

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**

**ČERPÁNÍ PROJEKTOVÝCH REZERV
JADERNÉHO PALIVA NA ELEKTRÁRNĚ
DUKOVANY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

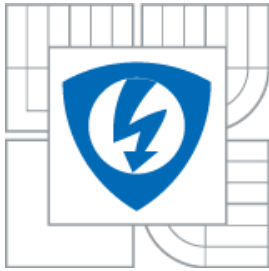
**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

RADEK VRÁBEL

BRNO 2015



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

ČERPÁNÍ PROJEKTOVÝCH REZERV JADERNÉHO PALIVA NA ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY

NUCLEAR FUEL MARGINS INCREASING AT NUCLEAR POWER PLANT DUKOVANY

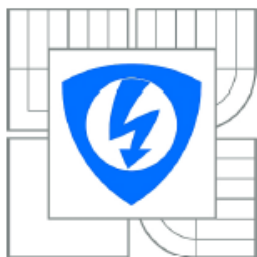
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RADEK VRÁBEL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL KATOVSKÝ, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Radek Vrábel

ID: 154906

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Čerpání projektových rezerv jaderného paliva na Elektrárně Dukovany

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s procesem čerpání projektových rezerv na EDU a ETE, zaměřte se zejména na změny týkající se jaderného paliva, aktivní zóny a primárního okruhu. Studujte problematiku zejména z pohledu EDU a vývoje jaderného paliva na této elektrárně.
2. Seznamte se s vnitřním palivovým cyklem českých jaderných elektráren, s procesem vyhořívání, změn probíhajících v palivu, s dochlazováním použitého jaderného paliva a s jeho skladováním. Diskutujte, jak čerpání projektových rezerv ovlivňuje zadní část palivového cyklu.
3. Proveďte zjednodušené výpočty zbytkového tepelného výkonu palivových kazet, zejména s ohledem na možnosti dalšího čerpání projektových rezerv na Elektrárně Dukovany a popište další možné cesty vývoje jaderného paliva na EDU.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

1. US NRC: Backgrounder on Power Upgrades for Nuclear Plants and related topics, 2014.
2. ŠKODA Praha Invest: Využití projektových rezerv bloků jaderné elektrárny Dukovany, 2012.
3. Kim jr.: Advances in power uprating - Benefits, limitations and strategies, ICAPP2005, Soul.
4. Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants.

a další podle pokynů vedoucího a konzultantů práce

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

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

Konzultanti bakalářské práce: Ing. Martin Bárta, EDU ČEZ, a.s.; Ing. Josef Bajgl, EDU ČEZ, a.s.

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:

VRÁBEL, R. Čerpání projektových rezerv jaderného paliva na Elektrárně Dukovany. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Katovský, Ph.D..

Poděkování:

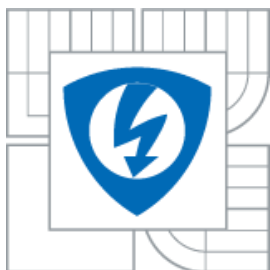
Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Karlu Katovskému, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a věnovaný čas během přípravy této práce. Poděkování patří též Ing. Martinu Bártovi a Ing. Josefu Bajglovi za konzultace, dále své rodině a přátelům za trpělivost a podporu během celého studia.

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

Čerpání projektových rezerv jaderného paliva na Elektrárně Dukovany

Radek Vrábel

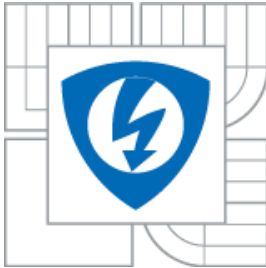
vedoucí: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2015

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor's Thesis

Nuclear Fuel Margins Increasing at Nuclear Power Plant Dukovany

by

Radek Vrábek

Supervisor: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Brno University of Technology, 2015

Brno

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá zvyšováním výkonu a prodlužováním palivového cyklu v českých jaderných elektrárnách. Pro zlepšení povědomí čtenáře o problematice je na začátku práce uvedena krátká kapitola o jaderných reaktorech a palivovém cyklu. Vývoji palivového cyklu na Elektrárně Dukovany je pak dále věnována celá kapitola. Vývoj jaderného paliva je zde spojen s vývojem palivového cyklu, na kterém jsou viditelné přínosy vylepšování jaderného paliva.

KLÍČOVÁ SLOVA: jaderný reaktor; palivový cyklus; zvyšování výkonu; jaderné palivo; Temelín; Dukovany; vyhoření paliva; výkon z rozpadu; teplo z rozpadu

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with power uprates and the extension of the nuclear fuel cycle at Czech nuclear power plants. The beginning of this thesis aims at improving the reader's knowledge about nuclear reactors and nuclear fuel cycle. A whole chapter is dedicated to the development of nuclear fuel cycle at the nuclear power plant Dukovany. The progress in the field of nuclear fuels complements the development of the nuclear fuel cycle, thus providing visible benefits.

KEY WORDS: nuclear reactor; nuclear fuel cycle; power uprate; nuclear fuel; Temelin; Dukovany; fuel burnup; decay power; decay heat

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	11
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD	15
2 JADERNÉ REAKTORY	16
2.1 VÝVOJ JADERNÝCH REAKTORŮ	16
2.1.1 JADERNÉ REAKTORY GENERACE I	16
2.1.2 JADERNÉ REAKTORY GENERACE II	17
2.1.3 JADERNÉ REAKTORY GENERACE III, III+	17
2.1.4 MALÉ MODULÁRNÍ REAKTORY	17
2.1.5 JADERNÉ REAKTORY GENERACE IV	17
3 PALIVOVÝ CYKLUS.....	18
3.1 PŘEDNÍ ČÁST PALIVOVÉHO CYKLU.....	18
3.2 STŘEDNÍ ČÁST PALIVOVÉHO CYKLU.....	20
3.3 ZADNÍ ČÁST PALIVOVÉHO CYKLU.....	20
4 ČERPÁNÍ PROJEKTOVÝCH REZERV	21
4.1 ZVYŠOVÁNÍ VÝKONU	21
4.1.1 ZVYŠOVÁNÍ VÝKONU ELEKTRÁRNY TEMELÍN	21
4.1.2 ZVYŠOVÁNÍ VÝKONU ELEKTRÁRNY DUKOVANY	24
5 PALIVO REAKTORU VVER-440.....	27
6 VÝVOJ PALIVOVÉHO CYKLU A PALIVA NA ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY	30
7 POUŽITÉ PALIVO	37
7.1 VYHOŘENÍ PALIVA	37
7.2 ZMĚNY V PALIVU.....	38
7.2.1 OXIDACE POKRYTÍ	39
7.2.2 VLASTNOSTI VODY	39
7.2.3 ZESÍLENÍ KAZETY.....	40
7.2.4 UVOLNĚNÍ ŠTĚPNÝCH PLYNŮ	40
7.2.5 VYHOŘÍVAJÍCÍ ABSORBÁTORY A NÁVRH ROZLOŽENÍ AKTIVNÍ ZÓNY.....	41
7.3 BUDOUCÍ VÝVOJ.....	41
8 ČERPÁNÍ PROJEKTOVÝCH REZERV NA REAKTORECH VVER-440 TYPU 213 VE SVĚTĚ	43
8.1 JADERNÁ ELEKTRÁRNA LOVIISA	43
8.2 JADERNÁ ELEKTRÁRNA PAKS	44
8.3 JADERNÁ ELEKTRÁRNA JASLOVSKÉ BOHUNICE	46
8.4 JADERNÁ ELEKTRÁRNA MOCHOVCE.....	47

