

Jméno Příjmení:	Student ID:
Studijní program: B-ZSI-P	Datum odevzdání:
Hodnotil:	Počet bodů/Známka:

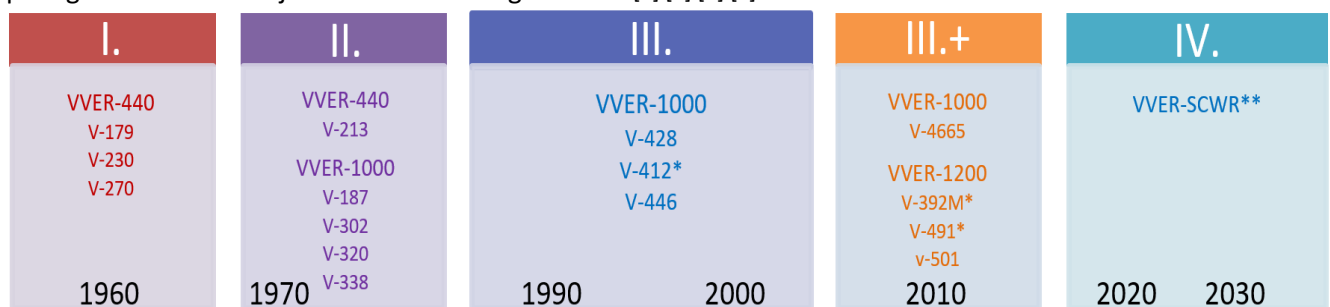
# Tlakovodní jaderný reaktor VVER 440/V-213

## Úvod

V České republice více než třetina elektrického proudu vzniká v jaderných elektrárnách. Výroba elektřiny v jaderných elektrárnách je ekologická a šetrná k životnímu prostředí. Jednou z nejpodstatnějších částí jaderné elektrárny je jaderný reaktor. Jaderný reaktor nemusí být vždy součástí právě jaderné elektrárny. Využívá se také k pohonu ponorek, výzkumu či výrobě radiofarmak.

Tlakovodní reaktor byl původně vyvinut v USA, později koncepci převzalo i Rusko. Můžeme tak rozdělit tlakovodní reaktory na západní (PWR) a východní koncepci (VVER). VVER neboli Vodo-Vodní Energetický Reaktor, někdy značený jako WWER (Water-Water Energetic Reactor), patří mezi nejrozšířenější typy reaktorů. Více než 60 % všech světových reaktorů jsou typu VVER/PWR. Koncepce VVER jsou i reaktory českých elektráren Dukovany a Temelín. [3] [7]

Jako první komerční tlakovodní reaktor typu VVER byl zprovozněn v bývalém sovětském svazu roku 1963. Reaktor nesl název VVER-210. Později byl uveden do provozu další prototyp VVER-365. Oba reaktory byly součástí Novovoronežské JE. Na základě těchto dvou prototypů byl vyvinut standardizovaný projekt reaktoru typu VVER-440. VVER-440 se dnes prezentuje ve dvou základních modifikacích, V-230, jako reaktor první generace a V-213 jako reaktor druhé generace. [2] [6] [7] [9]

