlastností a odolnosti voči radiačnému poškodeniu sa väčšina stavieb uskutočňuje v elektrických peciach s následným vákuovaním. Časti reaktorovej nádoby sa vyrábajú ako plechy alebo výkovky. V oboch prípadoch je vyžadované použitie ingotov veľkej hmotnosti (až 300 t), čo spôsobuje nemalé komplikácie pri výrobe. Tlaková nádoba sa skladá z veka, dna a valcovitej časti.

Teleso tlakovej nádoby je vyrobené z legovanej uhlíkovej ocele, na celom vnútornom povrchu je navarená výstelka z austenitickej nerezovej oceli. Nádoba je zložená z prstencov hmotnosti približne 100 t, ktoré sú kované. Vyhrdlovacie prstence sa vyrábajú z ingotov väčšej hmotnosti. Jednotlivé prstence sú zvarané, pričom sa používa zväčša zvarovanie automatické (v zmesi plynov alebo pod tavidlom, prípadne aj elektrostruskové). Ako sme uviedli, na ocel sa kladú vysoké nároky nielen z hľadiska chemického zloženia a čistoty, ale aj obsahu sprievodných (stopových) prvkov, ktoré môžu mať vplyv na radiačnú stabilitu ocele, skrehnutie ocele, zvariteľnosť, ale aj na zvyškovú aktivitu ocele. Ocele musia vykazovať nielen dostatočné pevnostné vlastnosti, a to nielen pri teplote miestnosti, ale aj teploty prevádzkovej (napr. 300 – 350 °C), dostatočnú odolnosť voči krehkému porušeniu, termálnemu krehnutiu, starnutiu, atď. [8]

5 Konštrukcia tlakovodného reaktoru VVER-1000

Jadrový reaktor VVER-1000 sa z konštrukčného hľadiska skladá z nasledujúcich hlavných častí:

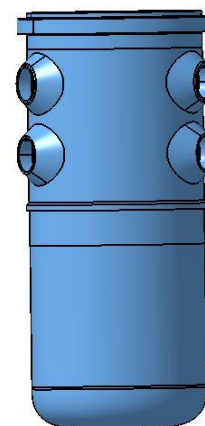
- Tlaková nádoba
- Horný blok
- Vnútorné vstavy umiestnené vnútri tlakovej nádoby
 - šachta
 - bočný plášť aktívnej zóny
 - blok ochranných trubíc

5.2 Tlaková nádoba

Tlaková nádoba je základnou časťou reaktora a zabezpečuje podmienky pre premenu jadrovej energie na tepelnú a jej odvod z aktívnej zóny všetkých prevádzkových režimov. Z hľadiska bezpečnosti tvorí tlaková nádoba hlavnú bariéru proti úniku rádioaktívnych látok do okolia jadrovej elektrárne. Hlavné časti tlakovej nádoby sú:

- valcové teleso tlakovej nádoby
- eliptické dno tlakovej nádoby
- uzol tesnenia

Všetky vyrábané reaktory PWR aj VVER majú tlakové nádoby valcovitého tvaru vyrobené z kovaných prstencov a eliptického dna bez pozdĺžnych zvarov. Horná časť telesa tlakovej nádoby tvorí prírubový prstenec. Na jeho čelnej ploche má vyvŕtaných 54 otvorov pre skrutky hlavnej deliacej roviny. Na vnútornom povrchu prírubového prstenca je osadenie pre zavesenie šachty. Z vonkajšieho povrchu vystupuje nákrúžok, na ktorý dosadne po montáži v elektrárni operný krúžok, slúžiaci ako prechod medzi telesom tlakovej nádoby a betónovou šachtou. Pod prírubovým prstencom je horný hrdlový prstenec so štyrmi hrdlami pre pripojenie horúcich vetví cirkulačných smyčiek a dvoma hrdlami pre pripojenie výtlačných tras z hydroakumulátorov. Ďalej je tu jeden nátrubok slúžiaci k vyvedeniu vnútroreaktorových rozdielov (tlakového rozdielu na aktívnej zóne a výšky hladiny reaktoru). [9]