9 VÝPOČET ZBYTKOVÉHO TEPELNÉHO VÝKONU PALIVOVÝCH KAZET	49
9.1 VÝKON Z ROZPADU ŠTĚPNÝCH PRODUKTŮ	50
9.2 VÝKON Z ROZPADU PODLE STANDARDU ANS	52
10 ZÁVĚR.....	55
POUŽITÁ LITERATURA	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1 Vývoj jaderných reaktorů.....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3.1 Palivový cyklus.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3.2 Produkce uranu v roce 2012 (Celkem 58 816 tun uranu)</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3.3 Ekonomická nákladnost jednotlivých procesů přední části palivového cyklu.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 4.1 Výroba ETE v letech 2000-2014 zaokrouhlená na GWh.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4.2 Výroba EDU v letech 1985-2014 zaokrouhlená na GWh.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 5.1 Palivový proutek reaktoru VVER-440</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 5.2 Palivová kazeta reaktoru VVER-440</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 5.3 Regulační kazeta reaktoru VVER-440</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 6.1 Tříletá palivová vsázka</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 6.2 Tři a půlletá palivová vsázka</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 6.3 Řez radiálně profilované palivové kazety se středním obohacením 3,82 % ²³⁵U.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 6.4 Čtyřletá palivová vsázka.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 6.5 Pětiletá palivová vsázka.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 6.6 Řez radiálně profilované palivové kazety Gd-1</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 6.7 Řez radiálně profilované palivové kazety Gd-2</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 6.8 Řez radiálně profilované palivové kazety Gd-2+</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 6.9 Řez radiálně profilované palivové kazety Gd-2M.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 6.10 Řez radiálně profilované palivové kazety Gd-2M+</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 6.11 Řez radiálně profilované palivové kazety Gd-2M+ s obohacením 4,76 %.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 7.1 Změna jaderného paliva po vyhoření v reaktoru.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 7.2 Závislost tepelného výkonu použitého paliva na čase při různém vyhoření (PWR palivový soubor s obohacením 4,2 % ²³⁵U).....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 7.3 Vývoj průměrného vyhoření pro různé druhy reaktorů</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 7.4 Vývoj doporučených vlastností vody pro tlakovodní reaktory.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 9.1 Spouštění reaktoru a návrat do kritického stavu</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 9.2 Závislost zbytkového tepelného výkonu z rozpadu štěpných produktů na čase po odstavení reaktoru.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 9.3 Srovnání tepelného výkonu z rozpadu štěpných produktů s experimentální rovnicí počítající s teplem vyvinutým rozpadem štěpných produktů i aktinoidů.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 9.4 Srovnání tepelného výkonu z rozpadu dle standardu ANS s hodnotami z EDU.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 9.5 Srovnání zbytkového tepelného výkonu dle ANS standardu, s naměřenými daty z Elektrárny Dukovany a s naměřenými daty z NRC (Jaderná regulační komise).....</i>	<i>54</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 4.1 Shrnutí modernizací zvyšování výkonu na ETE</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 4.2 Výroba ETE v letech 2000-2014 zaokrouhlená na GWh</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 4.3 Shrnutí modernizací zvyšování výkonu na EDU</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 4.4 Výroba EDU v letech 1985-2014 zaokrouhlená na GWh</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 6.1 Průměrné počty zavážených palivových kazet pro jednotlivé palivové cykly</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 6.2 Důležité změny palivových kazet / palivových částí regulačních kazet v průběhu vývoje paliva</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 9.1 Srovnání zbytkových výkonů naměřených v EDU s vypočtenými výkony z rozpadu štěpných produktů a podle standardu 2005 ANS</i>	<i>53</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABWR	Zdokonalený varný reaktor (Advanced Boiling Water Reactor)
ACR	Zdokonalený kanadský těžkovodní reaktor (Advanced CANDU Reactor)
AGR	Zdokonalený plynem chlazený reaktor (Advanced Gas-cooled Reactor)
ANS	Americká nukleární společnost (American Nuclear Society)
AP1000	Tlakovodní reaktor se zdokonalenými pasivními ochranami (Advanced Passive)
APR	Zdokonalený tlakovodní reaktor (Advanced Power Reactor)
APWR	Zdokonalený tlakovodní reaktor (Advanced Pressurized Water Reactor)
ATMEA-1	Zdokonalený tlakovodní reaktor
BWR	Varný reaktor (Boiling Water Reactor)
CANDU	Kanadský těžkovodní reaktor (CANada Deuterium Uranium)
EDU	Elektrárna Dukovany
EPR	Zdokonalený tlakovodní reaktor (European Pressurized Reactor)
ESBWR	Zdokonalený varný reaktor (Economic Simplified Boiling Water Reactor)
ETE	Elektrárna Temelín
GCR	Plynem chlazený reaktor (Gas-Cooled Reactor)
GFR	Rychlý reaktor chlazený plynem (Gas-cooled Fast Reactor)
HTGR	Vysokoteplotní reaktor (High Temperature Gas-cooled Reactor)
LFR	Rychlý reaktor chlazený olovem (Lead-cooled Fast Reactor)
LWGR	Varný lehkovodní reaktor moderovaný grafitem (Light Water-cooled Graphite-moderated Reactor)
LWR	Lehkovodní reaktor (Light Water Reactor)
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
MSR	Reaktor s roztavenými solemi (Molten Salt Reactor)
NRC	Jaderná regulační komise (Nuclear Regulatory Commission)
PHWR	Těžkovodní reaktor (Pressurized Heavy-Water Reactor)
PWR	Tlakovodní reaktor západního typu (Pressurized Water Reactor)
RBMK (РБМК)	Varný reaktor moderovaný grafitem (Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj, Реактор Большой Мощности Канальный)
SCWR	Superkritický reaktor chlazený vodou (SuperCritical Water-cooled Reactor)
SFR	Rychlý reaktor chlazený sodíkem (Sodium-cooled Fast Reactor)
VHTR	Vysokoteplotní reaktor (Very High Temperature Reactor)