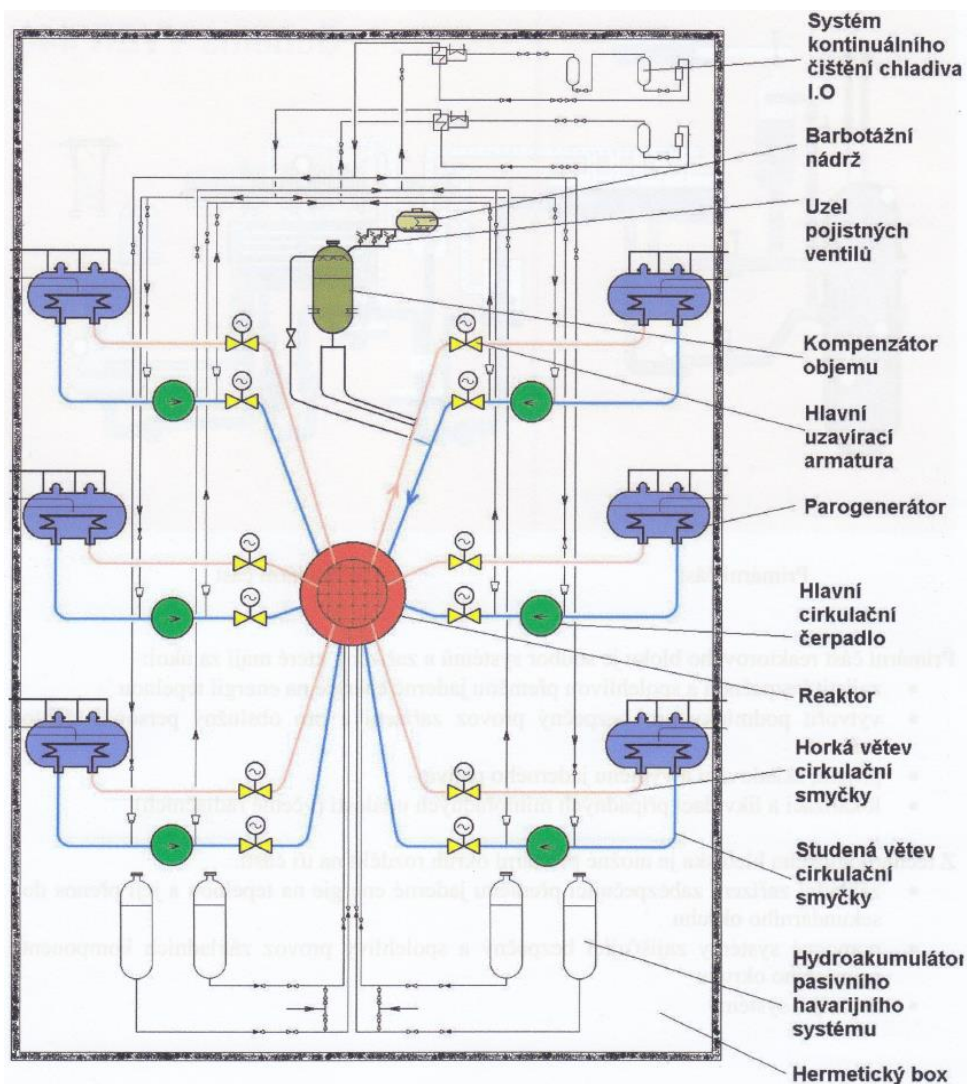


Obr. 1 Vývoj VVER

## Charakteristika VVER 440/V213

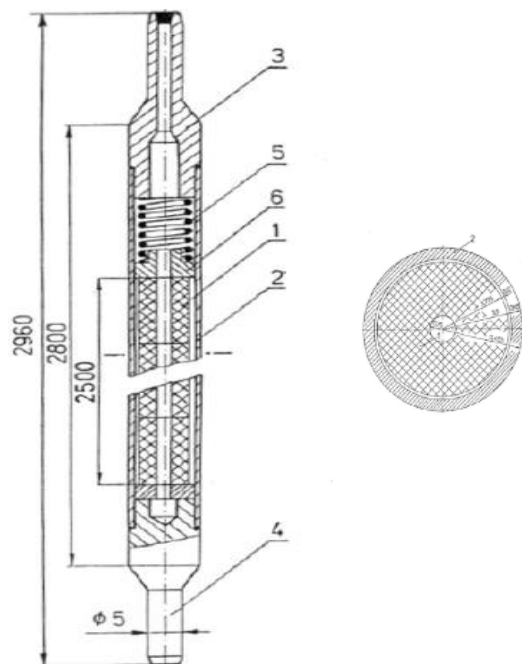
Jedná se o heterogenní tlakovodní energetický reaktor – voda je pod vysokým tlakem, nedochází tedy k varu. Moderátorem i chladivem je obyčejná lehká voda – není zde žádný hořlavý grafit. Společným znakem všech reaktorů typu VVER 440 je 6 hlavních cirkulačních čerpadel (HCČ) s hlavními uzavíracími armaturami. HCČ čerpají chladivo přes PG z reaktoru, ve kterém je obsažena tepelná energie. Ta je následně předána přes trubičky PG chladivu sekundárního okruhu. Voda se v PG mění na páru a přivádí se na vstup turbíny. Na jeden blok reaktoru VVER 440 se využívá k přeměně energie dvě 220MW parní turbíny. PG je umístěn horizontálně. To je jeden z mála rozdílů oproti reaktorům typu PWR. Ty zpravidla zastávají aplikace vertikálních PG. Nevýhodou vertikálního uložení PG je snížení odvodu tepla z primárního okruhu. U vertikální koncepce dochází při ztrátě sekundárního média k dřívějšímu odhalení trubiček PG. Naopak oproti horizontálnímu umístění může být vertikální PG kompaktnější např. při výstavbě kontejneru.[2] [5]

