VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

PALIVOVÝ CYKLUS JADERNÉ ELEKTRÁRNY TEMELÍN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE MARTIN JEŽEK
AUTHOR

BRNO 2012

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student:	Martin Ježek	***ID:***	125234
Ročník:	3	**Akademický rok:**	2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Palivový cyklus jaderné elektrárny Temelín

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zpracujte přehled cyklu jaderného paliva na jaderné elektrárně – od převzetí na uzlu čerstvého paliva po zavezení do bazénu skladování.
2. Zaměřte se na tlakovodní a varné jaderné reaktory vyšších výkonů, proveďte rešerši rozdílů ve vnitřního palivového cyklu podle jednotlivých projektů s důrazem na reaktory VVER-1000.
3. Detailně popište typy jaderných paliv používaných na ETE od počátku provozu.
4. Popište vývoj vnitřního palivového cyklu ETE od počátku provozu do současnosti.
5. Proveďte jednoduchou simulaci možných překládek na ETE s ohledem na delší než roční cykly výměny paliva.
6. Rozeberte a porovnejte tyto cykly z hlediska využití paliva, ekonomie, skladování a organizace provozu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012 ***Termín odevzdání:*** 25.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Karel Katovský, Ph.D.
Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

JEŽEK, M. *Palivový cyklus jaderné elektrárny Temelín.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

……

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

Palivový cyklus jaderné elektrárny Temelín

Martin Ježek

vedoucí: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2012

Brno

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Bachelor‘s Thesis

Nuclear Fuel Cycle of Temelin NPP

by

Martin Ježek

Supervisor: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Brno University of Technology, 2012

Brno

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá střední částí palivového cyklu jaderné elektrárny Temelín. Popisuje obecně celý palivový cyklus, od těžby uranu až po trvalé uložení vyhořelého paliva a stručně se zmiňuje o možnostech jeho přepracování. Největší pozornost je ovšem věnována střední části palivového cyklu. Práce se dále orientuje na jadernou elektrárnu Temelín. Stručně popisuje používaný reaktor VVER-1000 i jeho aktivní zónu a jsou zde blíže popsána obě dvě používaná paliva, v současnosti používané palivo od ruské společnosti TVEL i v minulosti používané palivo od americké společnosti Westinghouse. Je zde popsán vývoj palivového cyklu od uvedení elektrárny do provozu až po současnost a jsou zmíněny provozní problémy s palivem americké společnosti. Práce se také zabývá delšími než ročními cykly a snaží se kvantifikovat jejich základní přínosy oproti ročním cyklům. V práci je velmi jednoduchým způsobem proveden návrh prodlouženého palivového cyklu a jeho zhodnocení z hlediska ekonomie provozu a organizace odstávek.

KLÍČOVÁ SLOVA: palivový cyklus, jaderné palivo, Temelín, VVER

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the central part of a fuel cycle in the power plant of Temelín. It describes generally the whole fuel cycle, from the process of uranium mining up to permanent storage of burned-up material and it shortly mentiones possibilities of its remaking. Neverthless, the main point is the middle part of the fuel cycle. In the next parts, the thesis concentrates on the power plant of Temelín. It describes shortly the WER-1000 reactor, which is being used there, and the active zone as well. There is a further description of both fuels used there, a fuel form a Russian corporation of TVEL, which is used nowadays, as well as a fuel from an American corporation of Westinghouse used in the past. The thesis then deals with the development of a fuel cycle from the moment of launching the power plant up to the present. The problems with the fuel from the American corporation are mentioned here as well. Then it concentrates on more-than-year long cycles and tries to quantify their contribution. The thesis contains a very simple project of an elongated fuel cycle and his evaluation from the point of working economy and organisation of shutdowns.

KEY WORDS: Nuclear fuel cycle, nuclear fuel, Temelin, VVER

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ **10**

SEZNAM TABULEK **11**

1 ÚVOD **13**

2 PALIVOVÝ CYKLUS **14**

2.1 PŘEDNÍ ČÁST PALIVOVÉHO CYKLU **14**

2.2 STŘEDNÍ ČÁST PALIVOVÉHO CYKLU **14**

2.3 ZADNÍ ČÁST PALIVOVÉHO CYKLU **15**

2.3.1 OTEVŘENÝ CYKLUS 15

2.3.2 UZAVŘENÝ CYKLUS 16

3 STŘEDNÍ ČÁST PALIVOVÉHO CYKLU **17**

3.1 METODA OUT-IN **17**

3.2 METODA IN-OUT **17**

3.3 VYHOŘÍVAJÍCÍ ABSORBÁTORY **18**

3.4 TLAKOVODNÍ REAKTORY (PWR A VVER) **18**

3.4.1 PALIVOVÝ CYKLUS PWR 19

3.4.2 PALIVOVÝ CYKLUS VVER 20

3.5 LEHKOVODNÍ VARNÉ REAKTORY (BWR) **20**

3.5.1 PALIVOVÝ CYKLUS BWR 21

4 JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN **22**

4.1 PRIMÁRNÍ OKRUH **22**

4.2 TLAKOVODNÍ REAKTOR **22**

4.2.1 AKTIVNÍ ZÓNA 24

5 PALIVA POUŽÍVANÁ NA ETE **25**

5.1 PALIVOVÉ SOUBORY VVANTAGE 6 ..... **25**

5.1.1 PALIVOVÝ SOUBOR 26

5.1.2 PALIVOVÝ PROUTEK 27

5.2 PALIVOVÉ SOUBORY TVSA-T **29**

5.2.1 PALIVOVÝ SOUBOR 29

5.2.2 PALIVOVÝ PROUTEK 31

6 VÝVOJ PALIVOVÉHO CYKLU ETE **33**

7 PRODLOUŽENÉ PALIVOVÉ CYKLY **38**

7.1 PRODLOUŽENÝ 16-TI MĚSÍČNÍ CYKLUS **38**

7.2 PRODLOUŽENÝ 18-TI MĚSÍČNÍ CYKLUS **39**

8 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ **40**
8.1 MĚRNÁ SPOTŘEBA URANU 235 ..... **40**
8.2 NÁKLADY NA PALIVO **41**
8.2.1 CENA PALIVOVÉHO SOUBORU 41
8.2.2 ÚSPORA VYROBENÉ ENERGIE 42
8.2.3 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ 42
9 ZÁVĚR **44**
POUŽITÁ LITERATURA **45**
PŘÍLOHA A – PŘÍČNÉ ŘEZY JEDNOTLIVÝCH TYPŮ PS **47**

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Palivové tabletky [5] 14
Obr. 2-2 Sklad použitého paliva v Jaderné elektrárně Dukovany [5] 15
Obr. 2-3 Jak se změní palivo po kampani v reaktoru [5] 16
Obr. 2-4 Schéma palivového cyklu [6] 16
Obr. 3-1 Zjednodušené schéma tlakovodního reaktoru [5] 19
Obr. 3-2 Zjednodušené schéma varného reaktoru [5] 20
Obr. 4-1 Schéma reaktoru VVER-1000 [14] 23
Obr. 4-2 Rozložení aktivní zóny reaktoru VVER-1000 [14] 24
Obr. 5-1 Konstrukce palivového souboru VVANTAGE 6 [14] 27
Obr. 5-2 Konstrukce palivového proutku VVANTAGE 6 [14] 28
Obr. 5-3 Konstrukce palivového souboru TVSA-T [21] 30
Obr. 5-4 Konstrukce palivového proutku tvel (tveg) [21] 31
Obr. 6-1 Kartogram rovnovážné palivové vsázky s palivem TVSA-T [21] 37
Obr. 6-2 Přehled harmonogramu odstávek při ročním cyklu 37
Obr. 7-1 Přehled harmonogramu odstávek při 16-ti měsíčním cyklu 38
Obr. 7-2 Přehled harmonogramu odstávek při 18-ti měsíčním cyklu 39
Obr. 8-1 Měrná spotřeba uranu 235 v jednotlivých cyklech 41
Obr. A-1 Schéma příčného průřezu palivového svazku TVSA-T, typy A13, A20 [21] 47
Obr. A-2 Schéma příčného průřezu palivového svazku TVSA-T, typy P40E9, P36E9 [21] 48
Obr. A-3 Schéma příčného průřezu palivového svazku TVSA-T, typ A30E9 [21] 49
Obr. A-4 Schéma příčného průřezu palivového svazku TVSA-T, typy A40E6, A49E6 [21] 50
Obr. A-5 Schéma příčného průřezu palivového svazku TVSA-T, typ A47G9 [21] 51

SEZNAM TABULEK

Tab. 5-1 Typy palivových souborů TVSA-T pro první a referenční palivovou vsázku [21].....32
Tab. 5-2 Porovnání obou paliv [20],[21] 32
Tab. 6-1 Hodnoty aktivity v primárním okruhu [16].....33
Tab. 6-2 Počty zjištěných netěsných palivových souborů [16] 34
Tab. 6-3 Počet nedosednutých klastrů v prvním bloku v letech 2005 - 2007 [16].....35
Tab. 8-1Cena palivového souboru vztažená na 1kg [25].....41
Tab. 8-2 Ceny jednotlivých typů PS pro referenční palivovou vsázku.....42
Tab. 8-3 Srovnání palivových nákladů jednotlivých cyklů.....42
Tab. 8-4 Průměrná roční úspora odstávkových dní.....42
Tab. 8-5 Celkové ekonomické zhodnocení 43

Seznam symbolů a zkratek

AZ	Aktivní zóna
BWR	Varný reaktor (Boiling Water Reactor)
CANDU	Tlakový těžkovodní reaktor (Canadian deuterium heavy water reactor)
ETE	Elektrárna Temelín
HVB 1	Hlavní výrobní blok 1
HVB 2	Hlavní výrobní blok 2
MOX	Palivo ze směsi oxidů uranu a plutonia (Mixed Oxide Fuel)
PP	Palivový proutek
PS	Palivový soubor
PWR	Tlakovodní reaktor západní typ (Pressured Water Reactor)
RBMK	Varný grafitový reaktor chlazený obyčejnou vodou
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
TVEL	Ruská společnost, dodavatel paliva
Tvel	Palivový proutek bez vyhořívajícího absorbátoru
Tveg	Palivový proutek s vyhořívajícím absorbátorem
VVER	Tlakovodní reaktor východní typ (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor)

1 ÚVOD

V dnešní době je elektrická energie nedílnou součástí lidského života, bez ní si většina lidí život nedokáže představit. S rostoucím životním komfortem roste i spotřeba elektrické energie, kterou je potřeba pokrýt vhodnými zdroji, neobnovitelnými nebo obnovitelnými. Použití obnovitelných zdrojů je možné jen v omezené míře, a tak rozhodující úlohu mají zdroje neobnovitelné jako je uhlí, ropa a zemní plyn. Spalování těchto fosilních paliv ovšem zatěžuje životní prostředí tvorbou skleníkových plynů a jejich zásoby se postupně tenčí.

Jaderná energetika neprodukuje téměř žádné skleníkové plyny a nezatěžuje tak životní prostředí. Jaderné zdroje patří celosvětově mezi nejlevnější zdroje elektrické energie. Zásoby materiálů pro výrobu paliva vystačí zhruba na 85 let. Pokud se vyhořelé palivo bude přepracovávat, vystačí přibližně na 2500 let. [1]

Cílem této práce je seznámit se s palivovým cyklem jaderné elektrárny, především s jeho střední částí. Ve druhé kapitole jsou definovány a stručně popsány všechny tři části palivového cyklu. Třetí kapitola se podrobněji zabývá střední částí palivového cyklu. Další dvě kapitoly jsou zaměřeny na jadernou elektrárnu Temelín: v páté kapitole jsou popsána používaná paliva na elektrárně a šestá kapitola se věnuje vývoji palivového cyklu Temelínské elektrárny.

Závěrečná část práce je věnována prodlouženým palivovým cyklům a jejich ekonomickému zhodnocení. V sedmé kapitole jsou popsány dva prodloužené palivové cykly, 16-ti a 18-ti měsíční. V poslední kapitole je provedena jednoduchá ekonomická analýza vybraných cyklů.

2 PALIVOVÝ CYKLUS

Palivový cyklus můžeme definovat jako souhrn všech procesů spojených s výrobou a další existencí jaderného paliva. Dělíme jej na tři základní části: přední, střední a zadní část cyklu. Přední část cyklu se zabývá těžbou uranu a výrobou paliva, střední část cyklu se zabývá využitím paliva v reaktoru a zadní část cyklu se zabývá zpracováním vyhořelého jaderného paliva, jeho uložením nebo přepracováním. [2], [3], [4]

2.1 Přední část palivového cyklu

Palivový cyklus začíná těžbou uranové rudy. Uranová ruda je těžena povrchovým nebo hlubinným způsobem.

Vytěžená ruda je rozdrcena a rozemleta na jemný prášek. Po chemické úpravě se získá diuranát amonný $(NH_4)_2U_2O_7 \cdot nH_2O$, tzv. žlutý koláč. Jedná se o uranový koncentrát žluté barvy, který obsahuje přibližně 70 % uranu. Uranový koncentrát je ještě dále vyčištěn a konvertován na plynný hexafluorid uranu UF_6.

Přírodní uran obsahuje přibližně 0,7 % izotopu uranu ^{235}U. Pro použití v tlakovodních reaktorech je potřeba podíl tohoto izotopu zvýšit. Tento proces se nazývá obohacování. V současnosti se používají dvě metody obohacování, difuzní a odstředivková. Jedná se o velmi technicky, energeticky a ekonomicky náročný proces.

Již obohacený hexafluorid uranu je převeden na prášek oxidu uraničitého UO_2, ze kterého jsou lisovány palivové tabletky tzv. peletky. Vložením peletek do speciálních trubek ze zirkoniové slitiny jsou tvořeny palivové proutky. Spojením několika proutků vzniká palivový soubor. [2], [3], [4]

Obr. 2-1 Palivové tabletky [5]

2.2 Střední část palivového cyklu

Čerstvé palivo je dopraveno na elektrárnu, kde je uskladněno do doby, než se zaveze do reaktoru. Palivo se v reaktoru využívá nejčastěji od 3 do 5 let. Vyhořelé palivo je vyvezeno z reaktoru do skladovacího bazénu vedle něj, kde zůstane 5 až 10 let, aby se snížila teplota a radioaktivita. Voda v bazénu zároveň slouží jako stínění proti radiačnímu záření. [2], [3]

2.3 Zadní část palivového cyklu

Zadní část palivového cyklu zahrnuje nakládání s vyhořelým palivem. Po vyvezení z bazénu je palivo převezeno do skladu použitého paliva. Ten je většinou umístěn přímo v areálu jaderné elektrárny. Jsou možné dva způsoby skladování, mokrý a suchý.

Mokrý způsob je nejrozšířenější. Palivo je skladováno v bazénech, kde voda zajišťuje chlazení a zároveň chrání okolí před radiací. Nevýhodou je, že voda se musí neustále čistit, vznikají tak tekuté radioaktivní odpady. Provozní náklady oproti suchému skladování jsou vyšší.

Druhý způsob skladovaní je suchý způsob. Palivo je skladováno buď do betonových staveb, tzv. sklípků, nebo do kontejnerů. Jeho výhodou jsou nižší provozní náklady. Obě naše jaderné elektrárny používají suchý způsob skladování v kontejnerech typu CASTOR.