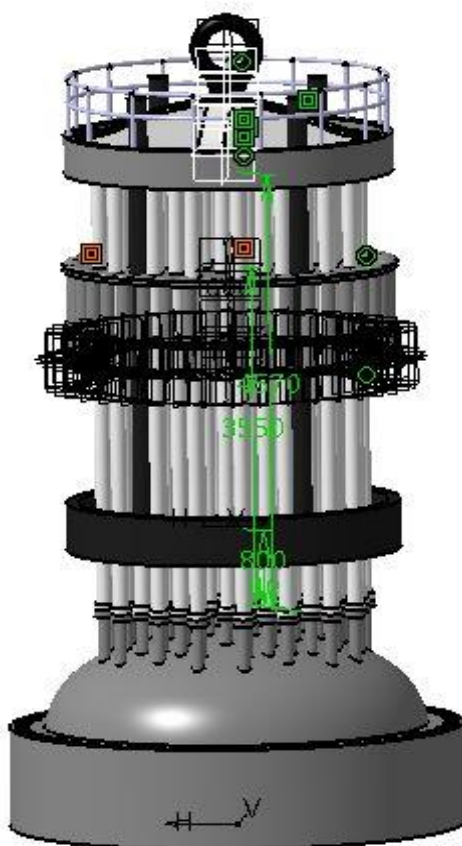
Obr. 6 Tlaková nádoba

5.3 Veko tlakovej nádoby

Veko tlakovej nádoby uzatvára reaktorový priestor. Je zozváraný z kruhového vrchlíka a kovaného prírubového prstenca. Jeho súčasťou je vložený kruh, ktorý je priskrutkovaný na hornú plochu prírubového prstenca, ktorý vytvára dosadaciu plochu pre podložky uzla tesnenia. Na vonkajšom okraji vrchlíka je prizvárané šesť konzol pre uchytanie ocelejovej konštrukcie horného bloku. V prírubovom prstenci je vyvŕtaných 54 priechodných otvorov pre skrutky hlavnej deliacej roviny. [9]

5.4 Horný blok

Základným dielom horného bloku je veko tlakovej nádoby. Horný blok je nosnou konštrukciou pre uloženie pohonov clusterov¹ a slúži na vyvedenie vnútroreaktorových meraní mimo reaktor. Tuhosť horného bloku je zabezpečená oceľovou konštrukciou, ktorá je prichytená k veku nosnými tyčami. [9]



Obr. 7 Veko tlakovej nádoby s horným blokom.

5.5 Šachta

Šachta je základný vnútorný prvok reaktoru, ktorá oddeľuje vstupný a výstupný priestor chladiva primárneho okruhu, je nosnou konštrukciou všetkých ostatných vnútorných častí reaktoru a usmerňuje tok chladiva, ktorý prúdi reaktorom. Ďalej znižuje tok neutrónov na stenu tlakovej nádoby a plní funkciu tepelného tienenia.

Šachta je tenkostenný, nosný valec, ktorý je zvarovaný z prstencov, ktoré sú skružené z plechu. V mieste aktívnej zóny je hrúbka plechu 60 mm. Na jej hornom konci je zhotovená oporná príruha pre zavesenie šachty do telesa tlakovej nádoby.

Dno šachty je konštruované tak, aby upokojilo a zrovnomernilo prúd chladiva primárneho okruhu pred vstupom do aktívnej zóny reaktora. Je tu vytvorený priestor pre palivové časti regulačných kaziet pri ich zasúvaní pod aktívnu zónu reaktora poprípade ich voľnému pádu. [9]

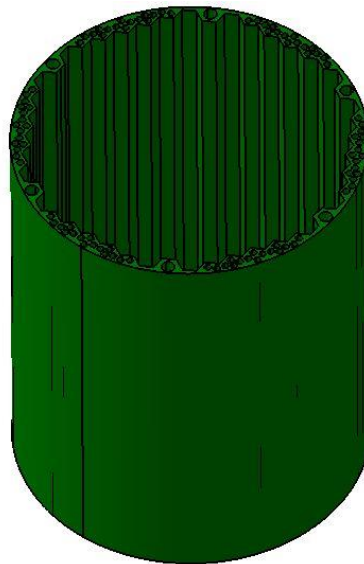


Obr. 8 Šachta.

5.6 Bočný plášť aktívnej zóny

Bočný plášť aktívnej zóny vytvára priestor pre uloženie 163 bezobálkových palivových kaziet, ktoré tvoria aktívnu zónu reaktoru VVER 1000. Taktiež plní funkciu neutrónového a tepelného tienenia tlakovej nádoby reaktora.