Reaktor je dvouokruhový a narozdíl od předcházejících prototypů došlo k výraznému zlepšení bezpečnosti dle požadavků, které přicházely především ze západních zemí. V projektu reaktoru druhé generace se již uvažuje o maximální havárii (tedy havárii, se kterou si bezpečnostní systémy dokážou poradit, aniž by došlo k poškození aktivní zóny) LOCA-prasknutí hlavního cirkulačního potrubí primárního okruhu o průměru 50 cm, kdy dochází k úniku chladicí látky. I přesto, že tento typ ještě nemá plno-tlakovou ochrannou obálku (kontejnment), jako je tomu u jeho nástupce VVER 1000, vystačí si s barbotážním bezpečnostním systémem (hermetický box). Tento systém, v případě havárie, slouží jako prostor ke kondenzaci vzniklé páry a odvedení nekondenzovatelných plynů. Nevýhodou hermetického boxu oproti kontejnmentu je jeho mohutnost. Na rozdíl od kontejnmentu je vzdálenost jednotlivých zařízení přizpůsobena pro volnější pohyb obsluhy a údržby. [3]



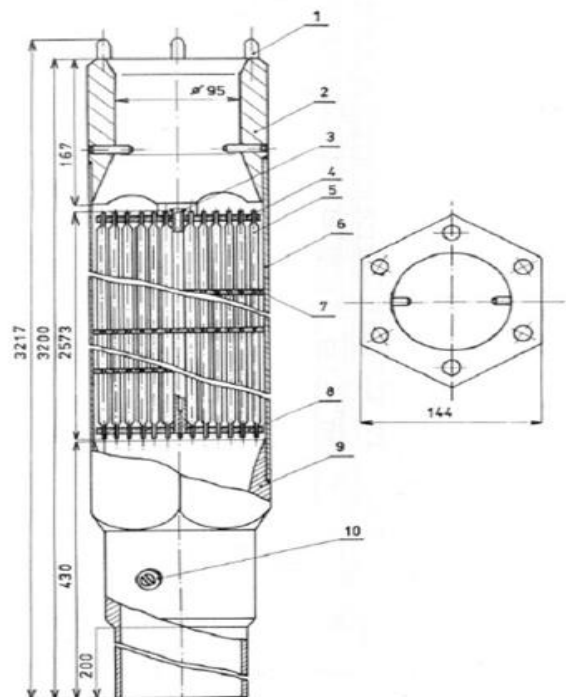
**Obr. 2** Schéma primárního okruhu VVER 440, převzato z [5]

Palivem je málo obohacený uran ve formě tabletek  $\text{UO}_2$  – kysličník uraničitý. Tyto tabletky jsou naskládány do trubky ze slitiny Zirkonia a Niobu, kde jsou hermeticky uzavřeny (jedná se o jednu z bezpečnostních bariér, zabraňujících úniku radiace). Tyto trubky tvoří tzv. palivový proutek (obr.3). Celkem 126 palivových proutků hexagonálně uspořádaných tvoří jednu základní jednotku palivového souboru (obr.4). V případě VVER 440/V-213 je takových základních jednotek 349. Pokud chceme zajistit řízenou štěpnou reakci, musíme uvažovat také soubory obsahující absorbátory přebytečných neutronů. Některé soubory se tak skládají z palivové i absorpční části. Tyto druhy souborů nazýváme regulační a reaktor jich má 37. Na začátku palivové kampaně jsou regulační soubory v takové poloze, kdy palivová část je pod aktivní zónou (AZ) a absorpční část v AZ. Postupně v průběhu kampaně jsou absorpční části vysouvány nad AZ, přičemž se zároveň do AZ zasouvají palivové části. [8]



Obr. 3 Palivový proutek, převzato z [8]