Obr. 2-2 Sklad použitého paliva v Jaderné elektrárně Dukovany [5]

Jsou dvě možnosti jak dál s použitým palivem naložit. Může být uloženo jako radioaktivní odpad i s velkou částí paliva, kterou je možno ještě využít, nebo může být palivo přepracováno a znovu použito. Palivový cyklus s přepracováním paliva se nazývá cyklus uzavřený, cyklus bez přepracování paliva se nazývá otevřený. [2], [3], [4]

2.3.1 **Otevřený cyklus**

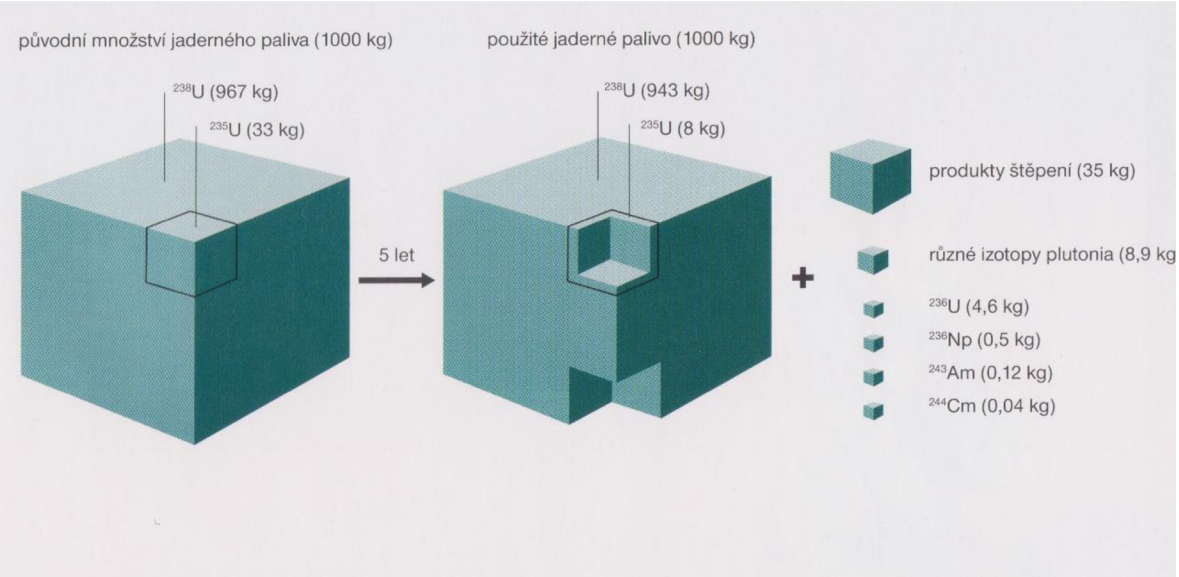
Otevřený palivový cyklus nepočítá s přepracováním vyhořelého jaderného paliva. Po dostatečné době uložení vyhořelého paliva v meziskladu, kde poklesne radioaktivita a vyvíjené teplo na takovou úroveň, kdy už nemusí být pod stálým dohledem, je uloženo do trvalého hlubinného úložiště.

Hlubinná úložiště jsou budována ve velkých hloubkách a ve stabilních geologických prostředích. Je možné do něj uložit vyhořelé palivo, ale i další radioaktivní odpady vznikající při provozu jaderné elektrárny nebo vysokoaktivní odpady, které vznikají při přepracování vyhořelého paliva. Radioaktivní odpady od okolního prostředí v hlubinném úložišti odděluje několik bariér.

První bariérou je umístění odpadu do speciálních kontejnerů z kovu nebo betonu. Vysokoaktivní odpady vzniklé při přepracování se nejprve zataví do speciálního skla a potom jsou umístěny do speciálního kontejneru. Následnou bariéru tvoří umístění kontejnerů s palivem do speciálních vrtů nebo galerií. Další bariérou je vyplnění volného prostoru speciálními materiály. Hlavní bariérou je však geologické prostředí, ve kterém je úložiště vybudováno. [2], [3]

2.3.2 Uzavřený cyklus

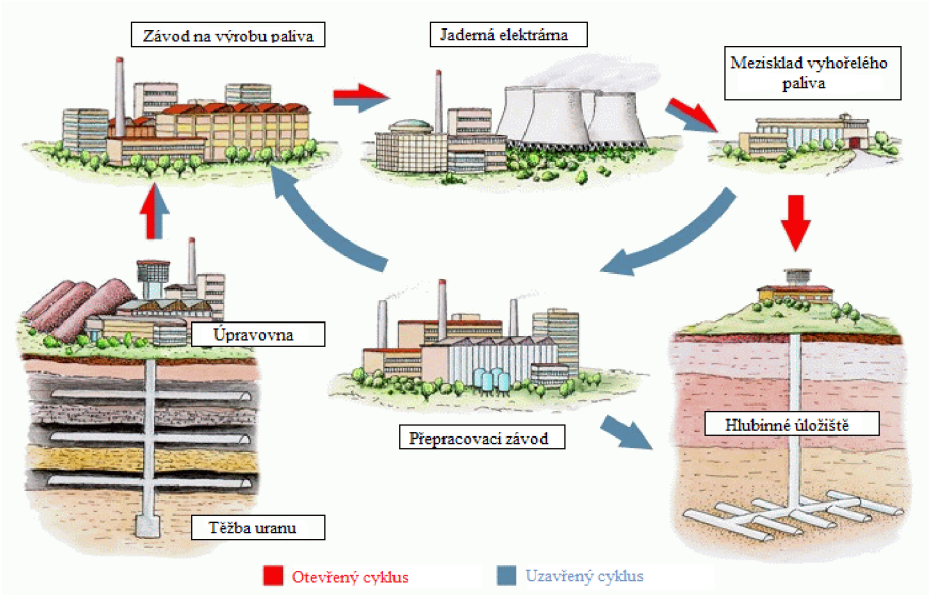
Uzavřený palivový cyklus počítá s přepracováním vyhořelého paliva a jeho dalším využití pro jaderné reaktory. Přepracování je velice nákladný proces a přepracované palivo je proto dražší než palivo čerstvé. Některé země, jako například Francie nebo Anglie, mají i přesto velké závody na přepracování paliva, kde se přepracovává i palivo z dalších zemí. [2]



Obr. 2-3 Jak se změní palivo po kampani v reaktoru [5]

Vyhořele palivo po vyjmutí z reaktoru obsahuje přibližně 95 % uranu, 3 % štěpných produktů, přibližně 1 % plutonia a 1 % tzv. minoritních aktinoidů. Za radioaktivní odpad se dají považovat jen štěpné produkty. Zbytek se může po přepracování znovu využít.

Jednou z možností je výroba paliva MOX (mixed oxide fuel), jedná se o směs oxidů uranu UO_2 a plutonia PuO_2. Toto palivo se převážně využívá v reaktorech typu PWR a může nahradit asi třetinu běžného paliva. V některých reaktorech to může být až polovina palivové vsázky. [2], [3]



Obr. 2-4 Schéma palivového cyklu [6]

3 STŘEDNÍ ČÁST PALIVOVÉHO CYKLU

Střední částí palivového cyklu se rozumí část cyklu od uskladnění čerstvého paliva na elektrárně až po vyvezení vyhořelého paliva do skladovacího bazénu vedle reaktoru. Někdy se jako střední část cyklu považuje jen doba, kdy je palivo využíváno v reaktoru.

Hlavním cílem této časti cyklu je navrhnout rozložení různě vyhořelých palivových souborů tak, aby byly splněny všechny bezpečnostní podmínky a palivo bylo hospodárně využito.

V tlakovodních reaktorech (PWR a VVER) i ve varných reaktorech (BWR) je výměna paliva realizována kampaňovitě[1]. Délka kampaně je nejčastěji 12 nebo 18 měsíců[2]. Po uplynutí této doby je reaktor odstaven, vyhořelé palivo je vyvezeno do bazénu vyhořelého paliva, kde je dochlazováno 5-10 let, to záleží na typu reaktoru a stupni vyhoření paliva. Zbylé palivo je v aktivní zóně přeskládáno podle stupně vyhoření, tak aby bylo co nejlépe využito, a nakonec je zavezeno čerstvé palivo. Délka pobytu paliva v reaktoru záleží na délce palivového cyklu, nejčastěji však od 3 do 6 let. Podle toho je vyměněna určitá část paliva, při tříletém cyklu se tedy za rok vymění třetina, při pětiletém pětina a při šestiletém jedna šestina paliva. Šestiletý palivový cyklus není tak častý a je již na hranici maximální délky cyklu, které je kvůli limitu obohacení 5 % možné dosáhnout.

Zavezení čerstvého paliva a jeho rozložení v aktivní zóně reaktoru je možné realizovat dvěma metodami. První možnost je čerstvé palivo zavést na okraj aktivní zóny a zbylé palivo podle stupně vyhoření přeskládat tak, že palivové články s větším vyhořením budou blíže ke středu aktivní zóny. Tato metoda je nazývána out-in. Druhou možností je čerstvé palivo zavést více do středu aktivní zóny reaktoru. Tato metoda je nazývána in-out. [2], [3]

3.1 Metoda out-in

Při této metodě je čerstvé palivo zaváženo na okraj aktivní zóny. Mezi hlavní výhody této metody patří rovnoměrnější rozložení výkonu v reaktoru a nižší náročnost návrhu uspořádání aktivní zóny. Nevýhodou ovšem je zvýšený únik aktivních neutronů z aktivní zóny reaktoru. To má kromě nižšího využití paliva nepříznivý vliv na životnost reaktorové nádoby, která pod vlivem ozařování těmito neutrony křehne. [3]

3.2 Metoda in-out

Při této metodě je čerstvé palivo zaváženo více do středu aktivní zóny a nejvíce vyhořelé palivo se přeskládá na okraj aktivní zóny. Tím pádem je zvýšeno využití paliva a je omezen únik aktivních neutronů z reaktoru, to má pozitivní vliv na životnost reaktorové nádoby. Tato palivová vsázka je také proto nazývána jako nízkoúniková. Návrh takové palivové vsázky je ovšem mnohem složitější, protože je nutné palivové články rozmístit tak, aby byl výkon v reaktoru co nejrovnoměrněji rozložen. Rozvojem výpočetní techniky je možné aktivní zónu navrhovat složitějšími a přesnějšími metodami, tím se přispívá k vyšší bezpečnosti provozu elektrárny.

Díky vývoji v oblasti palivových vsázek bylo možné palivové cykly jaderných elektráren prodloužit ze 3 v některých případech až na 6 let. To ovšem přináší nutné zvýšení obohacení paliva, které na začátku kampaně vykazuje přebytek reaktivity, který již nebylo možné

---

[1] U reaktorů jiných typů jako CANDU nebo RBMK je možné provádět výměnu paliva kontinuálně za provozu.
[2] Na světě je několik reaktorů, jejichž délka palivového cyklu je 24 měsíců, jejich počet je v řádu jednotek.

kompenzovat zvýšením koncentrace kyseliny borité v chladící vodě reaktoru. Tento problém je řešen použitím vyhořívajících absorbátorů. [3]

3.3 Vyhořívající absorbátory

Jak již bylo zmíněno výše, úkolem vyhořívajících absorbátorů je snížení přebytečné reaktivity čerstvého paliva na začátku kampaně.

Jsou to takové prvky, jejichž účinný průřez pro absorpci neutronů je velký, ale po absorpci neutronu je tak malý, že už další neutrony nezachytává. Pro lehkovodní reaktory se v praxi používají dva prvky, Gadolinium a Bór[3]. Gadolinium se používá ve dvou izotopech ^{155}Gd a ^{157}Gd. Bór se používá v izotopu ^{10}B.

Existují dva způsoby použití vyhořívajících absorbátorů v aktivní zóně reaktoru, blokové a integrální řešení. V blokovém řešení jsou vyhořívající absorbátory jako celé proutky nebo dokonce jako soubory. V integrálním řešení je vyhořívající absorbátor buďto nanesen na povrch palivové tabletky nebo může být přimíchán přímo do paliva při výrobě palivové tabletky. [3], [7]

3.4 Tlakovodní reaktory (PWR a VVER)

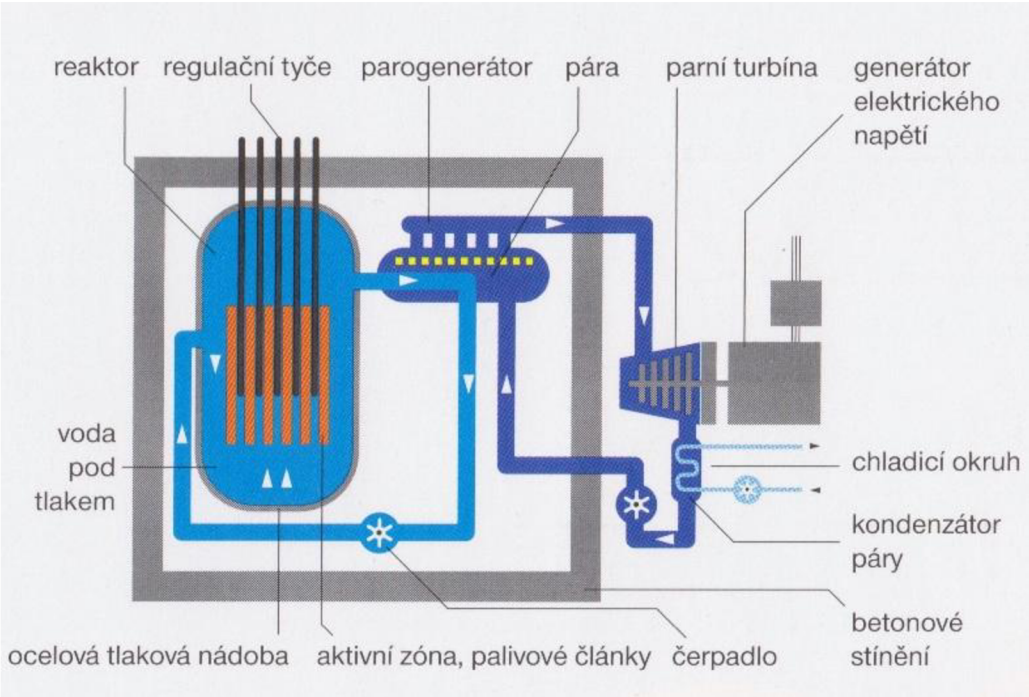
Tlakovodní reaktor je nejrozšířenějším typem reaktoru na světě. Byl vyvinut v USA a původně měl být určen pro pohon jaderných ponorek. V roce 1957 byla uvedena do provozu první elektrárna s tímto typem reaktoru, Shippingport v USA. První komerční elektrárna byla uvedena do provozu v roce 1961, Yankee v USA. Tato elektrárna disponovala elektrickým výkonem 134 MW.

První elektrárnou s východní koncepcí tlakovodního reaktoru VVER (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor), která byla připojena k síti, byla novoroněžská jaderná elektrárna. Byla připojena koncem roku 1964 a dosahovala elektrického výkonu 210 MW. [2]

Elektrárna s tímto typem reaktoru je provozována jako dvouokruhová, to znamená, že k výrobě páry pro pohon turbíny je zapotřebí parogenerátor. V tomto případě se na turbínu nedostane radioaktivní pára. Někdy může být mezi primární a sekundární okruh vložen ještě jeden okruh z důvodu zvýšení bezpečnosti.

Palivem tohoto typu reaktoru je mírně obohacený uran ve formě tabletek z oxidu uraničitého UO_2, ze kterých jsou poskládány palivové proutky a z proutků potom palivové články. Výměna části paliva probíhá kampaňovitě jednou za rok nebo za rok a půl, podle délky palivového cyklu elektrárny. Moderátorem i chladivem tohoto typu reaktoru je lehká voda.