VVER (ВВЭР) Tlakovodní reaktor východního typu (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor, Водо-Водяной Энергетический Реактор)

<i>Značka</i>	<i>Veličina</i>	<i>Značka jednotky</i>
P	zbytkový tepelný výkon	W
P_0	konstantní provozní výkon	W
P_{0k}	průměrný provozní výkon jedné kazety	W
P_β	výkon záření β	MeV/cm ³ s
P_γ	výkon záření γ	MeV/cm ³ s
q_0	objemový tepelný výkon	W/cm ³
t'	čas po výskytu štěpení	s
t_s	doba od odstavení	s
$\Delta\tau'$	doba štěpení	s
τ'	čas na začátku štěpení	s
τ	čas od spuštění reaktoru	s
τ_s	doba provozu reaktoru	s

1 ÚVOD

Život bez elektrické energie by si dnes dokázal představit jen málokdo. Její používání dnes bereme jako samozřejmost a většinu lidí nenapadne, že by jí mohl být v budoucnu nedostatek. Avšak zrovna v České republice by za několik let mohla tato situace nastat. Dosluhující uhelné elektrárny a stále se zvyšující spotřeba energie by mohly v budoucnu způsobit nepokrytou poptávku energie. Čím budeme schopni znovu obnovit rovnováhu mezi spotřebou a výrobou?

V nedávné době proběhlo schválení aktualizace státní energetické koncepce. Tento dokument se zabývá směřováním české energetiky v rámci několika následujících desetiletí. Podle tohoto spisu budou hlavními energetickými zdroji v České republice jaderná energetika a obnovitelné zdroje. Dá se tedy předpokládat, že v brzké době budou vyhlášeny nové tendry na dostavbu jednoho nového bloku v Temelíně a jednoho v Dukovanech. Vláda ale zároveň rozhodla, že nepřistoupí na garantování výkupních cen elektrické energie z nových elektráren, což vedlo ke zrušení tendru na dostavbu jaderných bloků v Temelíně.

V dnešním energetickém mixu patří jaderná energetika k nejlevnějším a nejstabilnějším zdrojům elektrické energie. Z ekologického hlediska se řadí k těm nejšetrnějším, z důvodu nulové emise skleníkového plynu CO₂ a nulové spotřeby kyslíku v reaktoru na rozdíl od klasických elektráren spalujících uhlí. Postavení nového jaderného zdroje je díky podpoře obnovitelných zdrojů a neustále klesající ceny silové elektřiny (z důvodu přednostního výkupu elektřiny z obnovitelných zdrojů) ekonomicky velmi nevýhodné. Proto se majitelé již vybudovaných elektráren snaží zvyšovat množství vyrobené elektrické energie čerpáním projektových rezerv a to z paliva, ze sekundárního okruhu anebo díky zvyšující se přesnosti měření a regulace.

Hlavním cílem této bakalářské práce je seznámení s procesem čerpání projektových rezerv na Elektrárně Dukovany a Elektrárně Temelín. Převážně se zaměřuje na vývoj jaderného paliva na EDU, který je za 30 let provozu elektrárny velmi bohatý. Dále se zabývá vyhořením paliva, jeho zvyšováním a změnami paliva způsobenými tímto aktuálním trendem. V další kapitole popisuje čerpání projektových rezerv na jaderných reaktorech VVER-440 typu 213 ve světě.

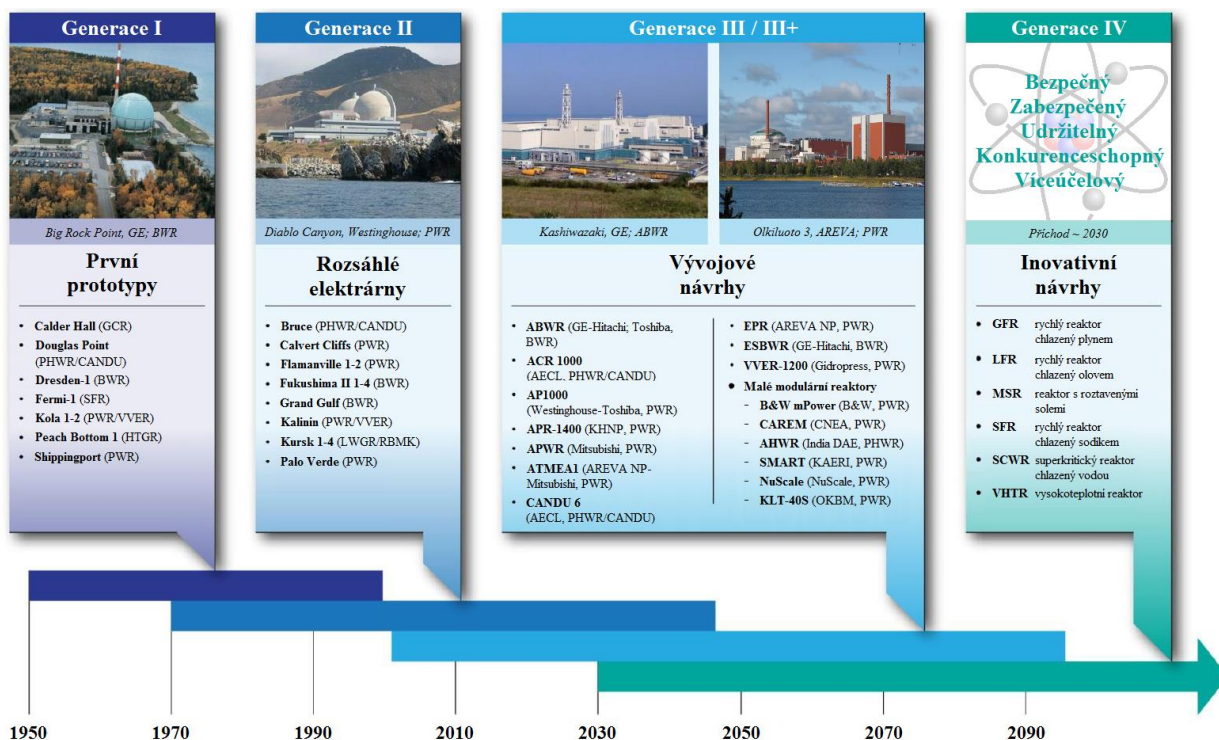
Závěrečná část práce je věnována výpočtu zbytkového tepelného výkonu palivových kazet. Je zde popsán historický vývoj používaných výpočtů a srovnání experimentálně změřených zbytkových tepelných výkonů při různých vyhořeních s výpočty dle daných standardů.