- 1 – palivová tableta z  $\text{UO}_2$
- 2 – pokrytí
- 3 – horní koncovka
- 4 – dolní koncovka
- 5 – distanční pružina
- 6 – přítlačná destička



Obr. 4 palivový soubor, převzato z [8]

- 1 – odpružené kolíky
- 2 – hlavice
- 3 – centrální trubka
- 4 – horní distanční mřížka
- 5 – palivová tyč
- 6 – šestihlanný plášť kazety
- 7 – distanční mřížka
- 8 – spodní upevňovací mřížka
- 9 – koncovka
- 10 – středící čep

## Základní technické parametry VVER 440/V-213 (před využitím projektových rezerv)

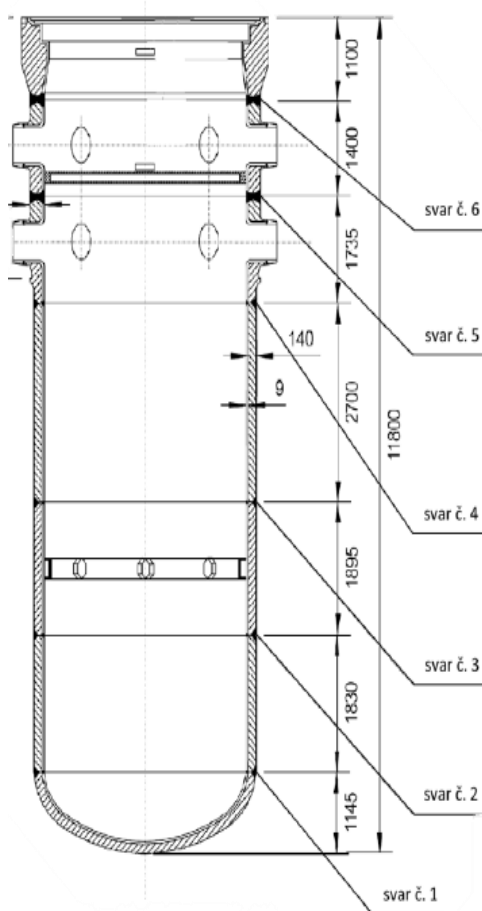
Tepelný výkon:	1375 MW
Elektrický výkon:	440 MW
Tlak vody v reaktoru:	12,25 MPa
Teplota vody na vstupu do reaktoru:	267 °C
Teplota vody na výstupu z reaktoru:	300 °C
Počet palivových proutků v 1 kazetě:	126
Počet palivových kazet v reaktoru:	349
Počet regulačních kazet v reaktoru:	37
Celková hmotnost uranu v reaktoru:	42 tun
Délka palivové kampaně:	3 roky
Průměrná míra obohacení uranu:	3,5%
Průměr aktivní zóny:	2,88 m
Výška aktivní zóny:	2,5 m
Životnost:	30+ let

## Části reaktoru a jeho schéma

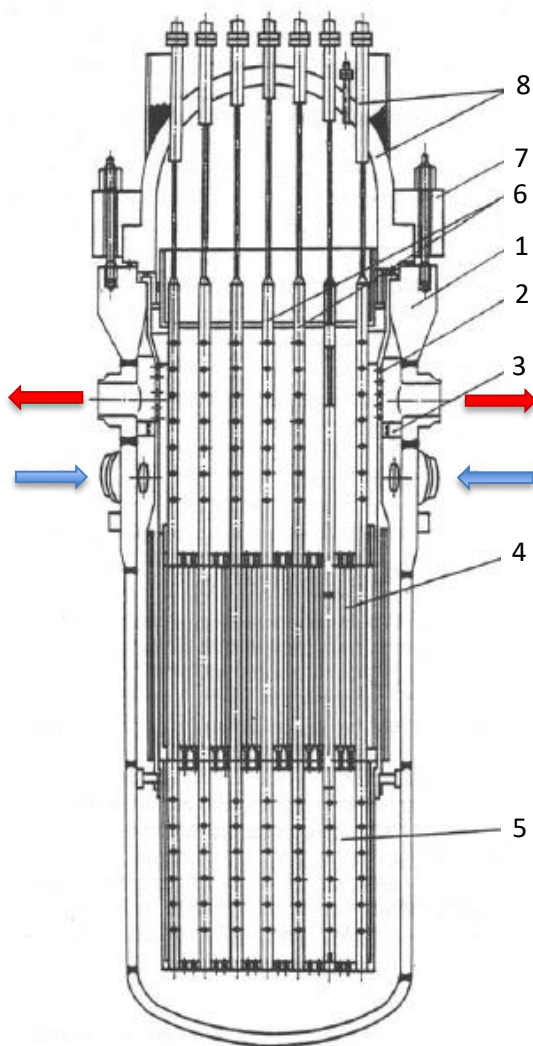
Komplex reaktoru VVER 440/V-213 je tvořen z mnoha konstrukčních celků.