Bočný plášť aktívnej zóny sa skladá z piatich valcových segmentov a šiestich spojovacích trubiek. Na hornom okraji na vonkajšom povrchu má každý segment osadenie, čo umožňuje navedenie segmentov pri montáži bočného plášťa. Vnútorý povrch segmentov je obrobený do tvaru, ktorý zodpovedá šesťhranom periférnych palivových kaziet aktívnej zóny. Po obvode je vyvŕtané veľké množstvo otvorov. Šesť otvorov o priemere 130 mm mechanicky spája segmenty pomocou spojovacích trubiek. Ostatné otvory sú montážne, alebo vytvárajú vertikálne kanály, cez ktoré za prevádzky prúdi chladivo primárneho okruhu. Konštrukčným materiálom bočného plášťa aktívnej zóny je austenitická nerezová oceľ. [9]



Obr. 9 Bočný plášť.

6. Záver

Bakalárska práca bola zameraná na konštrukčné riešenia tlakovej nádoby tlakovodného reaktoru a vypracovanie 3D modelu reaktoru. Úlohou bolo zoznámenie sa s problematikou tlakových nádob a jadrových reaktorov. V teoretickej časti sme sa oboznámili s vývojom jadrovej energetiky vo svete a zistili sme rozdiely medzi západnými krajinami ako sú predovšetkým USA, Veľká Británia, Francúzsko a východnou časťou sveta a to hlavne Ruska a krajín bývalého sovietskeho zväzu. V práci som podrobne rozdelil a popísal tlakovodné reaktory a ich nádoby podľa jednotlivých kritérií.

Praktická časť bola zameraná na tvorbu 3D modelu tlakovodného reaktoru VVER-1000. Spracovanie a modelovanie prebiehalo v prostredí komerčného softvéru Catia V5, vyvíjaný firmou Dassault Systems. Časti reaktoru som modeloval zvlášť a postupne spájal funkčnými väzbami do jednotlivých podzostáv a zostáv. Detailného prevedenia reaktoru nebolo možné dosiahnuť z dôvodu vysokej náročnosti programu Catia V5 na hardware a tak sa od jednotlivých zložitých a náročných krokov počas modelovania odpustilo.

7. Zoznam použitých zdrojov

- [1] Techmania.cz [online]. 2008 [cit. 2014-04-25]. Štěpení jader. Dostupné z WWW: <http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xsar=4a616465726ee12066797a696b61h&key=1374>.
- [2] DUBŠEK, František. Jaderné reaktory. 1. vyd. Brno: PC-DIR, 1995, 174 s. ISBN 80-214-0715-8.
- [3] Sforum.sk [online]. 2010 [cit. 2014-04-15]. Trendy jadrovej energetiky vo svete. Dostupné z WWW: <http://www.sforum.sk/bulletin/01_00_06.htm>.
- [4] Cez.cz [online]. 2014 [cit. 2014-05-26]. Energetika ve světě Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/pro-media/cisla-a-statistiky/energetika-ve-svete.html>>.
- [5] RAČEK, Jiří. *Jaderné elektrárny*. Vyd. 2. Brno: Zdeněk Novotný, 2005c2002, 196 s. ISBN 80-214-2945-3.
- [6] SLUGEN, Vladimír. *Jadrové zariadenia, jadrová bezpečnosť* [online]. 2009 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z WWW: <<http://edu.snus.sk/ucebnice/Slugen-JZ.pdf>>.
- [7] Eolss.net [online]. 2011 [cit. 2014-04-18]. Nuclear energy materials and reactors – Vol. 1 – Pressurized water reactors. Dostupné z WWW: <<http://www.eolss.net/sample-chapters/c08/e3-06-02-01.pdf>>.
- [8] HRIVNÁK, Ivan. *Materiály jadrových zariadení*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská vysoká škola technická, 1987, 147 s.
- [9] JANÁČEK, Miroslav a Vratislav NECHUTA. *Teorie a stavba jaderných reaktorů*. 2., opr. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1990, 136 s. ISBN 80-214-0086-2.
- [10] SLUGEN, V. – KOVÁČZ, Z. – HINCA, R.: *Bezpečnosť a spoľahlivosť jadrových elektrární*. Skriptá FEI STU, 1996, 164 s. ISBN 80-227-0841-0.
- [11] Pub.iaea.org [online] 1999 [cit. 2014-05-27]. International Atomic Energy Agency. Dostupné z WWW: <http://www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1120_prn.pdf>.

- [12] MATAĽ, Oldřich a Hugo ŠEN. Jaderná zařízení a jejich bezpečnost. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 174 s. ISBN 978-80-214-4349-5.