2 JADERNÉ REAKTORY

Jaderný reaktor je zařízení, ve kterém probíhá řízená řetězová štěpná reakce s postupným uvolňováním energie. Počet neutronů vznikající při jaderné reakci je regulován absorbtory neutronů a to většinou regulačními kazetami nebo koncentrací kyseliny borité. Podle hlavního využití můžeme jaderné reaktory rozdělit na školní, experimentální, produkční, transportní a energetické. [1], [2]

2.1 Vývoj jaderných reaktorů

Za počátek vývoje jaderných reaktorů se považuje rok 1942, kdy byl v USA zprovozněn první jaderný reaktor, založený na štěpné reakci. Tento reaktor však sloužil pouze k vědeckým účelům. Díky němu byly vytvořeny další prototypy jaderných reaktorů sloužících jako zdroje neutronů a reaktory pro výrobu plutonia. První jaderné reaktory, určené pro výrobu elektrické energie, byly vybudovány v padesátých a šedesátých letech 20. století. Vývojové generace jaderných reaktorů jsou zjednodušeně shrnuty na Obr. 2.1. [1], [2]



Obr. 2.1 Vývoj jaderných reaktorů [3], [4]

2.1.1 Jaderné reaktory generace I

Do generace I řadíme prototypy jaderných reaktorů vznikající v padesátých a šedesátých letech 20. století, které testovaly využitelnost jaderné energie. V této generaci se převážně hledala nejvhodnější konstrukce jaderných reaktorů. Byly testovány možnosti chlazení a odvod tepelné energie tlakovou vodou, plynem, roztaveným sodíkem i roztaveným olovem. Palivo také prošlo množstvím podob. Různě obohacený uran se ukládal do palivových článků tvaru tyčí nebo koulí. Jako moderátor pro zpomalování rychlých neutronů byl použit grafit, voda a těžká voda, které se skládají z jader lehkých prvků vhodných ke zpomalení neutronů. [2]

2.1.2 Jaderné reaktory generace II

S využitím zkušeností nabytých při provozu jaderných reaktorů generace I byla vytvořena nová řada reaktorů, které se dnes označují za generaci II. Přestože nové elektrárny byly budovány podle původních projektů, technologie jaderných reaktorů se postupně zdokonalovala a reaktory s podobnou konstrukcí byly dále vylepšovány. Tyto elektrárny dnes tvoří základ jaderné energetiky a díky dobrému technickému stavu dochází k prodlužování životnosti oproti původním projektovaným předpokladům. Patří zde hlavně tlakovodní reaktory, které tvoří více jak polovinu z celkového počtu dnes používaných bloků. [2], [5]

2.1.3 Jaderné reaktory generace III, III+

Jaderné reaktory generace III vycházejí z konstrukce reaktorů generace II. Hlavními rozdíly oproti generaci II jsou vyšší využitelnost (kratší odstávky), vyšší účinnost, delší životnost, vyšší vyhoření paliva a je prodloužena doba mezi výměnami paliva. [2], [5]

Na generaci III přímo navazuje generace III+. Generace III+ nám poskytuje nejdokonalejší reaktory, které se dnes staví. Reaktory stavěné v této generaci mají vylepšenou ekonomiku provozu a také technologické a bezpečnostní vlastnosti. [2], [5]

2.1.4 Malé modulární reaktory

MAAE (Mezinárodní agentura pro atomovou energii) definuje malý reaktor jako takový, který má elektrický výkon nižší než 300 MW. Hlavní výhodou těchto reaktorů je, že jsou malé a kompaktní, a proto mohou být sériově vyráběny a přepravovány pomocí vlaků nebo nákladních automobilů. [6]

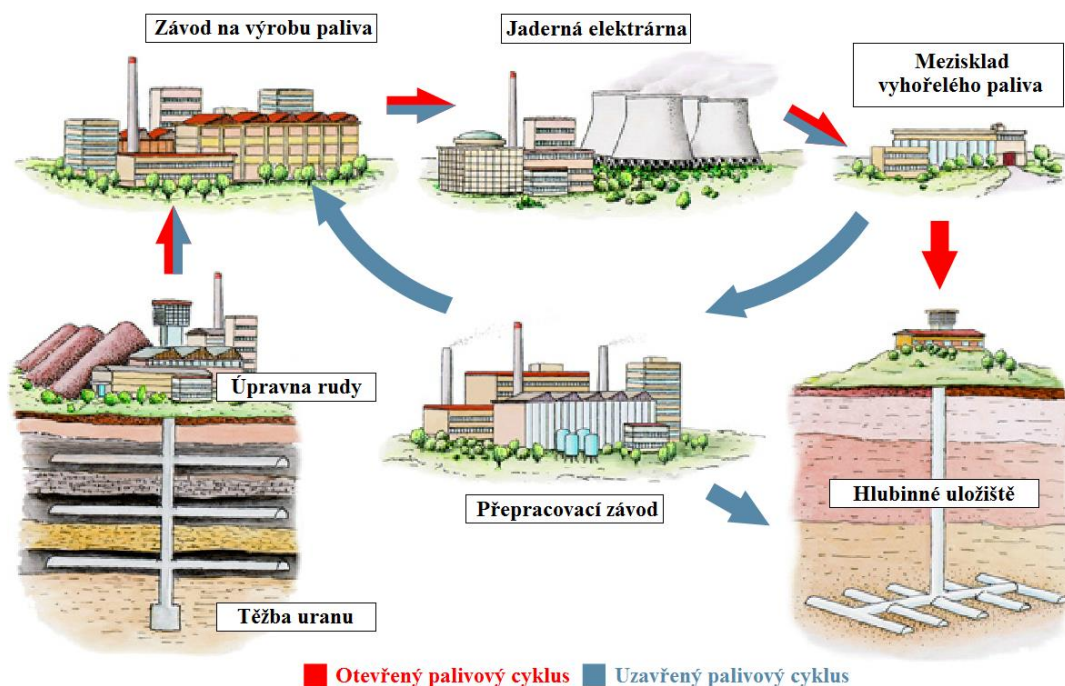
Podle MAAE je dnes 139 ze 442 komerčně provozovaných reaktorů malých. Nicméně tyto reaktory jsou pouze malí předchůdci velkých reaktorů a nejsou tím, co se považuje za malé modulární reaktory. Ty využívají svou malou velikost pro dosažení určitých výkonových charakteristik. Mohou být dovezeny do těžko přístupných lokalit nebo do míst bez infrastruktury pro dopravu paliva. Modularita návrhu snižuje množství práce provedené na místě, díky tomu je levnější jednodušší a rychlejší na postavení. Jejich palivový cyklus je dlouhý, což snižuje potřebu výměny paliva. Celkově lze říci, že zanechají menší stopu v krajině, mají nižší pořizovací i provozovací náklady a jsou odolné proti úniku radioaktivity. [6]