[3] U reaktorů typu RBMK se jako vyhořívající absorbátor používá Erbium



Obr. 3-1 Zjednodušené schéma tlakovodního reaktoru [5]

Západní typ tlakovodního reaktoru PWR a východní typ VVER se od sebe liší některými konstrukčními řešeními. Oba typy se realizují jako dvouokruhové elektrárny, pára pro pohon turbíny je vyrobena v parogenerátoru, ten odděluje primární a sekundární okruh elektrárny. Oba typy se liší například uspořádáním primárního okruhu. Reaktor typu PWR má parogenerátory vertikální. Reaktor typu VVER využívá parogenerátory horizontální. Dalším rozdílem je počet chladících smyček. Reaktory typu VVER mívají čtyři nebo šest chladících smyček. Reaktor VVER-440 v jaderné elektrárně Dukovany má šest chladících smyček, reaktor VVER-1000 v jaderné elektrárně Temelín má smyčky čtyři. Reaktory typu PWR se realizují s dvěma, třemi nebo čtyřmi chladícími smyčkami.

Tyto dva typy reaktorů se také liší v uspořádání aktivní zóny. Každý využívá palivové články odlišné konstrukce. Palivové články reaktoru PWR jsou čtvercového průřezu a nemají vnější obálku, reaktor VVER využívá palivové články o šestihranném průřezu a pro reaktory středních výkonů mají vnější obálku, pro reaktory vyšších výkonů, jako je například VVER-1000 požívaný v elektrárně Temelín, nemají vnější obálku a jejich konstrukce je zpevněná pomocí tzv. úhelníků. [2], [8]

3.4.1 **Palivový cyklus PWR**

Jako zástupce tohoto typu reaktoru byla zvolena jaderná elektrárna ve Velké Británii Sizewell B. Stavba této elektrárny započala v roce 1987 a měla být spuštěna v roce 1995. Její spuštění se ovšem o rok opozdilo. Elektrárna byla vystavěna podle standardizovaného projektu firmy Westinghouse SNUPPS (Standardized Nuclear Unit Power Plant System). Zde tato Společnost nainstalovala stejný řídicí systém jako v Temelínské elektrárně. Tato elektrárna disponuje jedním jaderným reaktorem typu PWR a maximálním elektrickým výkonem 1200 MW. [9]

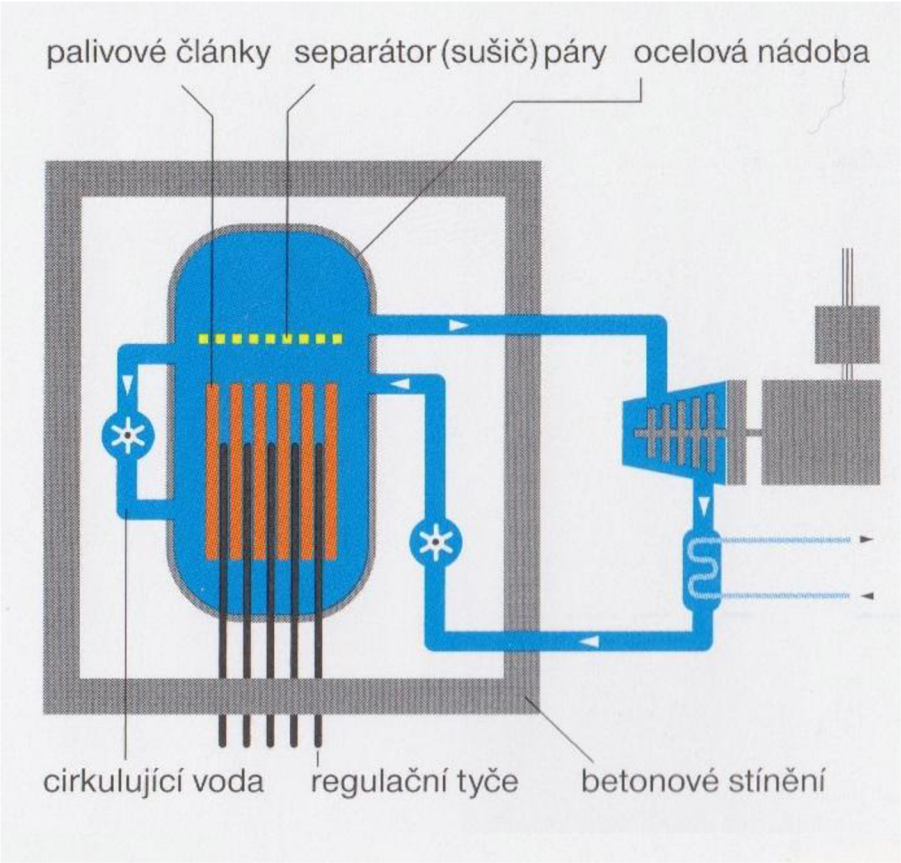
Elektrárna se provozuje v 18-ti měsíčním palivovém cyklu. To znamená, že elektrárna běží nepřetržitě 18 měsíců a při následné plánované odstávce se vymění přibližně jedna třetina paliva. V tomto cyklu běží i většina reaktorů PWR v Americe. [3], [10]

3.4.2 Palivový cyklus VVER

Zástupcem tohoto typu reaktoru byla vybrána ruská jaderná elektrárnu Kalinin, která má v provozu tři bloky s reaktory typu VVER-1000. Elektrárně dodává palivo ruská společnost TVEL a bylo zde úspěšně v provozu palivo, jehož zdokonalenou verzi tato ruská společnost dodává i do jaderné elektrárny Temelín. Díky palivu TVSA od firmy TVEL elektrárna mohla přejít na delší, čtyřletý palivový cyklus. Každým rokem je tedy vyměněna přibližně jedna čtvrtina paliva podobně jako v elektrárně Temelín. [11]

3.5 Lehkovodní varné reaktory (BWR)

Varný reaktor je druhým nejpoužívanějším typem reaktoru na světě. Elektrárna s tímto typem reaktoru je provozována jako jednookruhová, to znamená, že pára pro pohánění turbíny vzniká přímo v reaktorové nádobě a není tedy potřeba parogenerátor. Pára se hromadí v horní části reaktoru, kde se z ní vyseparují kapičky vody. Takto vysušená pára je přivedena rovnou do turbíny. Což je výhodou, protože k výrobě páry není nutný parogenerátor, ale zároveň i nevýhodou, protože radioaktivní pára se dostává až na turbínu.



Obr. 3-2 Zjednodušené schéma varného reaktoru [5]

Palivem varných reaktorů je stejně jako u tlakovodních reaktorů mírně obohacený uran ve formě tabletek z oxidu uraničitého UO_2, které jsou uspořádány do palivových proutků a ty pak do palivových souborů. Oproti tlakovodním reaktorům je zde ovšem nižší obohacení paliva.

Palivový článek varného reaktoru je čtvercového průřezu stejně jako u reaktorů PWR. Je složen z palivových tyčí kruhového průřezu ze slitiny zirkonia. Palivová tyč je naplněna palivovými tabletami a nahoře jsou tablety stlačeny pružinou podobně jako u reaktoru PWR nebo VVER. Průměr palivových tyčí je ovšem oproti tlakovodním reaktorům větší. V aktivní zóně

BWR je tedy měrný výkon podstatně menší než u reaktorů PWR (asi 2/3), zatímco lineární výkon palivového článku je podstatné větší. [9]

Aktivní zóna je složena ze základních modulů. Jeden základní modul je složen ze čtyř palivových článků, mezi nimiž je umístěna absorpční tyč ve tvaru kříže. [8], [9]

3.5.1 **Palivový cyklus BWR**

Jako zástupce tohoto typu reaktoru byla vybrána švédská jaderná elektrárna Forsmark. Elektrárna se nachází u pobřeží několik kilometrů severně od města Öregrund a disponuje třemi varnými reaktory, dvěma o výkonu 1000 MW a jedním o výkonu 1200 MW. V současné době je celkový výkon elektrárny přibližně 3140 MW, tento výkon se plánuje v budoucnosti zvýšit o 410 MW. [12]

Jaderná elektrárna Forsmark pracuje ve 12-ti měsíčním, pětiletém palivovém cyklu. Každý rok se tedy zaváží přibližně pětina čerstvých palivových souborů. [13]

4 JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN

4.1 Primární okruh

Primární okruh jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem zahrnuje reaktor, hlavní cirkulační čerpadla, parogenerátory, hlavní cirkulační potrubí a kompenzátor objemu. [7], [14]

4.2 Tlakovodní reaktor

Tlakovodní reaktor je energetické zařízení, kde dochází k řízené štěpné reakci a přeměně uvolněné energie na tepelnou. V jaderné elektrárně Temelín je instalován heterogenní energetický tlakovodní reaktor VVER-1000 typ 320. Reaktor se skládá z těchto hlavních částí:

- tlaková nádoba reaktoru,
- horní blok (zahrnuje víko reaktoru, nátrubky pro vyvedení vnitroreaktorového měření, tlaková pouzdra s bloky elektromagnetů lineárních krokových pohonů regulačních orgánů a ocelovou konstrukci horního bloku),
- vnitřní vestavby (zahrnují šachtu aktivní zóny, blok ochranných trub a plášť aktivní zóny),
- aktivní zóna (obsahuje palivové soubory, komponenty aktivní zóny, tj. regulační orgány, vyhořívající absorbátory, neutronové zdroje a instrumentaci pro měření neutronového toku),
- elektrozařízení a čidla kontroly teploty reaktoru.

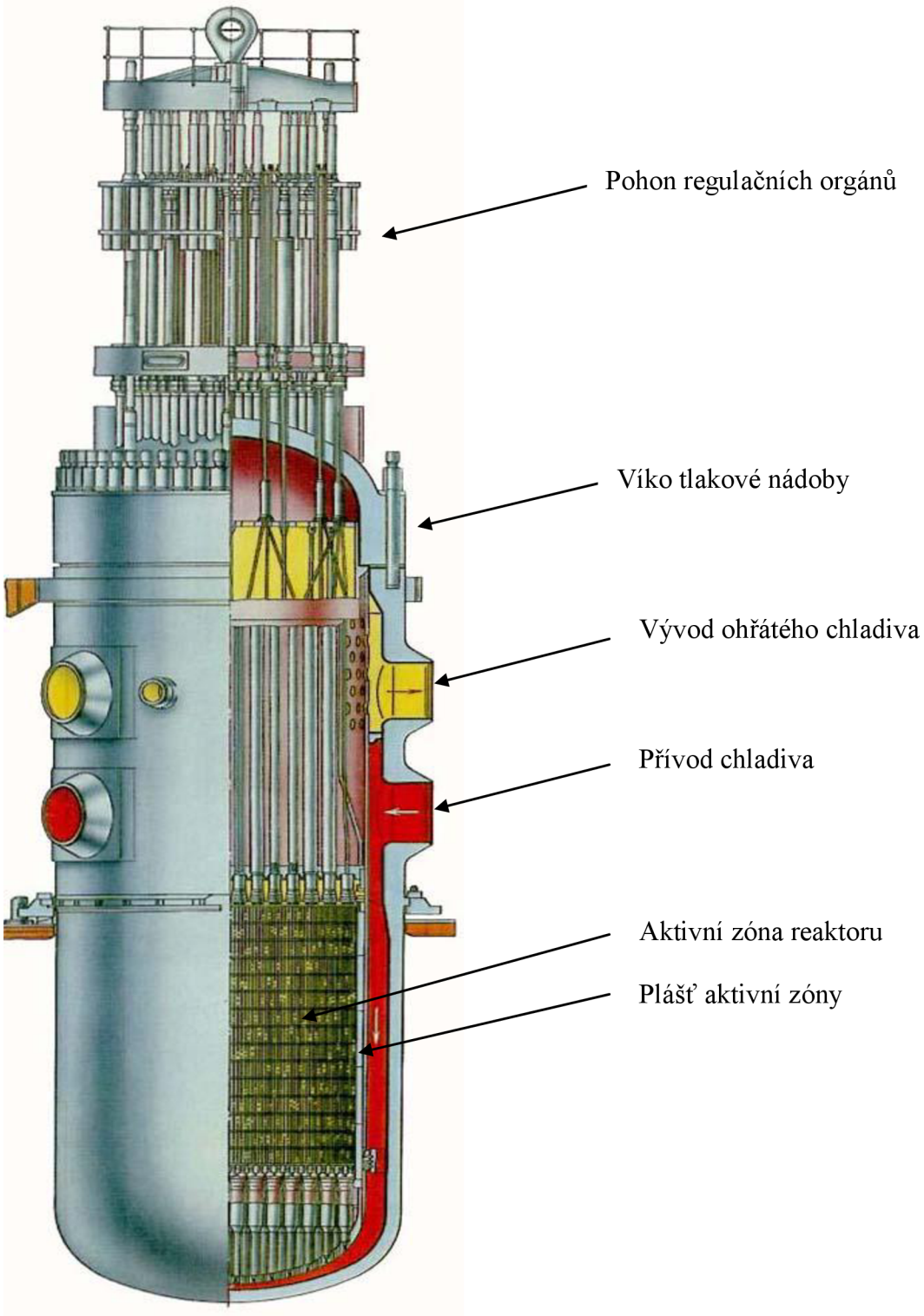
Reaktor je umístěný v betonové šachtě, jejíž hlavním účelem je stínění ionizujícího záření, další funkcí je teplená izolace a uchycení reaktoru. Tlaková nádoba reaktoru slouží k umístění vnitřních částí reaktoru a zabezpečuje potřebné parametry uvnitř reaktoru, především v aktivní zóně reaktoru. Tlaková nádoba byla vyrobena firmou Škoda JS Plzeň pomocí speciální technologie, která má zajistit dostatečnou radiační odolnost použitého materiálu. Je vysoká 10,9 m a má vnější průměr 4,5 m. Stěna tlakové nádoby je vyrobena z velmi kvalitní oceli a její tloušťka je přibližně 20 cm. Nádoba je navržena tak, aby odolala tlaku 17,6 MPa při teplotě 350 °C, ale provozní tlak i teplota dosahují nižších hodnot. Provozní tlak je 15,7 MPa při teplotách 290 °C až 320 °C. Tlaková nádoba je neustále sledována z hlediska křehnutí materiálu, ke kterému dochází vlivem ozařování neutrony. K tomuto účelu slouží svědečné vzorky materiálu, které jsou neustále kontrolovány a měřeny.

Reaktor VVER-1000 typ 320 má 4 chladící smyčky, proto na tlakové nádobě najdeme 8 nátrubků na připojení primárního potrubí a 4 nátrubky pro připojení hydroakumulátorů, které v případě havárie zaplaví aktivní zónu.

Víko tlakové nádoby je součástí horního bloku reaktoru a je k tlakové nádobě připevněno pomocí hydraulických předepjatých svorníků a utěsněno dvěma kovovými kroužky. Těsnost tohoto spoje je neustále kontrolována. V horním bloku jsou dále umístěny pohony regulačních orgánů a jsou zde vývody z vnitroreaktorových měření.