Tlaková nádoba reaktoru (TNR) je brána jako druhá bariéra bezpečnosti, ihned po hermetickém uzavření palivových proutků viz kapitola výše. TNR (obr.5) je svařencem z kovaných prstenců z legované austenitické oceli. Spodní konec TNR je uzavřen poloeliptickým dnem, horní konec je uzavřen víkem reaktoru. Příruba (7) spojuje víko (8) a samotnou TNR, u VVER 440 je volná naopak u VVER 1000 je přírubový spoj pevný. Prstence hrdlové sekce jsou opatřeny 6 otvory pro potrubí studeného chladiva a 6 otvory pro potrubí ohřátého chladiva. [4] [8]

Do TNR je umístěna šachta reaktoru (pozice 2, obr.6) tvořící opěrný systém pro další vnitřní části reaktoru. Dolní řadou otvorů vstupuje do reaktoru „studené“ chladivo, horní řadou vystupuje chladivo, které vstřebalo tepelnou energii z jaderného štěpení. Díky šachtě reaktoru chladivo mění směr toku směrem dolů ke dnu TNR. Zde svůj směr toku otáčí vzhůru, kde protéká děrovaným dnem šachty reaktoru (5). Zde jsou umístěny trubky regulačních palivových souborů, poté chladivo protéká samotnou aktivní zónou, která je umístěna v koši aktivní zóny (4). Zde chladivo absorbuje tepelnou energii, způsobenou vlivem řízené štěpné reakce. Ohřáté chladivo protéká dále do prostor bloku ochranných trub (6) a příslušnými výstupními otvory opouští reaktor. Studené chladivo nesmí přijít do styku s ohřátým chladivem. Tuto funkci zajišťuje těsnící prstenec (3). Odděluje část šachty, kolem které proudí ohřáté chladivo a část přicházející ze studené smyčky. Pohony regulačních souborů jsou umístěny v pouzdrech, která jsou součástí víka TNR (8). [8]

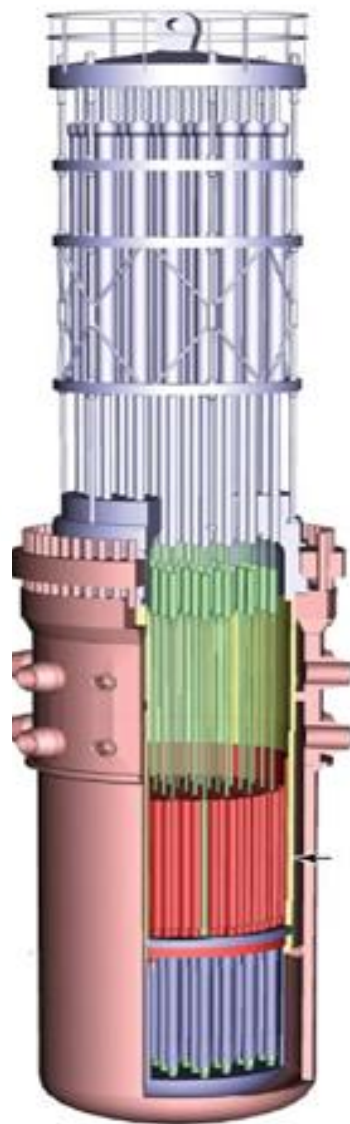


Obr. 5 TNR, převzato z [8]



Obr. 6 VVER 440/V-213, převzato z [8]

- 1 – tlaková nádoba reaktoru
- 2 – šachta reaktoru
- 3 – těsnící prstenec
- 4 – koš aktivní zóny
- 5 – dno šachty reaktoru
- 6 – blok ochranných trub
- 7 – volná příruba
- 8 – víko TNR s pouzdry pohonů