2.1.5 Jaderné reaktory generace IV

Návrhy reaktorů generace IV vychází ze zkušeností se stávajícími reaktory, ale koncepce bude zcela nová. Nástup této generace se očekává ve třicátých letech 21. století, a bude se jednat hlavně o rychlé reaktory, které by měly využít ^{238}U nebo thorium. Mezi další varianty patří jaderné reaktory k odsolování vody nebo reaktory pro výrobu vodíku jako alternativního paliva pro motorová vozidla. [2], [5]

3 PALIVOVÝ CYKLUS

Soubor všech procesů s využitím paliva nazýváme palivový cyklus. Původně uvažovaný palivový cyklus měl být uzavřený a skládal se z těžby a úpravy uranové rudy, chemického zpracování rudy, obohacování přírodního uranu izotopem ^{235}U , výroby paliva, provozu jaderného reaktoru, skladování použitého paliva, přepracování paliva k získání zbylých štěpných materiálů a následné uložení radioaktivního odpadu. V poslední době se dává přednost otevřenému palivovému cyklu, který se liší od uzavřeného tím, že se použité palivo dále nepřeprocovává, ale rovnou ukládá jako radioaktivní odpad. Zjednodušené schéma otevřeného a uzavřeného palivového cyklu je zobrazeno na Obr. 3.1. Palivový cyklus můžeme rozdělit do tří základních částí přední, střední a zadní. [7], [8]

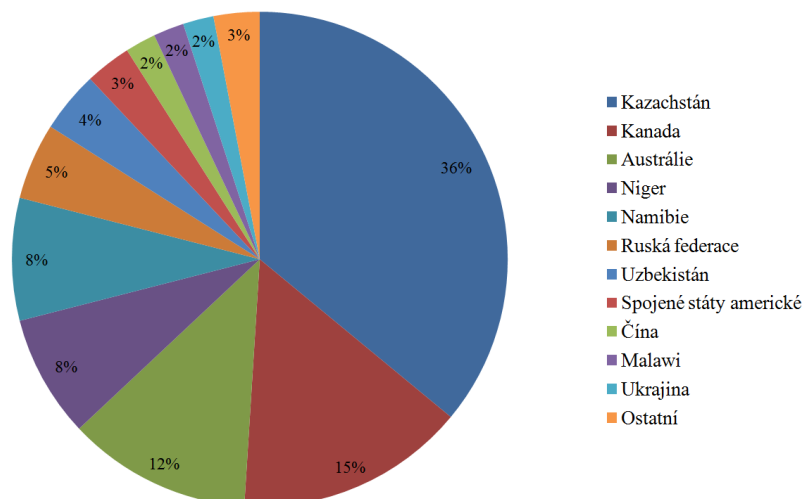


Obr. 3.1 Palivový cyklus [9]

3.1 Přední část palivového cyklu

Za přední část palivového cyklu považujeme procesy od těžby uranu po dodání palivových článků do reaktoru. [7], [8]

Uran se v přírodě nachází většinou ve formě rud. Obsah uranu v rudě má široké rozpětí od setiny procenta až po jednotky procent. V dnešní době se za ekonomicky těžitelnou rudu považuje ta s obsahem alespoň 0,1 % uranu [7]. Poměrně často se uran získává jako vedlejší produkt při těžbě vzácných kovů (měď, zlato). Pro tento případ je ekonomická koncentrace alespoň 0,01 % uranu [7]. Na Obr. 3.2 je zobrazena produkce uranu v roce 2012. Stojí za povšimnutí, že kromě Kanady nemá žádná z prvních pěti zemí s největší produkcí uranu žádnou jadernou elektrárnu v provozu a Austrálie má dokonce jadernou energetiku zakázanou ze zákona. [7], [8]



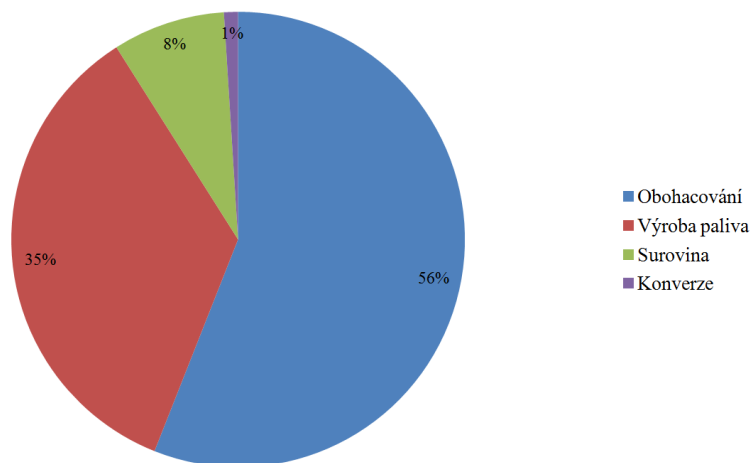
Obr. 3.2 Produkce uranu v roce 2012 (Celkem 58 816 tun uranu) [10]