Vnitřní vestavba reaktoru je složena z několika hlavních částí. Těmito částmi jsou myšleny šachta aktivní zóny reaktoru, boční plášť a blok ochranných trub. Šachta aktivní zóny reaktoru slouží pro rozmístění palivových souborů s přesným krokem a k usměrnění toku chladiva. Je válcového tvaru s perforovaným eliptickým dnem, na jehož vnitřním osazení je uložena distanční deska s podpěrami pro umístění palivových souborů. Děrované dno šachty slouží k usměrnění

a ke zrovnoměrnění proudu chladiva aktivní zónou reaktoru. Válcová část šachty je v horní části nad výstupními hrdly zakončena přírubou, přičemž část mezi touto přírubou a oddělovacím prstencem je perforovaná, aby chladivo ohřáté v aktivní zóně mohlo procházet do výstupních nátrubků. Mezi tlakovou nádobou a šachtou je vytvořen prostor, kterým proudí chladivo od vstupních nátrubků na dno tlakové nádoby, prochází eliptickým dnem šachty a postupuje vzhůru podél palivových souborů, kde se ohřívá. [7], [14]

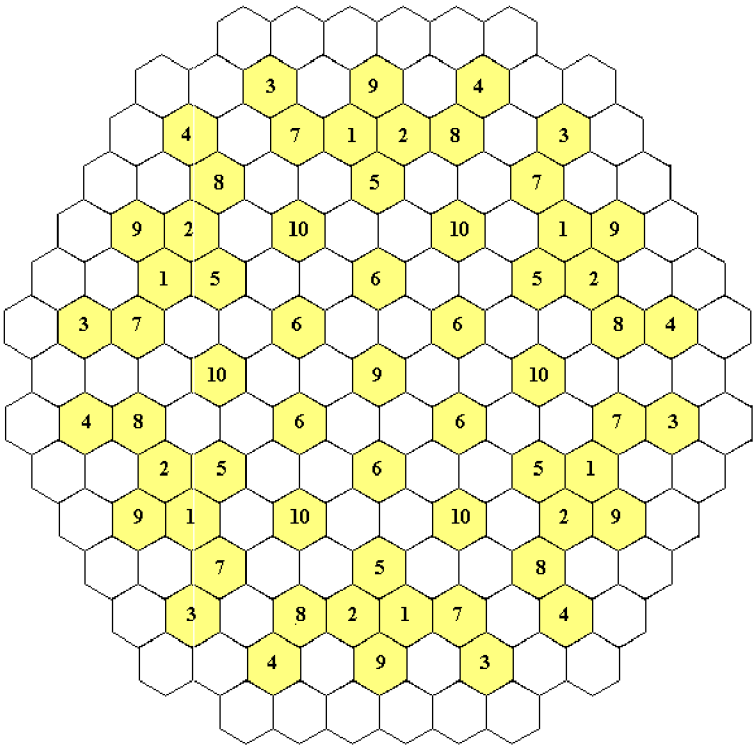


Obr. 4-1 Schéma reaktoru VVER-1000 [14]

4.2.1 **Aktivní zóna**

V aktivní zóně jaderného reaktoru probíhá řízená štěpná řetězová reakce, při které je uvolňována tepelná energie. Tato energie je prostřednícím chladiva primárního okruhu odvedena do parogenerátorů, kde se vyrobí pára pro pohon turbosoustrojí.

Aktivní zóna reaktoru VVER-1000 je vysoká 3,68 m a její průměr je 3,16 m, je složena ze 163 palivových souborů a 61 svazkových regulačních orgánů, které se zasouvají do vodících trubek vybraných palivových souborů. Všechny palivové soubory mají stejnou konstrukci, takže regulační orgány mohou být zasunuty do každého z nich. Palivové soubory jsou v aktivní zóně rozmístěny s přesným krokem 236 mm. Rozložení palivových souborů a regulačních orgánů je naznačeno na Obr. 4-2. Regulační orgány jsou rozděleny do 10 skupin, přičemž skupiny 1-6 jsou určeny pro rychlé nouzové ostavení reaktoru a skupiny 7-10 slouží k řízení výkonu reaktoru spolu s určitým obsahem kyseliny borité v chladivu primárního okruhu. Koncentrace kyseliny borité se s postupným vyhořiváním aktivní zóny snižuje. [7], [14]



Obr. 4-2 Rozložení aktivní zóny reaktoru VVER-1000 [14]

5 PALIVA POUŽÍVANÁ NA ETE

Od počátku provozu bylo na ETE provozováno palivo firmy Westinghouse. Z počátku provozu měly palivové články tohoto dodavatele problémy s konstrukční pevností a docházelo k nadměrnému kroucení, ohýbání a radiačnímu růstu palivových článků. Často také docházelo k netěsnostem palivových proutků. Na základě provozních zkušeností byly palivové články modifikovány, zejména byl pozměněn materiál z původního Zircaloy-4 na ZIRLO^{TM}, který se požívá na instrumentační trubky a také na pokrytí palivových proutků. [16],0

Skupina ČEZ se přesto rozhodla ke změně dodavatele paliva a podepsala smlouvu s ruským výrobcem TVEL. Palivo firmy Westinghouse se mělo původně nahrazovat ruským palivem postupně a obě paliva měla v reaktoru pracovat společně. Nakonec se od tohoto plánu upustilo a v obou blocích elektrárny se vyměnilo všechno palivo najednou. V roce 2010 na prvním bloku a v roce 2011 na druhém bloku. [18]

5.1 Palivové soubory VVANTAGE 6

Palivové soubory VVANTAGE 6 byly vyvinuty společností Westinghouse pro reaktory VVER. Toto palivo bylo poprvé zavezeno v červenci 2000 a v reaktoru fungovalo 10 let, až do doby kdy došlo ke změně dodavatele a palivo začal dodávat ruský výrobce TVEL.

Palivové soubory VVANTAGE 6 fungovaly v prvním palivovém cyklu bez problémů. V druhém palivovém cyklu se začaly projevovat problémy. Docházelo k poškozování povlaku palivových proutků o distanční mřížku (grid-to-rod fretting) a také docházelo k ohýbání (bow), kroucení (twist) a prodlužování (growth) palivových souborů.

Na základě těchto zkušeností byly palivové články vyvíjeny, byly zlepšovány jejich provozní parametry. Došlo například ke změně materiálu z původního Zircaloy-4 na ZIRLO^{TM}, jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly. Jednotlivé vývojové specifikace paliva nesly následující označení: T1, T2, Phase0 a Phase1X, k hlavním změnám došlo především při nasazení posledních dvou fází. [16]

Specifikace T1 byla zavezena v první v palivové vsázce pro první blok. Pro druhý blok a pro výměnu paliva v obou blocích byla nasazena specifikace T2 až do roku 2006.

Specifikace Phase0 byla nasazena v roce 2006 a přinesla úpravy v oblasti horní hlavice palivového souboru a došlo k vyztužení v oblasti hydraulického tlumiče vodících trubek. [20]

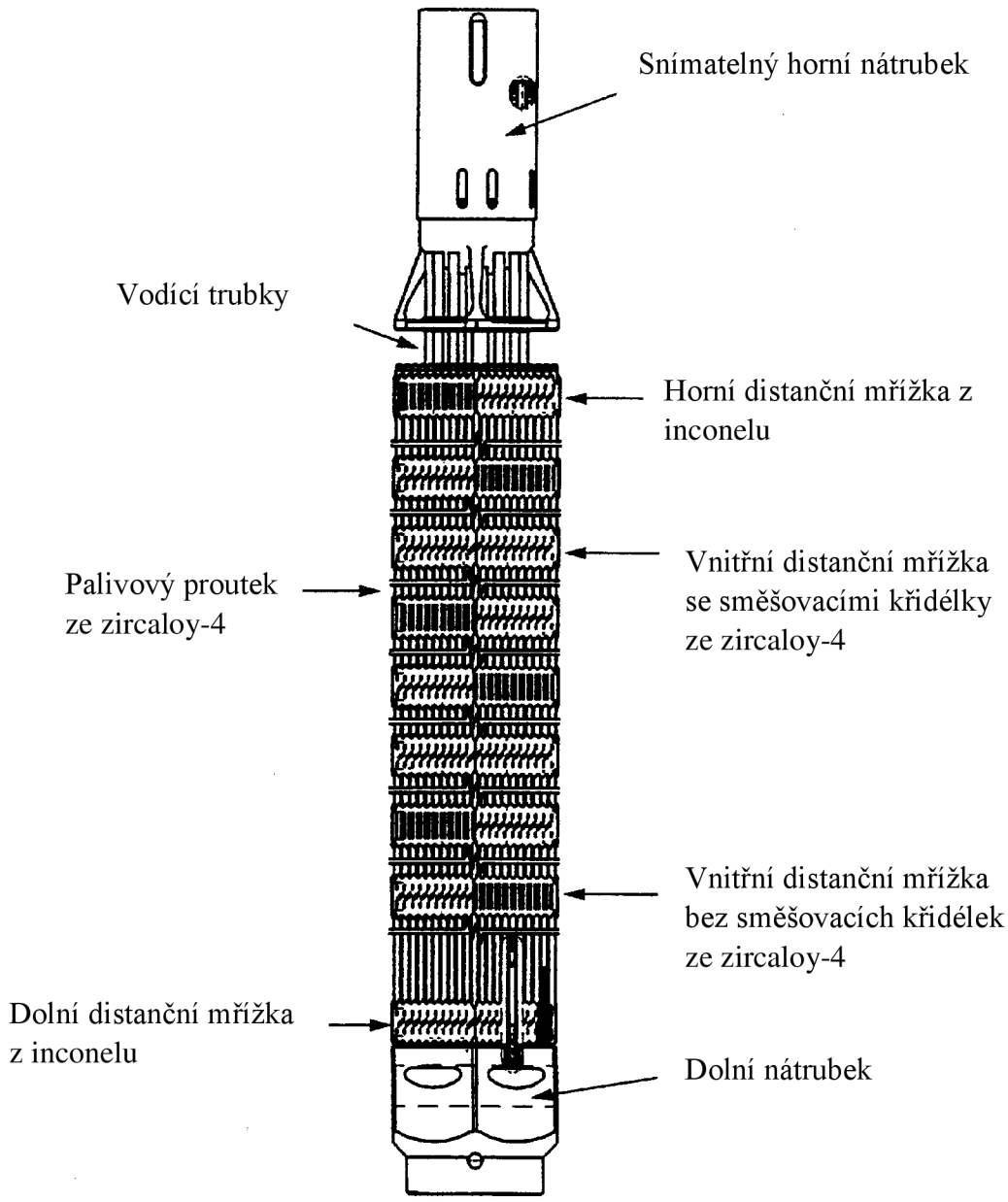
Specifikace Phase1X byla nasazena v roce 2007 a přinesla již zmiňovanou změnu materiálu pokrytí palivových proutků a vodící trubky na ZIRLO^{TM}. Bylo zlepšeno propojení distančních mřížek s vodícími trubkami, tím se zpevnila celá konstrukce paliva. Také došlo k nahrazení předposlední distanční mřížky, která byla vyrobena ze slitiny Zircaloy-4, modifikovanou inconelovou mřížku. Byla upravena i přítlačná síla pružinek okrajových buněk horní inconelové mřížky. [20]

5.1.1 Palivový soubor

Palivový soubor VVANTAGE 6 je sestaven z 312 palivových proutků v hexagonálním seskupení. Uprostřed palivového souboru se nachází centrální trubka, do které se umisťují senzory pro vnitřní měření. V každém palivovém souboru se nachází 18 vodících trubek, do kterých mohou být zasunuty regulační klastry, svazky s neutronovými zdroji nebo svazky s diskrétními absorbátory. Záleží na tom, v jaké části aktivní zóny bude soubor umístěn. Vodící trubky jsou pevně spojeny s distančními mřížkami a tvoří tak nosnou konstrukci palivového souboru. Konstrukce palivového souboru VVANTAGE 6 je zobrazena na Obr. 5-1.

Distanční mřížky paliva VVANTAGE 6 tvoří kosočtvercové uspořádání vzájemně spojených pásků, které udržují boční vzdálenosti mezi palivovými proutky. Pásky mřížky mají pružinky a výstupky, které svírají a podpírají palivové proutky. Vnitřní mřížky jsou opatřeny směšovacími křidélky, určenými pro zintenzivnění přestupu tepla z paliva do chladiva. Horní a dolní mřížka a nejspodnější vnitřní mřížka směšovací křidélka nemají.

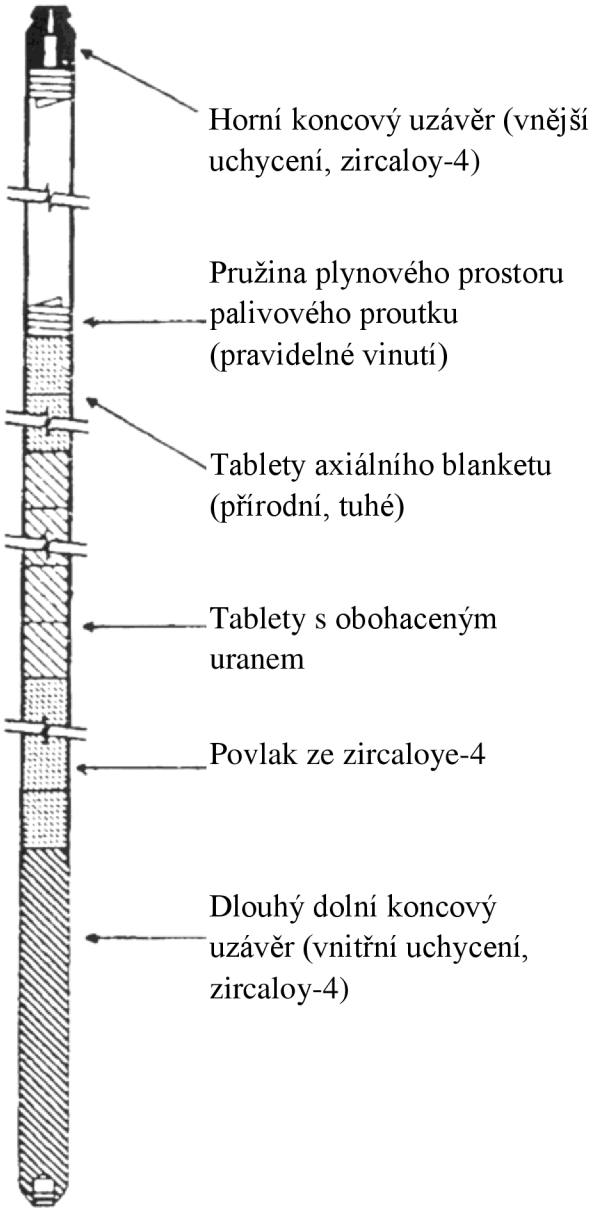
Palivový soubor VVANTAGE 6 zahrnuje také snímatelný horní nátrubek a snímatelný dolní nátrubek (usnadňující demontáž palivového souboru). Oba nátrubky, horní i dolní, jsou vyrobeny z nerezové oceli typu 304. Dolní nátrubek slouží jako spodní konstrukční element palivového souboru a směruje rozdělení průtoku chladiva do souboru. Horní nátrubek souboru slouží jako vrchní konstrukční element palivového souboru a tvoří částečné ochranné pouzdro pro svazek regulačních proutků nebo jiné komponenty AZ. [14]



Obr. 5-1 Konstrukce palivového souboru VVANTAGE 6 [14]

5.1.2 **Palivový proutek**

Palivové proutky jsou tvořeny válcovými tabletkami oxidu uranu UO_2 naskládanými v trubičce ze zirkoniové slitiny zircaloy-4. Trubička je na obou koncích zazátkována a natlakována heliem a obě zátky jsou připevněny těsným svarem. Palivový proutek může obsahovat axiální blanket, je to sloupec palivových tabletek z přírodního uranu. Blanket může být na obou koncích palivového proutku a jeho úkolem je snížit axiální únik neutronů a zvýšit tím tak využití paliva. Konstrukce palivového proutku je naznačena na Obr. 5-2.



Obr. 5-2 Konstrukce palivového proutku VVANTAGE 6 [14]

Palivové soubory VVANTAGE 6 mohou obsahovat typ palivových proutků, které obsahují vyhořívající absorbátor. V tomto případě je vyhořívající absorbátor realizován tenkým povlakem diboridu zirkonia ZrB_2 na povrchu palivových tabletek. Vyhořívající absorbátor může být také realizován jako diskrétní, kdy se zasouvá do vodících trubek určitých palivových souborů.