Obr. 7 3D model JR, převzato z [8]

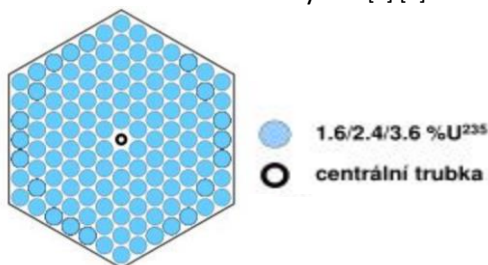


## Perspektivy dalšího zdokonalení

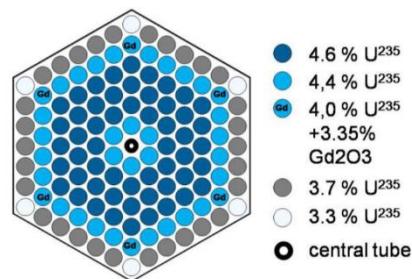
Bloky reaktoru typu V-213 byly původně projektovány na nominální výkon 440MW. Díky projektovým rezervám je možné výkon postupnými úpravami zvýšit až na 510MW. Tyto úpravy zahrnují zvýšení tepelného výkonu na 108 % z původních 1375MW na 1485MW. Využívání projektových rezerv bylo provedeno především za použití novějšího paliva s kombinací lepšího řídicího systému a také s dalšími vylepšeními sekundárního okruhu. Typickým zástupcem takto modifikovaného reaktoru je jeden z bloků JE Dukovany či finská jaderná elektrárna Loviisa. [6]

Dle dlouholetého výzkumu a pozorování se traduje, že ukazatelem životnosti reaktoru má v co dočinění s životností tlakové nádoby reaktoru. TNR podléhá časem degradaci materiálu způsobenou radiací. Tzv. radiační křehnutí TNR je sledováno pomocí svědečných vzorků. Zkrátka při každé výměně paliva se určitá část svědečných vzorků vyjme a projde důkladnými testy, kde se vyhodnotí aktuální stav materiálu a doba dalšího použití reaktoru. Podle výsledků testů tohoto průzkumu je možné prodloužit životnost z původně plánovaných 30let na 60let provozu. Pro případy vyhodnocení testů, kdy se projeví radiační stárnutí TNR, byla vyvinuta metoda regeneračního žíhání TNR. Tato metoda umožňuje obnovit původní vlastnosti. Principem žíhání je ohřev na teplotu 475 °C, výdrž na této teplotě po dobu 150 hodin a následným pozvolným ochlazením. Proces regeneračního žíhání je realizován pomocí výkonné pece válcové výstavby přibližně po dobu 15dní. [1] [8]

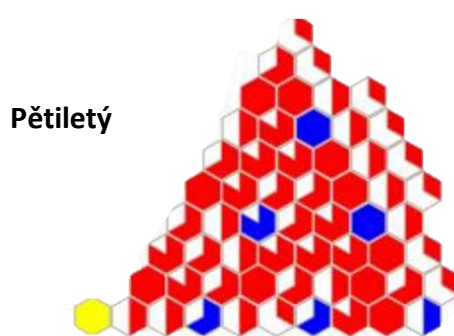
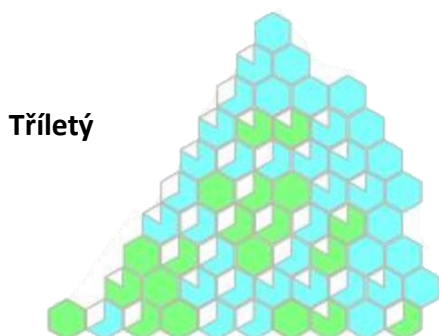
Palivový cyklus byl zprvu realizován jako tříletý (každý rok byla vyměněna třetina cca 114 palivových souborů). Z ekonomického i provozního hlediska to bylo nevýhodné. Palivové soubory neměli profilované obohacení (obr.8) tzn., že všechny palivové proutky v souboru byly stejného obohacení. Od roku 2003 se používá převážně pětiletý cyklus s modernizovaným radiálně profilovaným palivem (obr.9). V každoroční odstávce se tedy mění průměrně 72 použitých souborů. V porovnání se tříletým cyklem lze vidět velký rozdíl v počtu vyměněných palivových souborů. To vedlo ke snížení nákladů na uskladnění použitého paliva. Palivo, které umožňuje pětiletý cyklus má vyšší obohacení, a navíc některé proutky mohou obsahovat tzv. vyhořívající absorbátor = oxid gadolinitý. Vývoj palivových cyklů zdaleka nekončí. Uvažuje se také o šestiletém a sedmiletém cyklu. [8] [9]