Uranová ruda se po vytěžení rozdrťí, jemně rozemele a sloučeniny uranu se z ní vymývají chemickým loužením. Ty se zachytávají na iontových sítích, z nichž se chemicky vymývají a filtrací a vysušením převádí na poloprodukt nazývaný žlutý koláč. Jedná se o žlutý práškový diuranát sodný nebo diuranát amonný. Tento poloprodukt obsahuje obvykle 60-85 % uranu. Dále se provádí jeho konverze na plynný hexafluorid uranu UF_6 , který se dodává do obohacovacích závodů. [7], [8]

Přírodní uran obsahuje pouze 0,711 % ^{235}U [7], který je snadno štěpitelný a jen některé typy reaktorů jsou schopny pracovat s přírodním uranem jako palivem. Lehkovodní reaktory, které se používají i u nás, nemohou díky většímu počtu neutronových absorbátorů v aktivní zóně pracovat s přírodním uranem, proto se palivo obohacuje přibližně na 2-5 % obsahu izotopu ^{235}U . Hmotnosti atomů obou izotopů ^{235}U a ^{238}U se liší pouze nepatrně a chemické vlastnosti mají stejné, proto patří obohacování paliva z ekonomického i technického hlediska k nejnáročnějším procesům palivového cyklu. [2], [7], [8]

Obohacený hexafluorid uranu se chemicky konvertuje na prášek oxidu uraničitého UO_2 . Oxid uraničitý je dále lisován do palivových tabletek (peletek) o průměru přibližně 15 mm a výšce několika centimetrů, které se při vysoké teplotě spékají v peci. Peletky jsou následně vkládány do dutých tyčí vyrobených ze zirkoniové slitiny, kromě tyčí pro reaktory typu AGR a pro rychlé reaktory, které jsou vyrobeny z nerezové oceli. Tyče se následně natlakuji inertním plynem (heliem), který zlepšuje přenos tepla, a poté se svaří. Palivové tyče (někdy též proutky) jsou dále vyskládány do čtyřbokých či šestibokých kazet a spojením s dalšími konstrukčními prvky vzniká palivová kazeta (někdy též pracovní kazeta). [2], [7]

Na Obr. 3.3 je zobrazena ekonomická nákladnost přední části palivového cyklu. Z grafu lze vyvodit, kde se dá při výrobě paliva ušetřit. Cena výroba paliva, konverze a suroviny ovlivňuje cenu paliva ze 44 % a není možné ji nijak jednoduše ovlivnit. Naproti tomu 56 % z celkové ceny tvoří obohacení, které je vysoce energeticky náročné. To je jeden z důvodů proč se v reaktorech snižuje množství látek zachycujících neutrony, aby obohacení nemuselo být tak vysoké.



Obr. 3.3 Ekonomická nákladnost jednotlivých procesů přední části palivového cyklu [7]

3.2 Střední část palivového cyklu

Jako střední část palivového cyklu chápeme takzvané energetické využití jaderného paliva v reaktoru. Čerstvé palivo je převezeno do elektrárny, kde je uskladněno ve skladu čerstvého paliva až do doby zavezení do reaktoru. Podle typu reaktoru a stupně vyhoření jsou palivové články provozovány 3 až 5 let a poté jsou skladovány v bazénu použitého paliva za účelem chlazení produkovaného zbytkového tepla a stínění. V bazénu zůstávají po dobu 5 až 10 let, během které poklesne tepelný výkon a aktivita. Po ochlazení se palivové články odvezou z bazénu do závodu na přepracování paliva, do meziskladu použitého paliva nebo se mohou trvale uložit do země. [7]

3.3 Zadní část palivového cyklu

K ukončení palivového cyklu se v dnešní době používají dvě technologie. Buďto se použité palivo přepracovává v závodech nebo se ukládá buď do meziskladů nebo trvale do země. [7]

Velkým průkopníkem v přepracování použitého paliva je Francie, která je velmocí v energetickém užití jaderné energie. Použité palivo obsahuje po ukončení kampaně asi 3 % štěpných produktů a pouze je můžeme označovat jako skutečný odpad. Problém přepracovávání je vysoká energetická náročnost a z důvodu nízké ceny uranu a čerstvého paliva je dnes celý proces považován za neekonomický. [7]

S trvalým uložením použitého paliva je počítáno například v USA nebo ve Finsku, kde je použité palivo prohlášeno za odpad. Princip spočívá v tom, že se vysokoaktivní odpady uloží po dobu skladování do umělého díla vybudovaného ve velké hloubce ve stabilním geologickém prostředí. [7]

Oficiálním stanoviskem České republiky je vybudování hlubinného úložiště, jehož provoz se předpokládá kolem roku 2065. V roce 1997 byla zřízena Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR státní organizace správa úložišť radioaktivních odpadů. Tato organizace se mimo jiné zabývá přípravami, výstavbou a provozem úložišť radioaktivních odpadů a například také spravuje odvozy původců radioaktivního odpadu na jaderný účet. [11]

4 ČERPÁNÍ PROJEKTOVÝCH REZERV

Čerpání projektových rezerv je umožněno díky předimenzování původního návrhu, vylepšování technologií, zpřesnění výpočetních kódů, novým znalostem fyziky materiálů a mnoha dalších inovací. Zvyšování množství vyrobené energie bývá provedeno zvyšováním koeficientu ročního využití (zkracováním dob odstávek, prodloužení rozestupů generálních oprav, atd.), vylepšením řízení provozu a údržby, vyšším obohacením paliva (s tím související prodlužování palivového cyklu) a zvyšováním výkonu. [12], [13]

4.1 Zvyšování výkonu

Základem každého využívání projektových rezerv je bezpečnost. Každý projekt, který uvažuje o využití výkonových rezerv je potřeba analyzovat podle mnoha kritérií, ale dominantní jsou již výše zmiňovaná jaderná bezpečnost, ekonomická návratnost a minimalizace čerpání životnosti hlavních komponent elektrárny. [12]

4.1.1 Zvyšování výkonu Elektrárny Temelín

Elektrárna Temelín je tvořena dvěma výrobními bloky s tlakovodními reaktory VVER 1000 typu V 320. První blok začal vyrábět elektřinu 21. 12. 2000. Prvotní jmenovitý elektrický výkon jednoho bloku stanovený původním projektem byl spočten na 981 MW. V roce 2007 určil prováděcí projekt elektrický výkon jednoho bloku na 994 MW. [14], [15]