Palivové proutky jsou během výroby vnitřně tlakovány heliem, aby se snížila deformace povlaku tečením (creep down) za provozu, a tím prodloužila únavová životnost. Palivové proutky v palivových souborech VVANTAGE 6 obsahují volný prostor (plenum) nad palivovými tabletkami, dovolující zvýšenou produkci štěpných plynů v důsledku zvýšeného vyhoření paliva. [14]

5.2 Palivové soubory TVSA-T

Palivové soubory TVSA-T byly vyvinuty speciálně pro jadernou elektrárnu Temelín tak, aby bylo toto palivo kompatibilní s původním palivem VVANTAGE 6 a bylo možné provozovat reaktor s oběma palivy současně.

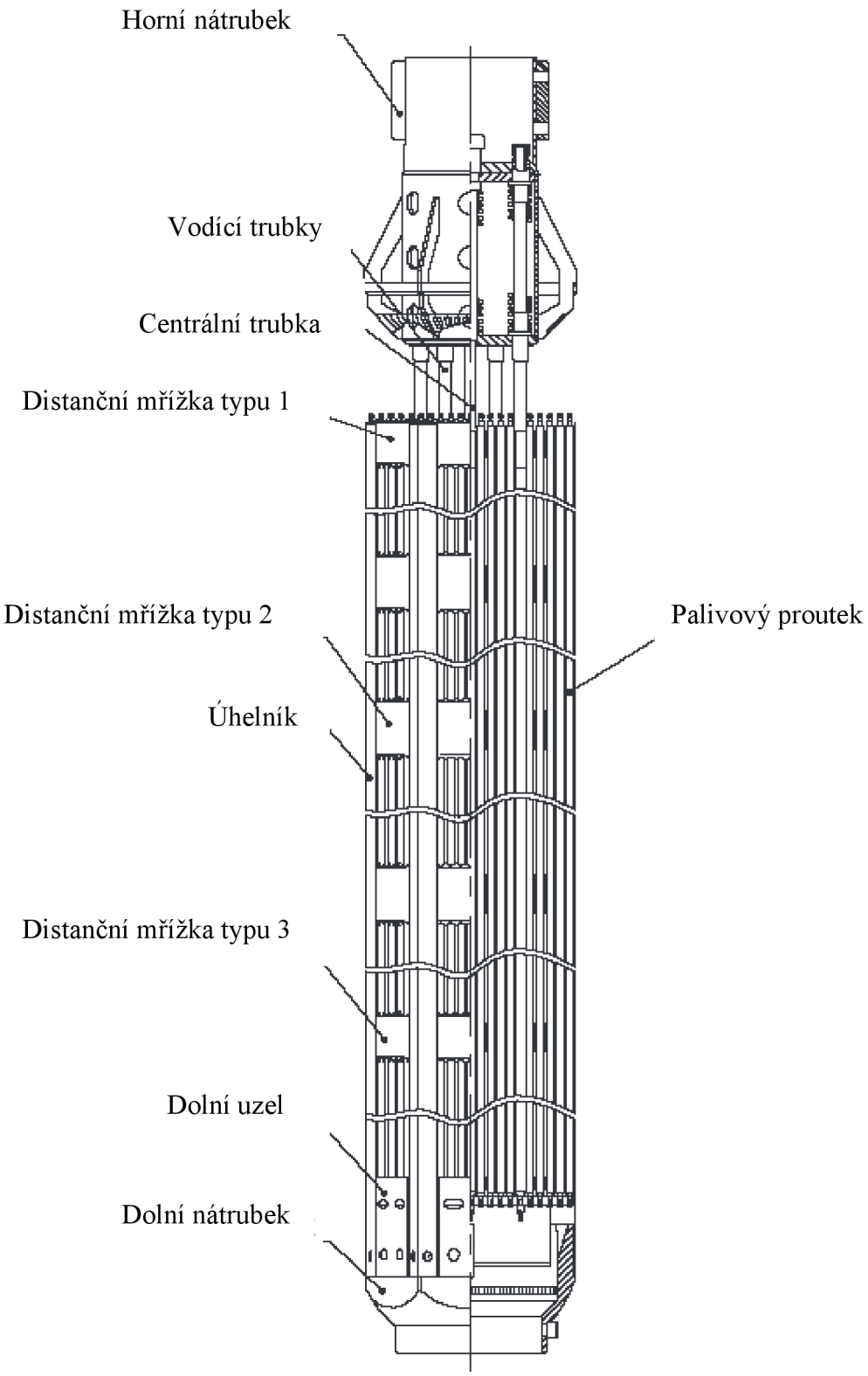
Jedná se v podstatě o upravené zdokonalené ruské palivo TVSA pro reaktory VVER-1000. Toto palivo se vyznačuje zvýšenou provozní spolehlivostí a odolností vůči deformacím díky mnoha novým konstrukčním vylepšením (včetně tzv. výztužných úhelníků, mísicí mřížky a integrovaného záchytného filtru v koncové části souboru). V souborech se používá uran-gadoliniové palivo, které zajišťuje možnost regulace výkonu JE (neboli provoz se změnou výkonu reaktoru). 0

Palivo TVSA má za sebou úspěšný provoz na Kalininské JE v Rusku od roku 1998. V současnosti se více než 60 procent reaktorů VVER-1000 (celkem 16 energetických bloků ve třech zemích: Rusku, Ukrajině, Bulharsku) provozuje s palivem TVSA. Toto palivo umožňuje zavádět moderní palivové cykly a zkrátit dobu potřebnou pro výměnu paliva v aktivní zóně reaktoru, a tím i dobu potřebnou pro odstavení bloku. Kromě toho umožňuje zmenšit objem použitého paliva a prostor pro jeho uskladnění. 0

5.2.1 **Palivový soubor**

Palivový soubor TVSA-T se skládá z 312 palivových proutků, které jsou uspořádány do trojúhelníkovité mříže s roztečí 12,75 mm a umístěny v nosném skeletu šestiúhelníkového tvaru. Ve středu palivového souboru se nachází nosná trubka ze slitiny zirkonia. V této nosné trubce jsou umístěny samonapájecí detektory a slouží k nesení distančních mříží. V palivovém souboru je rozmístěno 18 trubiček, ve kterých se mohou pohybovat klastrové regulační tyče, svazky s neutronovými zdroji nebo svazky s vyhořívajícími absorbátory, to záleží na tom, ve které části aktivní zóny bude palivový soubor umístěn. Nosný skelet palivového souboru je tvořen z 6 úhelníků, 18 vodicích trubek, centrální trubky, 8 distančních mřížek a spodního opěrného uzlu.

V palivovém souboru jsou tři druhy distančních mřížek. Horní a dolní distanční mřížky jsou umístěny při koncích palivového souboru. Mezi nimi je rovnoměrně rozmístěno šest kombinovaných distančních mřížek. Distanční mřížky mají za úkol udržet palivové proutky ve správné poloze. Palivový soubor TVSA-T je na obou koncích zakončen speciálními nátrubky. Horní nátrubek je odnímatelný a umožňuje tak kontrolu palivových proutků a případně jejich výměnu při netěsnosti. Spodní nátrubek slouží především k usměrnění toku chladicí kapaliny palivovým článkem. Konstrukce palivového souboru je naznačena na Obr. 5-3. [7]

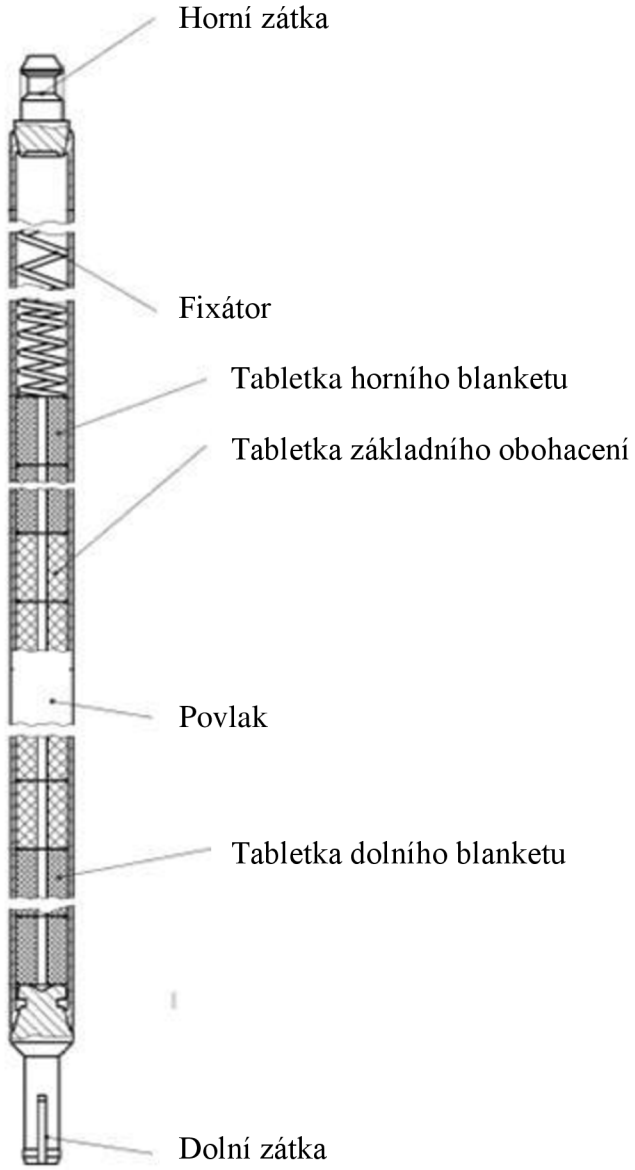


Obr. 5-3 Konstrukce palivového souboru TVSA-T [21]

5.2.2 Palivový proutek

Palivové proutky jsou vyrobeny z trubek ze zirkoniové slitiny a při výrobě jsou natlakovány heliem. Na obou koncích je proutek hermeticky uzavřen. V horní části palivové tyče je umístěna pružina, která udržuje palivové tabletky ve správné poloze. Tento prostor v horní části palivového proutku umožňuje zvýšenou produkci plynných štěpných produktů při vyšším vyhoření paliva. V horní a dolní části palivového článku jsou palivové tabletky s nižším obohacením, tím se sníží axiální únik neutronů a zvýší se využití paliva.

V palivovém souboru se vyskytují dva typy palivových proutků: palivové proutky typu tvel a tveg. Palivové proutky typu tvel se skládají z palivových tabletek obohaceného uranu ve formě UO_2. Palivové proutky typu tveg mohou být použity v libovolném palivovém souboru. Jedná se o palivové proutky, kde je v palivových tabletách z oxidu uranu UO_2 přimíchán oxid gadolinia Gd_2O_3, který slouží jako vyhořívající absorbátor. [7]



Obr. 5-4 Konstrukce palivového proutku tvel (tveg) [21]

Palivové soubory TVSA-T mohou být vyrobeny s různými druhy obohacení a s různým počtem proutků tveg, které obsahují vyhořívající absorbátor. V následující tabulce je uveden přehled typů palivových souborů TVSA-T pro první a referenční palivovou vsázku.

Tab. 5-1 Typy palivových souborů TVSA-T pro první a referenční palivovou vsázku [21]

Označení TVSA-T	**Střední nominální obohacení paliva TVSA-T, hmot. %**		**Nominální obohacení proutků tvel v TVSA-T, počet ks/hmot. %**		**Počet proutků tveg / obohacení hmot.% / zastoupení Gd_2O_3 hmot. %**	**Číslo obrázku s průřezem TVSA-T**
	uvážení blanketu		typ proutku			
	ne	ano	1	2		
A13	1,3	1,3	312 / 1,3	-	-	Obr. A-1
A20	2,00	1,89	312 / 2,0	-	-	Obr. A-1
A30E9	2,98	2,82	303 / 3,0	-	9 / 2,4 / 5	Obr. A-3
P36E9	3,53	3,30	243 / 3,6	60 / 3,3	9 / 3,3 / 5	Obr. A-2
P40E9	3,90	3,64	243 / 4,0	60 / 3,6	9 / 3,3 / 5	Obr. A-2
A40E6	3,99	3,72	306 / 4,0	-	6 / 3,3 / 5	Obr. A-4
A47G9	4,67	4,29	303 / 4,7	-	9 / 3,6 / 5	Obr. A-5
A49E6	4,92	4,58	306 / 4,95	-	6 / 3,6 / 5	Obr. A-4

Tab. 5-2 Porovnání obou paliv [20],[21]

Charakteristiky	**VVANTAGE 6**	**TVSA-T**
Vnější průměr povlaku	9,144 mm	9,1 mm
Vnitřní průměr povlaku	8 mm	7,73 mm
Materiál povlaku	Zr-4 nebo ZIRLO™	E110 (Zr - 1%Nb)
Tabletka	Plná	S vnitřním otvorem
Výška sloupce tabletek	3630 mm	3680 mm
Počet proutků	312	312
Délka proutku	3889 mm	3952 mm
Krok rozmístění proutků	12,75 mm	12,75 mm
Materiál centrální trubky	Zr-4 nebo ZIRLO™	E635
Vnější průměr centrální trubky	12,6 mm	13 mm
Materiál vodících trubek	Zr-4	E635

Poznámka: Slitina E635 – Zr + 1% Nb + 1,2% Sn + 0,4% Fe

6 VÝVOJ PALIVOVÉHO CYKLU ETE

V původních plánech projekt elektrárny počítal s ruským palivem i technologií řízení aktivní zóny reaktoru. Palivový cyklus s tímto palivem byl plánovaný jako tříletý. Z důvodů zlepšení ekonomiky provozu a zvýšení efektivnějšího využití paliva skupina ČEZ vypsala tendr na dodávku modernizovaného systému řízení i paliva. V tomto tendru zvítězila americká společnost Westinghouse. [20]

Od uvedení elektrárny do provozu tedy dodávala palivo tato americká společnost, v roce 2006 skupina ČEZ, která provozuje elektrárnu Temelín, podepsala kontrakt na dodávku paliva od roku 2010 s ruskou společností TVEL, která dodává jaderné palivo i do druhé naší jaderné elektrárny Dukovany. [18], [19]

Palivový cyklus elektrárny Temelín byl od počátku provozu plánovaný jako čtyřletý, to znamená, že každým rokem by se měla vyměnit přibližně čtvrtina paliva v reaktoru. První rok provozu s palivem VVANTAGE 6 společnosti Westinghouse nebyly žádné problémy, během dalšího provozování paliva v reaktoru však začalo docházet k netěsnostem palivových proutků, k nadměrným mechanickým deformacím palivových souborů a některé palivové soubory musely být vyvezeny předčasně. [16], [22]

S netěsnostmi palivových proutků počítá ve svém projektu každá jaderná elektrárna. Netěsnosti se kontrolují měřením aktivity chladicí vody reaktoru a nesmí být překročena maximální hodnota celkové aktivity ***$3{,}7.10^{9}$ Bq/l***. Pro vyhledání a kontrolu netěsného paliva se používají dva systémy:

On-line sipping - provádí kvalitativní měření a zjišťuje, který z palivových souborů je poškozen. Systém je založen na plynové metodě kontinuálních změn v koncentraci ^{133}Xe.

Off-line sipping - provádí kvantitativní měření poškozeného palivového souboru a slouží ke stanovení rozsahu poškození. Měření se provádí na palivovém souboru uzavřeném ve speciálním palivovém pouzdře. [16]

V následující tabulce (Tab. 6-1) jsou uvedeny naměřené hodnoty aktivity primárního okruhu mezi léty 2003 a 2006. Z této tabulky vyplývá, že i při problémech s netěsnostmi nebyla překročena maximální povolená hodnota aktivity.