Obr. 8 Neprofilovaný palivový soubor, převzato z [9]



Obr. 9 Profilovaný palivový soubor, převzato z [8]



Obr. 10 Palivový cyklus, převzato z [8]

## Závěr

Problematika jaderné energetiky mě zaujala již na střední škole. Dlouho jsem váhal, o čem bych mohl napsat tuto semestrální práci. Nakonec jsem zvolil jaderný reaktor. Hledal jsem různé typy jaderných reaktorů, ale nejvíce jsem se chtěl dozvědět právě o reaktoru VVER 440/V-213 jenž se nachází v JE Dukovany. Této problematice bych se rád věnoval také ve své bakalářské práci.

## Seznam použitých zdrojů:

- [1] ČERNOBYL. (2018, leden 29.). Reaktory VVER-440 z první generace: dva pohledy na věc. *CHERNOBYLZONE.CZ* [online]. Dostupné z: <https://chernobylzone.cz/reaktory-vver-440-z-prvni-generace-dva-pohledy-na-vec/>
- [2] HINTERHOLZINGEROVÁ, L. (2020, květen 27.). Provozní zkušenosti s VVER-440. *ATOM INFO.cz, Aktuálně o jádru* [online]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2020/05/provozni-zkusenosti-s-vver-440/>
- [3] Kapitola 18 - *Jaderné reaktory*. (n.d.). Učební text [online]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjehcT25ebtAhVCzBoKHYI0DSgQFjAAegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.soje.cz%2Fstorage%2Fuser-76%2Fmodule-349%2Fjaderne-reaktory-15501545400phphclqp4.pdf&usg=AOvVaw2XXL8bkd06pWqwsRGYmRrf>
- [4] KOLAT, P., & TOMÁŠEK, D. (2012). *Jaderná energetika. Inovace odborného vzdělání na středních školách zaměřené na využívání energetických zdrojů pro 21. století a na jejich dopad na životní prostředí*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky [online]. Dostupné z: [https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:3eGak3PI\\_pAJ:https://www.kke.zcu.cz/about/projekty/enazp/projekty/18\\_Zaklady-ekologie\\_48-49/48\\_IUT/111\\_Jaderna-energetika---Kolats---P3.pdf+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:3eGak3PI_pAJ:https://www.kke.zcu.cz/about/projekty/enazp/projekty/18_Zaklady-ekologie_48-49/48_IUT/111_Jaderna-energetika---Kolats---P3.pdf+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz)
- [5] PUCHNAR, J. (2015, červenec 24.). Svět jaderných reaktorů: Rozdíly mezi PWR a VVER. *OENERGETICE.cz* [online]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/svet-jadernych-reaktoru-rozdily-mez-pwr-a-vver>
- [6] PUCHNAR, J. (2015, červenec 16.). Svět jaderných reaktorů: Vývoj tlakovodních reaktorů východní koncepce (VVER). *OENERGETICE.cz* [online]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/svet-jadernych-reaktoru-vyvoj-tlakovodnich-reaktoru-vychodni-koncepce-vver>
- [7] ROSATOM, S. A. (n.d.). The VVER today. *VVER in the world. Russia: State Atomic Energy Corporation ROSATOM* [online]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjSl8ST5ObtAhUFuRoKHTJBScQFjAAegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fwww.rosatom.ru%2Fupload%2Fiblock%2F0be%2F0be1220af25741375138ecd1afb18743.pdf&usg=AOvVaw2x4w7JoQz5U0gq-FieRbE>
- [8] ŘÍHA, T. (2011). *Studium radiačního poškození nádoby reaktoru VVER-440 jaderné elektrárny Dukovany* [online]. 109 s. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=38979](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38979)
- [9] SIMOPT, s.r.o. SVĚT ENERGIE, VZDĚLÁVACÍ PORTÁL ČEZ. *Typy reaktorů* [online]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/charakteristika-zdroje/typy-reaktoru>