Roku 2007 došlo k modernizaci vysokotlakých částí turbín, která přinesla zvýšení účinnosti vysokotlakých dílů a zvýšila elektrický výkon bloků z 994 MW na 1020 MW. Při této modernizaci došlo k výměně vysokotlakých rotorů, vnitřních těles a rozváděcích kol včetně jejich nosičů. Tato renovace byla také zapříčiněna poruchami v místech uchycení lopatek některých oběžných kol k vlastnímu rotoru zjištěnými v roce 2004. [15]

V září 2013 byla završena fáze zvyšování výkonu obou bloků o čtyři procenta. Využitím projektových rezerv se zvýšil tepelný výkon každého bloku z 3000 MW na 3120 MW. Umožnilo to vylepšení výpočetních kódů a použití nového paliva od firmy TVEL, která zajistila i potřebné bezpečnostní analýzy pro zvýšenou hladinu výkonu. Efektivnější přenos tepelného výkonu z reaktoru do parogenerátoru byl získán malým zvýšením teploty chladiva v horké větvi cirkulačních smyček primárního okruhu, což patří k projektovým rezervám. Průtok chladiva, tedy i spotřeba energie hlavních cirkulačních čerpadel zůstala stejná. Významnou modernizací prošly také elektrické generátory, které byly přetypovány z původního jmenovitého výkonu 1000 MW na 1125 MW. Tato modernizace má za následek zvýšení elektrického výkonu o 40 MW. Před najetím na nový výkon byla potřeba uskutečnit několik technických úprav. Jednalo se o posílení kondenzátních čerpadel pro přepravu vody v nejaderné části elektrárny a přenastavení řídicích systémů. [16], [17]

V září 2014 byly na prvním bloku vyměněny tři nízkotlaké rotory včetně satorových částí a systém regulace turbíny. Díky novým nízkotlakým dílům turbíny se zvýšila účinnost přeměny tepelné energie páry na mechanickou energii turbíny a tím se zvýšil výkon turbogenerátoru o dvě procenta, tedy o 22 MW. Celkový elektrický výkon bloku se tak navýšil z 1056 MW na 1078 MW. Tato modernizace proběhla za zachování stejného tepelného výkonu reaktoru a stejné spotřebě paliva. V roce 2015 je výměna nízkotlakých dílů plánována i na druhý blok temelínské elektrárny, který prozatím pracuje s elektrickým výkonem 1056 MW. [18]

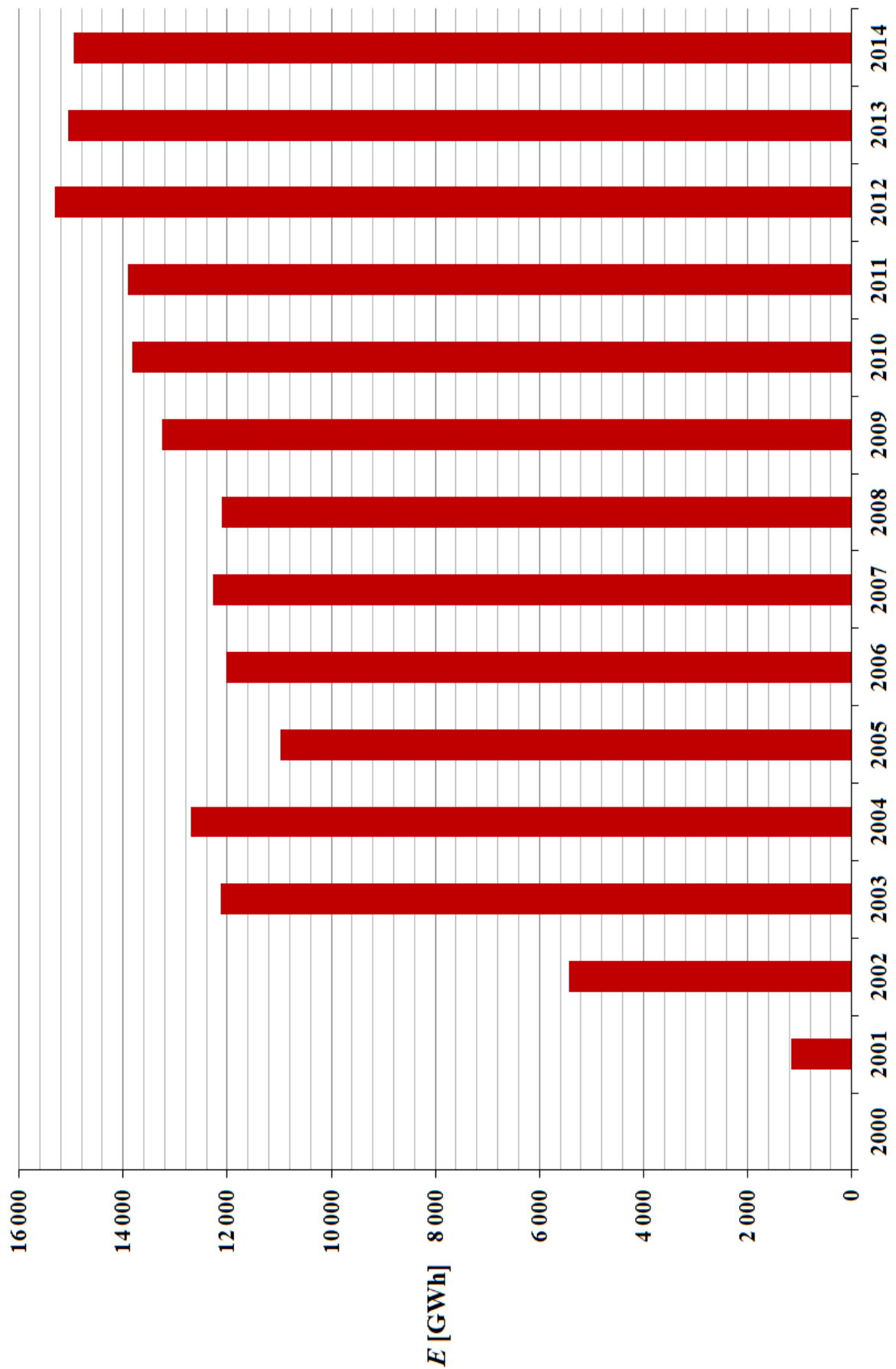
Všechny uskutečněné a plánované modernizace jsou shrnuty v přehledné tabulce *Tab. 4.1*. Vývoj výroby elektrické energie na ETE (Elektrárna Temelín) je shrnut v tabulce *Tab. 4.2* a graficky zpracován na *Obr. 4.1*.