Tab. 6-1 Hodnoty aktivity v primárním okruhu [16]

Rok / Blok	1. Blok	2. Blok
2003	$5{,}9\ 10^{6}$ Bq/l	$2{,}7\ 10^{6}$ Bq/l
2004	$2{,}4\ 10^{6}$ Bq/l	$7{,}0\ 10^{6}$ Bq/l
2005	$3{,}6\ 10^{6}$ Bq/l	$3{,}3\ 10^{6}$ Bq/l
2006	$6{,}3\ 10^{6}$ Bq/l	$6{,}4\ 10^{6}$ Bq/l

Jaderná elektrárna Temelín je jedinou elektrárnou s reaktorem typu VVER, která je schopná opravy palivových souborů. V následující tabulce (Tab. 6-2) je přehled odhalených a opravených netěsných palivových proutků a souborů během prvních pěti palivových cyklů.

Tab. 6-2 Počty zjištěných netěsných palivových souborů [16]

Cyklus	**Blok**	
	1. Blok	2. Blok
1. Palivový cyklus	0	0
2. Palivový cyklus	1+1 podezřelý,(neprokázaný) 2 PS vyvezeny	3 PS / 7 PP, opraveny 1 PS vyvezen
3. Palivový cyklus	5 PS, z toho 1 PS opraven, 4 PS vyvezeny	10 PS, z toho u 5 PS nezjišťován rozsah poškození, u 5 PS identifikováno 9 netěsných proutků
4. Palivový cyklus	6 PS, z toho u 5 PS nezjišťován rozsah poškození, u 1 PS identifikován 1 netěsný proutek	5 PS, z toho 2 PS opraveny, identifikováno po 1 netěsném proutků 3 PS vyřazeny, nezjišťován rozsah poškození
5. Palivový cyklus	6 PS, (celkem 6 proutků) opraveny všechny, zpět zavezeno 5 opravených PS	

PS – Palivový soubor, PP – Palivový proutek

S postupným vyhoříváním paliva docházelo k mechanickým deformacím paliva. Docházelo k poškozování palivových proutků o distanční mřížku, což vedlo k poškození povlaku palivových proutků a vzniku netěsností. Dalším problémem bylo ohýbání a kroucení paliva, což mělo za následek, že regulační klastry nedosedly až do koncové polohy. Počet nedosednutých klastrů se s délkou pobytu paliva zvyšoval. V následující tabulce je počet nedosednutých klastrů při provedených zkouškách v letech 2005-2007 na prvním bloku ETE. [16]

Tab. 6-3 Počet nedosednutých klastrů v prvním bloku v letech 2005 - 2007 [16]

Palivový cyklus	Datum	Počet nedosednutých klastrů
3. Palivový cyklus	27. 3. 2005	12
	30. 3. 2005	12
	14. 6. 2005	21
	30. 7. 2005	30
4. Palivový cyklus	4. 10. 2005	2
	19. 11. 2005	13
	30. 12. 2005	18
	25. 2. 2006	32
	17. 3. 2006	33
	7. 5. 2006	45
	2. 6. 2006	51
5. Palivový cyklus	4. 8. 2006	2
	10. 9. 2006	7
	14. 10. 2006	13
	11. 11. 2006	19
	9. 12. 2006	24
	6. 1. 2007	32
	27. 1. 2007	36
Palivový cyklus 5A	9. 4. 2007	0
	13. 4. 2007	0
	26. 4. 2007	0
	19. 5. 2007	0
	4. 8. 2007	3
6. Palivový cyklus	20. 9. 2007	0
	22. 12. 2007	0
	16. 2. 2008	0
	19. 3. 2008	0

Problémy s nadměrnými geometrickými deformacemi se podařilo odstranit konstrukčními změnami palivových souborů a změnou postupů při navrhování palivové vsázky. Konstrukční změny přicházely postupně s jednotlivými specifikacemi paliva, které jsou stručně popsány v předchozí kapitole. Změna přístupu k navrhování palivové vsázky spočívala v tom, že pod řídící klastry se umisťovaly čerstvé palivové soubory nebo maximálně jednoleté, další omezení se týkala umisťování vyhořelých palivových souborů na okraj aktivní zóny tak, aby nedocházelo k poškozování palivového proutku o distanční mřížku. [20]

Nasazením poslední specifikace Phase1X v roce 2007, její přínosy jsou stručně popsány v předchozí kapitole, a změnou způsobu navrhování palivové vsázky byly odstraněny problémy s nadměrným ohýbáním palivových souborů, které způsobovalo nedosedání regulačních klastrů. Příznivý výsledek je patrný i z Tab. 6-3, kde je uveden počet nedosednutých klastrů mezi roky 2005-2007. [20]

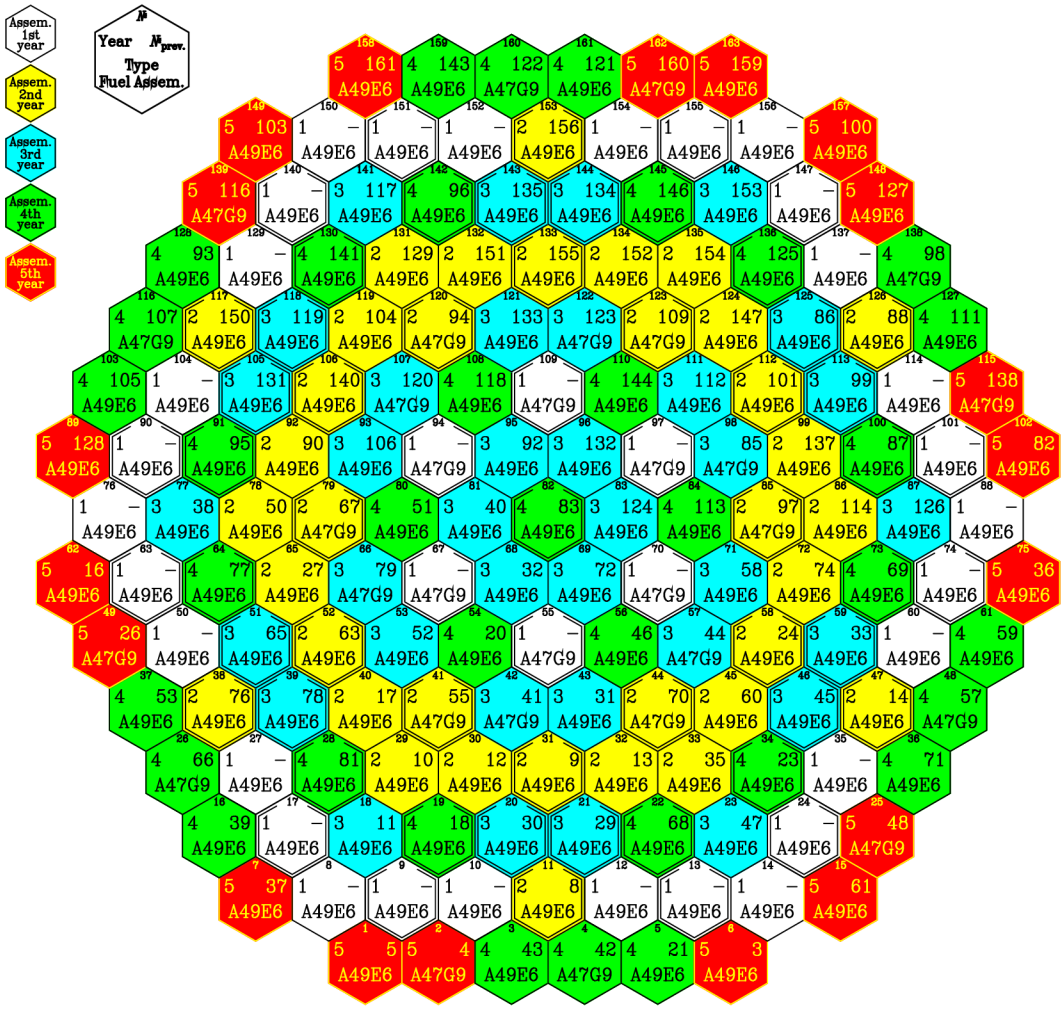
Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly, tendr na dodávku paliva v dalším období, tedy od roku 2010, vyhrála ruská společnost TVEL.

Přechod z paliva společnosti Westinghouse na palivo TVEL měl být realizován postupně, v reaktoru měly pracovat obě paliva současně. Na této možnosti spolupracovaly firmy TVEL, Westinghouse i ČEZ. Od této varianty se nakonec upustilo, protože Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB) nelicencoval použití obou paliv a musela být vyměněna celá palivová vsázka, všech 163 palivových souborů najednou. Tímto však vzniklo z každého reaktorů 92 tun radioaktivního odpadu. [23]

S novým palivem od ruského dodavatele se v budoucnu počítá s pětiletým palivovým cyklem. Vzhledem k počtu palivových souboru v aktivní zóně reaktoru se v podstatě jedná o čtyř a půlletý cyklus. Každým rokem se do aktivní zóny zaveze 36 čerstvých palivových souborů, z tohoto počtu vyplývá, že 19 jich musí v aktivní zóně zůstat pátým rokem. Na následujícím obrázku (Obr. 6-1) je kartogram rovnovážné palivové vsázky, kde jsou barevně rozděleny palivové soubory podle počtu let v reaktoru. Bíle označené jsou čerstvé palivové soubory. Žlutě označené jsou sobory, které jsou v reaktoru druhým rokem. Světle modře jsou označeny soubory, které již jsou v reaktoru třetím rokem. Zeleně označené soubory jsou čtyřleté soubory. Červeně označeno je 19 palivových souborů, které jsou v reaktoru pátým rokem.

Tato palivová vsázka zatím nebyla licencována, protože se při ní dosahuje vyššího vyhoření paliva než je maximální povolené. Takže v současné době elektrárna Temelín pracuje ve čtyřletém palivovém cyklu a při každé odstávce se v reaktoru vymění přibližně čtvrtina palivové vsázky. Nicméně v dalších částech této práce je věnována pozornost právě pětiletému palivovému cyklu a referenční palivové vsázce tohoto cyklu.

Na Obr. 6-2 je zobrazen orientační harmonogram odstávek obou výrobních bloků při ročním palivovém cyklu. Odstávky obou bloků probíhají vždy pravidelně v letních měsících, kdy je spotřeba elektrické energie nejnižší v celém roce.



Obr. 6-1 Kartogram rovnovážné palivové vsázky s palivem TVSA-T [21]

Rok	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
2012						HVB 2		HVB 1				
2013						HVB 2		HVB 1				
2014						HVB 2		HVB 1				
2015						HVB 2		HVB 1				
2016						HVB 2		HVB 1				

Obr. 6-2 Přehled harmonogramu odstávek při ročním cyklu

7 PRODLOUŽENÉ PALIVOVÉ CYKLY

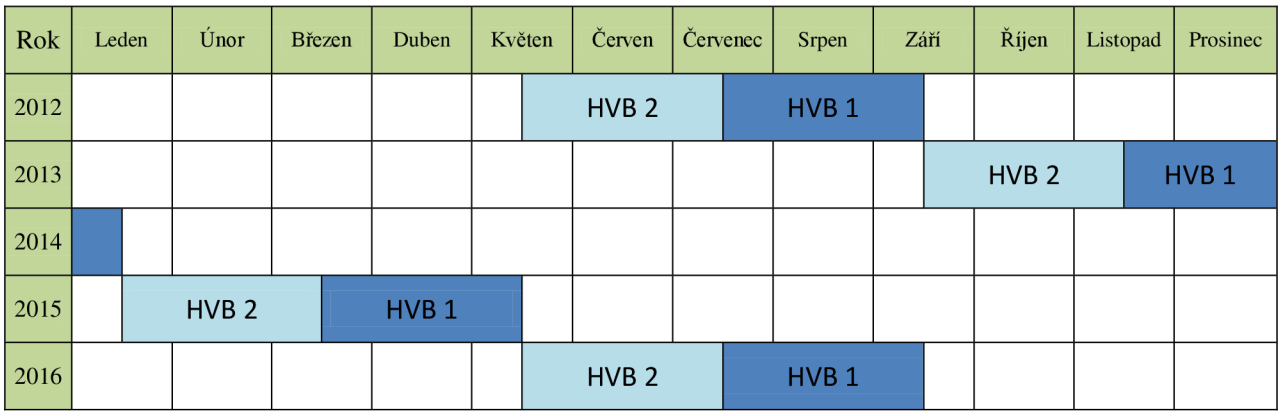
Díky rozvoji počítavé techniky mohou být palivové vsázky navrhovány sofistikovanějším způsobem, který spolu s vývojem paliva, především implementací vyhořívajících absorbátorů, umožňuje prodlužování palivových cyklů oproti původním výchozím tříletým. Vyhořívající absorbátory pomáhají omezit přebytek reaktivity paliva na začátku kampaně. Prodloužení palivových cyklů je ekonomicky výhodné, protože není potřeba tolik čerstvých palivových souborů. Tím pádem vzniká i méně vyhořelého paliva jako radioaktivního odpadu. V případě delších než ročních cyklů spočívá hlavní přínos ve zkrácení doby odstávek a zvýšení množství vyrobené energie, což je ekonomicky přínosné.

Tlakovodní reaktory v USA pracují většinou v 18-ti měsíčním palivovém cyklu, některé dokonce ve dvouletém. V 18-ti měsíčním palivovém cyklu jsou provozovány i reaktory vyšších výkonů například ve Francii, ale i v jiných evropských zemích provozujících tlakovodní energetické reaktory.

Jaderná elektrárna Temelín od počátku provozu pracuje ve čtyřletém palivovém cyklu. Se změnou dodavatele paliva, kterým se od roku 2010 stala ruská společnost TVEL, se ovšem hovoří o přechodu na delší palivové cykly, zejména o pětiletém cyklu. Vzhledem k počtu palivových souborů se zde ale jedná spíše o čtyř a půlletý cyklus. Podle rovnovážné palivové vsázky, navržené dodavatelem paliva, se má každý rok zavážet 36 čerstvých palivových souborů, z tohoto počtu vyplývá, že jich 19 musí zůstat v aktivní zóně pátým rokem. [7]

7.1 Prodloužený 16-ti měsíční cyklus

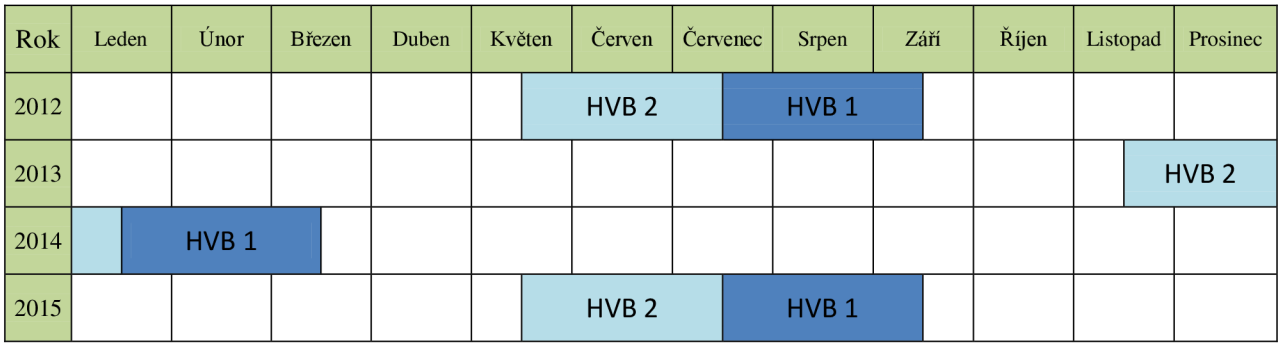
Tento palivový cyklus počítá s výměnou 60 palivových souborů a počítá s provozem reaktoru během kampaně 430 efektivních dní. Průměrná roční délka odstávky pro jeden blok je 45 dní. Oproti referenčnímu cyklu se tedy průměrně ročně ušetří 15 dní odstávky. Na Obr. 7-1 je znázorněn zjednodušený harmonogram odstávek, ze kterého je patrné, že jednotlivé odstávky se střídají přes všechna roční období a bylo by velmi složité je synchronizovat s odstávkami jaderné elektrárny Dukovany tak, aby současně nebyly odstaveny bloky obou elektráren.



Obr. 7-1 Přehled harmonogramu odstávek při 16-ti měsíčním cyklu

7.2 Prodloužený 18-ti měsíční cyklus

Při tomto palivovém cyklu se počítá při každé odstávce hlavního výrobního bloku zavézt do aktivní zóny reaktoru 72 čerstvých palivových souborů. Oproti referenční palivové vsázce je to dvojnásobný počet. Takže je jasné, že tento cyklus bude mít vyšší palivové náklady, ale hlavní výhodou delších palivových cyklů je snížení počtu odstávek a lepší využití instalovaného výkonu. Konkrétně průměrná roční délka odstávky je 40 dní a oproti referenčnímu cyklu se průměrně ročně ušetří 20 dní odstávky. Na Obr. 7-2 je znázorněný zjednodušený harmonogram odstávek. Z tohoto obrázku vyplývá, že jednou za tři roky by byla nutná odstávka v zimním období. V zimním období je spotřeba elektrické energie zpravidla vyšší a odstavení jednoho bloku ETE by bylo potřeba nahradit jinými zdroji, které pravděpodobně budou mít vyšší výrobní náklady.



Obr. 7-2 Přehled harmonogramu odstávek při 18-ti měsíčním cyklu

8 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Na úvod této kapitoly je potřeba zdůraznit, že provedené výpočty jsou spíše ilustrativního charakteru. Pro účel této práce však ilustrativní zhodnocení postačí. Zejména u výpočtu palivových nákladů nebyly požity skutečné ceny týkající se ETE. Tyto ceny jsou předmětem obchodního tajemství.

Jedním z hlavních ukazatelů ekonomické výhodnosti palivového cyklu je měrná spotřeba uranu 235, která charakterizuje využití jaderného paliva. [24]

8.1 Měrná spotřeba uranu 235

Měrná spotřeba uranu 235 podle [24] vyjadřuje měrnou spotřebu izotopu uranu 235 na jeden efektivní den. Tato spotřeba je udávána v kilogramech uranu 235 na jeden efektivní den nebo v gramech na jeden megawatt den elektrický. Matematicky můžeme měrnou spotřebu uranu 235 vyjádřit takto:

$$M_S^{U^{235}} = \frac{m^{U^{235}}}{T_{ef}} \text{ (kg/FPD)}, \tag{8.1}$$

nebo takto:

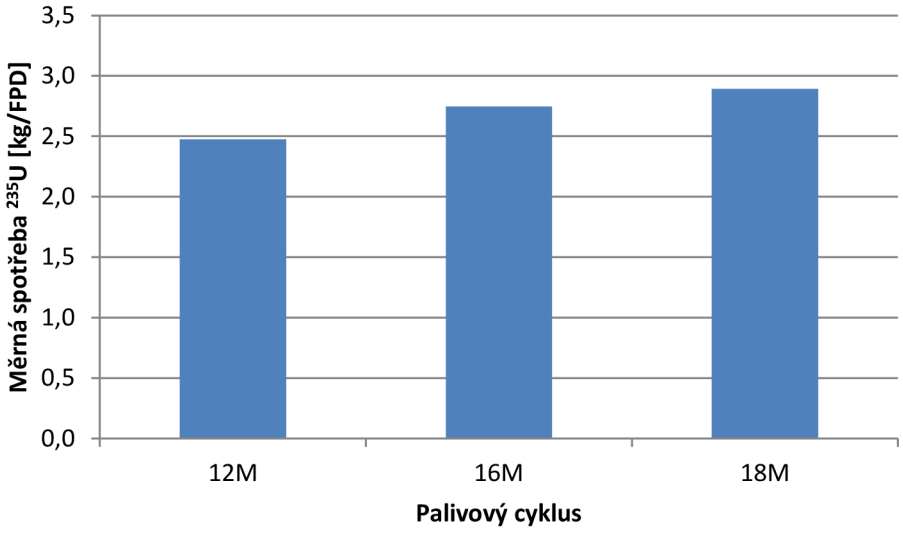
$$M_S^{U^{235}} = \frac{m^{U^{235}}}{T_{ef} \cdot 1000} \text{ (g/MWd}_e\text{)}, \tag{8.2}$$

kde T_{ef} je počet efektivních dní, které daná palivová vsázka odpracuje a m^{U235} je celková hmotnost izotopu uranu 235 v palivové vsázce, vypočítáme ji jednoduchým součtem hmotností izotopu uranu 235 obsaženého v jednotlivých palivových souborech:

$$m^{U^{235}} = \sum_i p_i \cdot \frac{e^i}{100} \cdot m_i^{PS} \text{ (kg)}, \tag{8.3}$$

kde p_i je počet palivových souborů i-tého typu (obohacení), e^i je hodnota obohacení a m_i^{PS} je celková hmotnost uranu v palivovém souboru i-tého typu.

Na Obr. 8-1 jsou zobrazeny měrné spotřeby uranu 235 při jednotlivých palivových cyklech. Z tohoto grafu vyplývá, že nejvýhodnější z tohoto hlediska je referenční roční palivový cyklus, kde se při každé odstávce zaváží 36 palivových souborů. Delší palivové cykly, 16-ti měsíční i 18-ti měsíční, mají měrnou spotřebu uranu 235 vyšší. Zde je potřeba podotknout, že měrné spotřeby uranu 235 pro tyto delší cykly, byly počítány se značným zjednodušením pouze ze středního obohacení paliva. Pro účel této práce je to postačující, pro účel přesnější analýzy by bylo vhodné použít výpočetní software. I s tímto zjednodušením vychází měrné spotřeby uranu 235 pro referenční i prodloužený cyklus podobně jako v [7], kde se autor věnuje návrhu 18-ti měsíčního palivového cyklu.



Obr. 8-1 Měrná spotřeba uranu 235 v jednotlivých cyklech

8.2 Náklady na palivo

Nejprve je potřeba určit cenu jedné palivové vsázky. Tato cena se vypočte jako jednoduchý součet cen všech palivových souborů.

$$c_p = \sum_i p_i \cdot c_i, \tag{8.4}$$

kde p_i je počet palivových souborů i-tého typu a c_i je cena palivového souboru i-tého typu. [24]

8.2.1 Cena palivového souboru

Cena paliva se skládá z několika složek: vytěžení a úprava uranové rudy na tzv. žlutý koláč, převedení na plynnou formu, obohacení, výroba palivových tablet a následně palivových souborů. Obohacování je nejnákladnější a technicky nejnáročnější částí procesu výroby paliva. Pro výpočet ceny palivových souborů byly použity hodnoty z následující tabulky. Jedná se o hodnoty z roku 2011.

Tab. 8-1Cena palivového souboru vztažená na 1kg [25]

Položka	**Poznámka**	**Cena**
Uranová ruda a její úprava	8,9 kg U_3O_8 x $146	US$1300
Konverze na UF_6	7,5kg U x $13	US$ 98
Obohacení	7,3 SWU x $155	US$ 1132
Výroba paliva		US$ 240
Celková cena na 1kg paliva		US$ 2770

Tab. 8-2 Ceny jednotlivých typů PS pro referenční palivovou vsázku

Typ PS	Střední obohacení	Cena
A47G9	4,29 %	22 784 230 Kč
A49E6	4,58 %	24 608 681 Kč

Ceny palivových souborů v předchozí tabulce byly vypočteny z hodnot uvedených v Tab. 8-1 a pomocí kalkulátoru na výpočet ceny paliva dostupného z [26]. Tyto ceny nemají žádnou přímou souvislost s ETE.

Tab. 8-3 Srovnání palivových nákladů jednotlivých cyklů

Cyklus	Cena paliva na jeden rok	Rozdíl proti 12M cyklu
12M	873 141 359 Kč	
16M	1 081 308 720 Kč	208 167 361 Kč
18M	1 621 963 080 Kč	343 330 951 Kč

8.2.2 Úspora vyrobené energie

Jak již bylo zmíněno výše, hlavní výhodou prodloužených palivových cyklů je snížení počtu odstávek a lepší využití instalovaného výkonu elektrárny. U 18-ti měsíčního cyklu je průměrná roční úspora 20 dní a u 16-ti měsíčního cyklu je průměrná roční úspora 15 dní. Tyto vypočtené uspořené dny platí pro přepokládanou délku odstávky 60 dní. Množství vyrobené energie v této době pro oba cykly udává Tab. 8-4. Při uvažování průměrné ceny za jednu vyrobenou megawatthodinu 1200 Kč se může stanovit celková cena energie vyrobená v tomto období.

Tab. 8-4 Průměrná roční úspora odstávkových dní

Cyklus	Úspora	Vyrobená energie	Cena
16M	15 dní	360 000 000 kWh	432 000 000 Kč
18M	20 dní	480 000 000 kWh	576 000 000 Kč

8.2.3 Celkové zhodnocení

Hlavní výhodou prodloužených cyklů je zkrácení frekvence odstávek a tím lepší využití instalovaného výkonu elektrárny. Dalším faktorem ovlivňující ekonomické hodnocení je úspora na vlastních odstávkách. Jelikož je jejich frekvence nižší, je nižší i objem údržbářských prací. Tento faktor se velmi těžko kvantifikuje, proto pro účely této práce postačí jednoduchá ekonomická analýza pouze se započtením nákladů na palivo a vyšším objemem vyrobené energie. Pro provedení detailní ekonomické analýzy by bylo nutno zahrnout ještě další faktory, jako již zmíněnou nižší frekvenci odstávek a další nakládání s vyhořelým jaderným palivem.

V Tab. 8-5 je znázorněno jednoduché celkové ekonomické zhodnocení prodloužených palivových cyklů vzhledem k referenčnímu ročnímu palivovému cyklu. Z této tabulky vyplývá, že oba prodloužené palivové cykly vychází podobně a výhodněji než referenční cyklus. Ekonomicky nejlépe vychází 18-ti měsíční palivový cyklus. Tento výsledek je ovšem nutné brát s rezervou vzhledem ke značnému zjednodušení ať již při výpočtu počtu zavážených čerstvých palivových souborů nebo při následných výpočtech ekonomického zhodnocení.

Tab. 8-5 Celkové ekonomické zhodnocení

Cyklus	**Dodatečné náklady na palivo**	**Zisk na vyrobené energii**	**Celková úspora**
16M	208 167 361 Kč/rok	432 000 000 Kč/rok	223 832 639 Kč/rok
18M	343 330 951 Kč/rok	576 000 000 Kč/rok	232 669 049 Kč/rok

9 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo seznámení s palivovým cyklem jaderné elektrárny Temelín. Elektrárna pracuje od počátku provozu ve čtyřletém palivovém cyklu, ale s přechodem na palivo dodávané ruskou společností TVEL se hovoří o pětiletém palivovém cyklu. Vzhledem k počtu palivových souborů se v podstatě jedná o čtyř a půlletý cyklus. Každým rokem by se zaváželo 36 čerstvých palivových souborů a 19 by jich v aktivní zóně zůstalo pátým rokem. Nicméně tento palivový cyklus zatím nebyl licencován, protože se dosahuje vyššího vyhoření než je maximální dovolené. Elektrárna tedy i v současnosti pracuje v klasickém čtyřletém palivovém cyklu a každý rok je vyměněna přibližně čtvrtina palivové vsázky.

Praktická část práce byla věnována delším než ročním palivovým cyklům. Hlavní výhoda těchto cyklů spočívá ve snížení frekvence odstávek a tím pádem i lepšího využití instalovaného výkonu. Při těchto palivových cyklech je nutné při pravidelné odstávce reaktoru zavážet vyšší počet čerstvých palivových souborů. Při 18-ti měsíčním palivovém cyklů je to 72 čerstvých palivových souborů a při navrhovaném 16-ti měsíčním cyklu 60 palivových souborů. Z těchto počtů je jasné, že prodloužené palivové cykly mají vyšší měrnou spotřebu uranu a tím pádem i vyšší palivové náklady. Ovšem z provedené jednoduché ekonomické analýzy vyplývá, že i přes tyto vyšší palivové náklady vycházejí prodloužené palivové cykly ekonomicky lépe než referenční pětiletý palivový cyklus. Tento výsledek je ale nutné brát s určitou rezervou vzhledem ke všem zjednodušením při výpočtech, ať již při výpočtu nutného počtu čerstvých palivových souborů, či při následném ekonomickém zhodnocení.

Pokud by měla být provedena detailnější analýza možnosti realizace těchto prodloužených palivových cyklů, bylo by zapotřebí provést detailnější výpočty návrhu palivových vsázek těchto cyklů, a to nejlépe za použití specializovaného softwarového vybavení. Dalším faktorem ovlivňujícím ekonomickou analýzu těchto cyklů je cena jednotlivých typů palivových souborů použitých pro dané palivové vsázky. Tyto ceny jsou však předmětem obchodního tajemství. Výsledné ekonomické zhodnocení delších palivových cyklů ovlivňuje i fakt, že vlivem snížené frekvence ostávek klesá i objem provedených údržbářských prací. Pokud by byla v budoucnu prováděna detailní ekonomická analýza, měl by v ní být tento faktor také zahrnut.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] *Skupina ČEZ* [online]. 2011 [cit. 2011-12-10]. Historie a současnost Elektrárny Temelín. Dostupné z WWW: http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/historie-a-soucasnost.html.

[2] RAČEK, J. *Jaderná zařízení.* vyd. 1. Brno : NOVPRESS s.r.o., 2009. 239 s. ISBN 978-80-214-3961-0

[3] KOPŘIVA, R. *Střední část palivového cyklu na elektrárně Dukovany.* Praha: České Vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra jaderných reaktorů, 2006. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daneš Burket, Ph.D..

[4] TESAŘ, F. *Odvod tepla a vývin tepla vyhořelého jaderného paliva v úložištích.* Brno: Masarykova Univerzita, Pedagogická fakulta, Katedra fyziky, 2011. 122 s. Vedoucí diplomové práce RNDr. Jindřiška Svobodová, Ph.D..

[5] *Pokročilé jaderné technologie a skupina ČEZ.* Praha : ČEZ, 2006. 39 s. ISBN (brož.).

[6] *VUJE* [online]. 2011 [cit. 2011-12-10]. Schémy. Dostupné z WWW: http://www.vuje.sk/sk/index.php?page=popup/schemy/palivovy-cyklus.

[7] KOVAČ, M. *Analýza možnosti provozu 18-ti měsíčních palivových cyklů pro Jadernou elektrárnu Temelín.* Praha: České Vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra jaderných reaktorů, 2010. 122 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Libor Bittmann.

[8] BLAŽKOVÁ, E. *Přehled jaderných reaktorů světa.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Hugo Šen

[9] HEŘMANSKÝ, B.: *Jaderné reaktory I.*, učební texty, Praha, 2010

[10] *British Energy* [online]. 2008 [cit. 2011-12-10]. Sizewell B Environmental Product Declaration. Dostupné z WWW: http://www.british-energy.com/documents/Sizewell_B_EPD_Technical_Report.pdf.

[11] *Росэнергоатом* [online]. 2011 [cit. 2011-12-10]. Производство. Dostupné z WWW: http://www.knpp.rosenergoatom.ru/wps/wcm/connect/rosenergoatom/knpp/about/production/.

[12] *Om Vattenfall* [online]. 2011-12-07 [cit. 2011-12-10]. Om Forsmark. Dostupné z WWW: http://www.vattenfall.se/sv/om-forsmark.htm.

[13] *KSU* [online]. 2008 [cit. 2011-12-13]. Operating Experience from Swedish Nuclear Power Plants. Dostupné z WWW: http://www.ksu.se/wp-content/uploads/2011/05/Engelsk-2008.pdf.

[14] ČEZ A.S. *Bezpečnostní zpráva pro veřejnost: Kapitola 3 - Technické řešení JE Temelín – interní dokument ČEZ a.s.* Temelín, 2006.

[15] *Česká nukleární společnost* [online]. 2011 [cit. 2012-4-25]. Jaderná bibliotéka - obrázky. Dostupné z WWW: http://www.csvts.cz/cns/jb/obr/wwer1000.jpg.

[16] *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. 21.3.2008 [cit. 2011-12-06]. K problematice paliva ETE. Dostupné z WWW: http://www.sujb.cz/?c_id=795.

[17] *Škoda JS a.s.* [online]. 21.11.2007 [cit. 2011-12-06]. Maketa ruského paliva TVSA-T pro JE Temelín bude testována ve Škoda JS. Dostupné z WWW: http://www.skoda-js.cz/cs/aktuality/aktualni-sdeleni-archiv/18-maketa-ruskeho-paliva-tvsa-t-pro-je-temelin-bude-testovana-ve-skoda-js.shtml.

[18] *Skupina ČEZ* [online]. 17. 5. 2006 [cit. 2011-12-06]. Temelín nakoupí jaderné palivo od ruského TVEL. Dostupné z WWW: http://www.cez.cz/cs/pro-investory/informacni-povinnost/684.html.

[19] *Skupina ČEZ* [online]. 2011 [cit. 2011-12-11]. Jaderná energetika. Dostupné z WWW: http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika.html.

[20] ERNST, René; ERNST, Daniel; MILISDÖRFER, Lukáš. Palivo Westinghouse - R. 2000 až 2010. Bezpečnost jaderné energetiky. 2010, 11/12, s. 349-356. ISSN 1210-7085.

[21] ČEZ A.S. *Předprovozní bezpečnostní zpráva 1,2 - revize 1: Díl 4 – interní dokument ČEZ a.s.*. Temelín, 2011.

[22] *Skupina ČEZ* [online]. 2011 [cit. 2011-12-10]. Skladování a uložení vyhořelého paliva, středně a nízkoaktivního odpadu. Dostupné z WWW: http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/7.html.

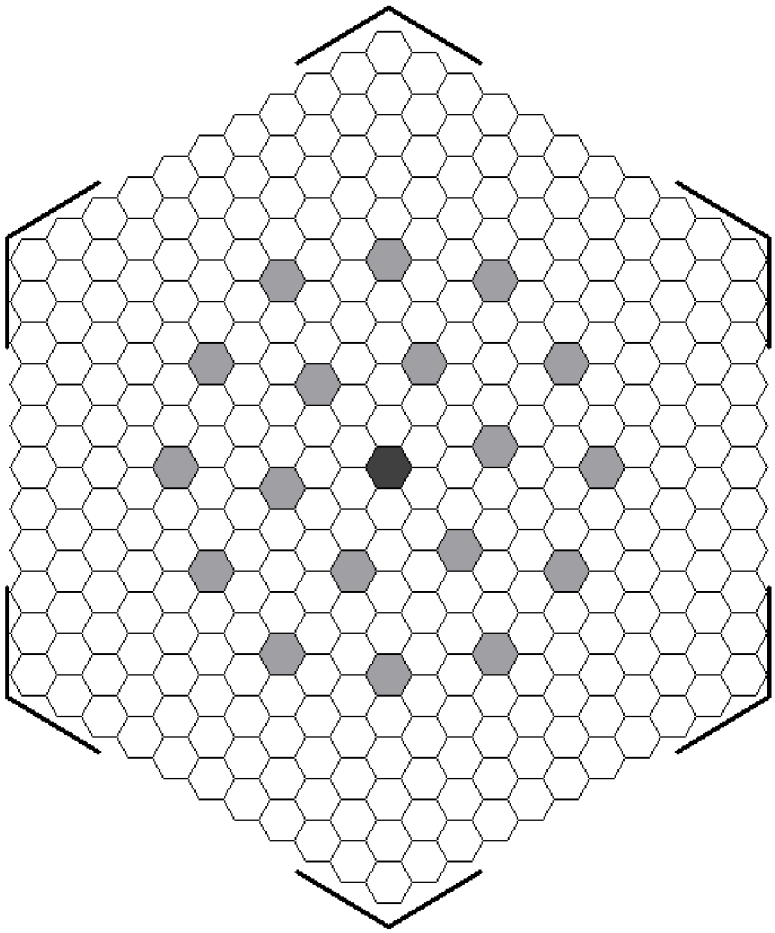
[23] *Westinghouse* [online]. 2007 [cit. 2011-12-10]. Historie. Dostupné z WWW: http://ap1000.westinghousenuclear.cz/historie.html.

[24] BURKET, D. *Palivové vsázky se zdokonaleným palivem na Jaderné elektrárně Dukovany.* Praha: České Vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra jaderných reaktorů, 2003. 214 s. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Karel Matějka, CSc.

[25] *World Nuclear Association* [online]. 2011 [cit. 2012-04-25]. The Economics of Nuclear Power. Dostupné z WWW: http://www.world-nuclear.org/info/inf02.html.

[26] *The Ux Consulting Company* [online]. 2010 [cit. 2012-04-25]. UxC Fuel Quantity & Cost Calculator. Dostupné z WWW: http://www.uxc.com/tools/uxc_FuelCalculator.aspx.

PŘÍLOHA A – PŘÍČNÉ ŘEZY JEDNOTLIVÝCH TYPŮ PS

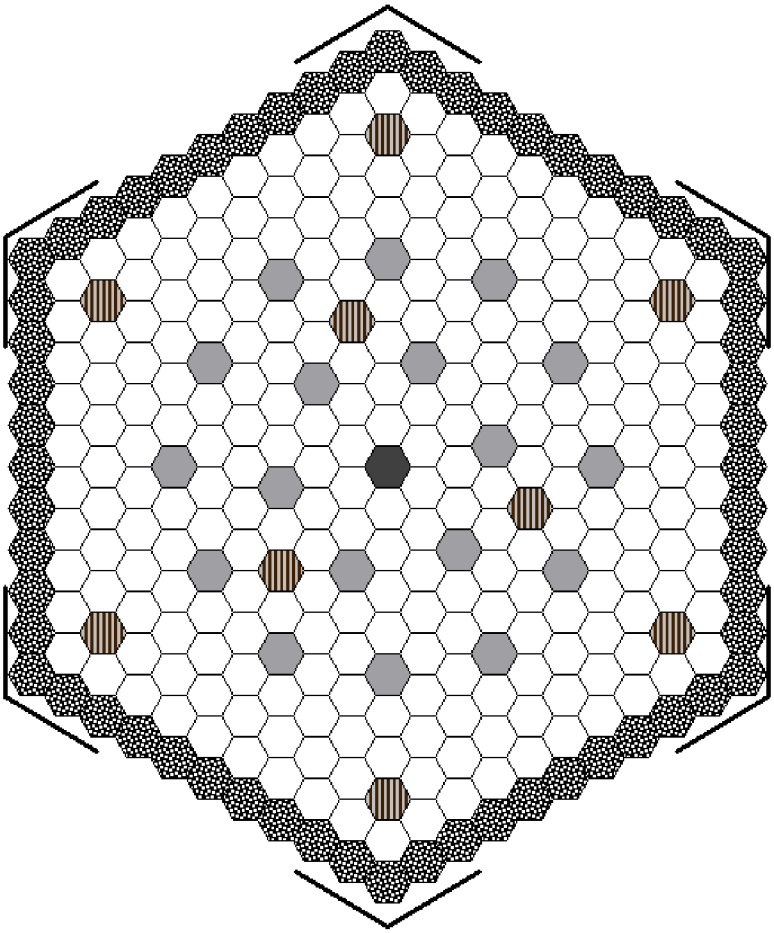


proutek tvel typu 1

centrální trubka

vodicí trubka

Obr. A-1 Schéma příčného průřezu palivového svazku TVSA-T, typy A13, A20 [21]



proutek tvel typu 1

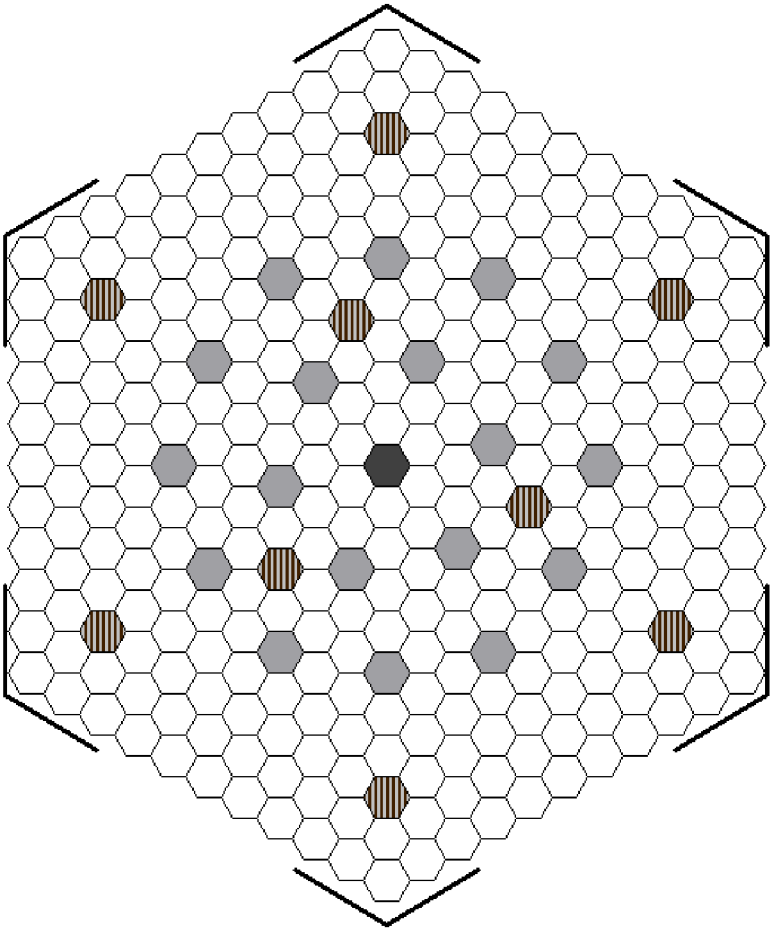
centrální trubka

vodicí trubka

proutek tveg

proutek tvel typu 2

Obr. A-2 Schéma příčného průřezu palivového svazku TVSA-T, typy P40E9, P36E9 [21]



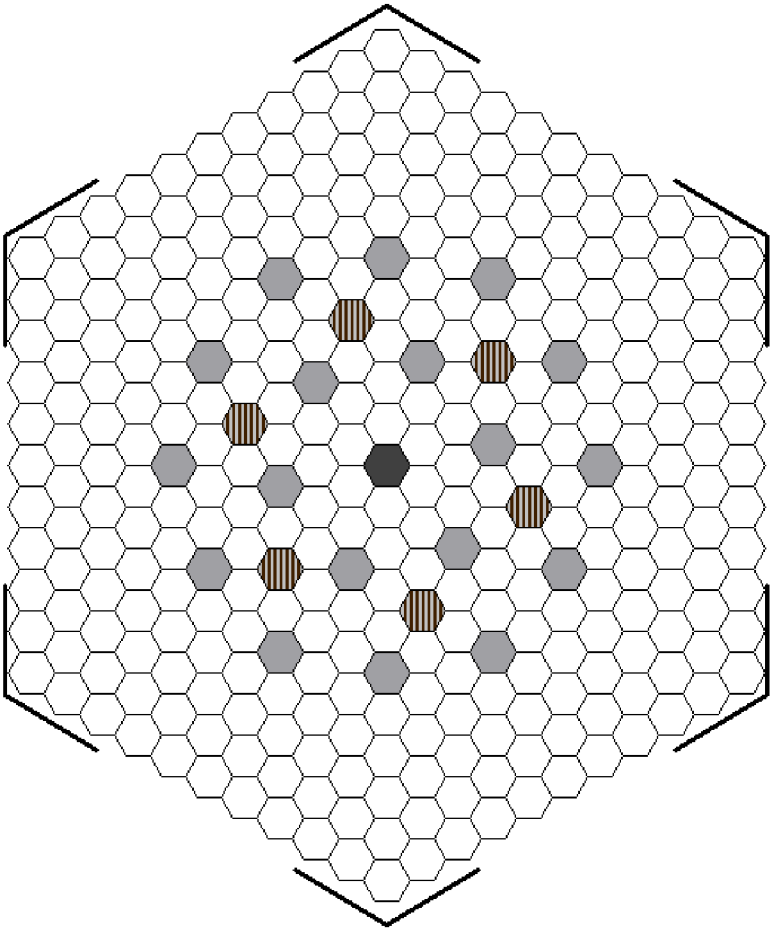
proutek tvel typu 1

centrální trubka

vodicí trubka

proutek tveg

Obr. A-3 Schéma příčného průřezu palivového svazku TVSA-T, typ A30E9 [21]



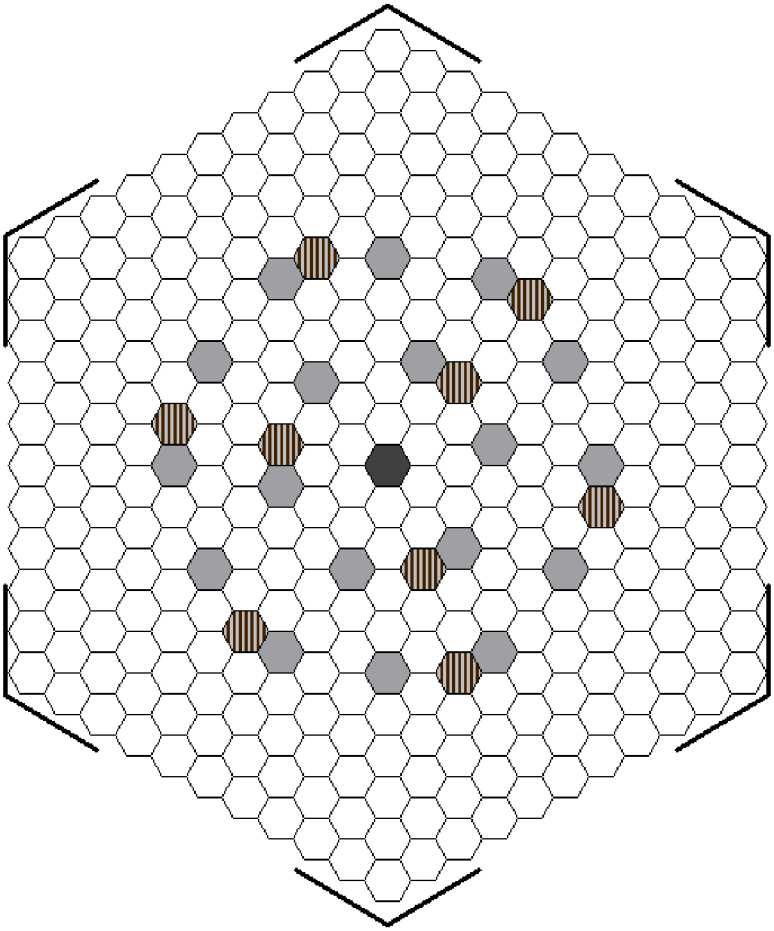
proutek tvel typu 1

centrální trubka

vodicí trubka

proutek tveg

Obr. A-4 Schéma příčného průřezu palivového svazku TVSA-T, typy A40E6, A49E6 [21]



proutek tvel typu 1

centrální trubka

vodicí trubka

proutek tveg

Obr. A-5 Schéma příčného průřezu palivového svazku TVSA-T, typ A47G9 [21]