Tab. 4.1 Shrnutí modernizací zvyšování výkonu na ETE [15], [16], [18]

rok	bloky	očekávané zvýšení výkonu	očekávaný nárůst výroby	modernizace
[-]	[-]	[MW/blok]	[MWh]	[-]
2007	1. a 2.	26	350 000	výměna vysokotlakých dílů turbíny
2013	1. a 2.	40	600 000	zvýšení teplotního výkonu reaktoru
2014	1.	22	170 000	výměna nízkotlakých dílů turbíny
2015	2.	22	170 000	výměna nízkotlakých dílů turbíny

Tab. 4.2 Výroba ETE v letech 2000-2014 zaokrouhlená na GWh [19], [20]

Rok	2000	2001	2002	2003	2004
Výroba [GWh]	2	1 156	5 439	12 117	12 692
Rok	2005	2006	2007	2008	2009
Výroba [GWh]	10 984	12 021	12 265	12 103	13 253
Rok	2010	2011	2012	2013	2014
Výroba [GWh]	13 823	13 914	15 302	15 066	14 950



Obr. 4.1 Výroba ETE v letech 2000-2014 zaokrouhlená na GWh [19], [20]

4.1.2 Zvyšování výkonu Elektrárny Dukovany

Elektrárna Dukovany je tvořena čtyřmi výrobními bloky s tlakovodními reaktory VVER 440 typu V 230. Dne 3. 5. 1985 byl uveden do zkušebního provozu první reaktorový blok. Druhý a třetí blok byly připojeny v roce 1986 a poslední čtvrtý blok byl uveden do provozu v červenci 1987. Původním projektem byl vypočten jmenovitý elektrický výkon jednoho bloku na 440 MW. [21]

V roce 1999 začala první ze tří etap projektu modernizace zařízení pro EDU. Hlavním cílem bylo prodloužení životnosti kondenzátorů, který byl proveden náhradou původních trubkových svazků ze slitiny $\text{CuZn}_{20}\text{Al}_2$ za titanové trubky zaválcované a zavařené do titanových trubkovic. Modernizace přinesla navýšení výkonu o 1,65 MW na každé z osmi instalovaných turbín. Dalším přínosem bylo snížení míry podchlazení kondenzátu a snížení obsahu rozpuštěného kyslíku. [22]

Druhá etapa obsahovala výměnu systému řízení a kontroly reaktoru a také kompletní výměnu 16 nízkotlakých dílů turbín a měla zajistit vysokou spolehlivost a dosažení zvýšeného výkonu turbíny. Ke zvýšení účinnosti byly použity rozváděcí i oběžné lopatky nových profilů. Nové nízkotlaké díly obsahovaly prostředky proti eroznímu opotřebení, a to jak pasivní povrchové zakalení náběžných hran oběžných lopatek čtvrtého a pátého stupně, tak i aktivní, provedené u pátého stupně použitím dutých rozváděcích lopatek. Modernizace započala v únoru 2005 na třetím bloku, v únoru 2007 byl zmodernizován čtvrtý blok, v září 2007 první blok a v květnu 2008 byla dokončena na druhém bloku. Renovací zařízení se snížila měrná spotřeba tepla na výrobu elektřiny o tři celé šest desetin procenta a pomocí toho a přesnější kontroly a regulace došlo ke zvýšení výkonu bloku na 455,5 MW za stejného výkonu reaktoru. [22], [23], [24]

Závěrečná etapa se skládala z následujících dílčích projektů. [25], [26]

- **Výměna průtočných částí vysokotlakých dílů turbín** - znamenala náhradu vysokotlakých rotorů, rozváděcích kol, vnitřních těles vysokotlakých dílů, náhradu případně modernizaci vnějších vysokotlakých těles, repasi ložisek a výměnu ucpávek regulačních ventilů. Termodynamická účinnost turbíny byla zvýšena díky použití rozváděcích i oběžných lopatek nových profilů s takzvaným 3D tvarováním a tím došlo ke snížení měrné spotřeby tepla bloku.
- **Úprava statorů generátorů** - jmenovitý výkon generátoru byl po rekonstrukci zvýšen z původních 259 MVA na 300 MVA při jmenovitém účinníku 0,85 a jmenovitý proud byl zvýšen z 9,5 kA na 11 kA.
- **Náhrada měřících dýz a vysokotlakých odlučovačů na parovodech** - bylo provedeno hlavně z důvodu snížení ztrát v parním potrubí na trase z parogenerátoru do turbosoustrojí.
- **Zvýšení hltnosti přepouštěcích stanic do kondenzátorů** - pro zvládnutí některých přechodných dějů pouze za pomoci přepouštěcích stanic do kondenzátorů bez otevření přepouštěcích stanic do atmosféry.
- **Regulace hladin v hlavním kondenzátoru** - s korekcí na hladinu v napájecí nádrži pro dynamické chování bloků.
- **Modernizace blokových transformátorů** - došlo ke zvýšení jmenovitého výkonu blokových transformátorů z 250 MVA na 300 MVA. Dále se snížily ztráty blokových

transformátorů za současného zajištění spolehlivého vyvedení výkonu po zvýšení výkonu generátoru.

- **Rekonstrukce vyvedení výkonu generátorů** - jmenovitý proud byl navýšen z původních 10 kA na 11 kA a z toho důvodu byly vyměněny kondenzátory u generátorového vypínače, bylo upraveno připojení generátorového vypínače a blokových transformátorů na zapouzdřené vodiče

Dále byly provedeny úpravy na ovládacích panelech ve velínu bloku, byl aktualizován systém monitorující stav aktivní zóny reaktoru a v neposlední řadě došlo ke změnám paliva v aktivní zóně, díky kterým se zvýšil tepelný výkon bloku o pět procent z 1375 MW na 1444 MW. Realizace začala v únoru 2007 na třetím reaktorovém bloku a byla ukončena v květnu 2012 na druhém reaktorovém bloku. Modernizací zařízení došlo ke zvýšení termodynamické účinnosti turbín, snížení jejich měrné spotřeby tepla o dvě celé šest desetin procenta a zvýšení elektrického výkonu bloku na 500 MW. [24], [25], [26]

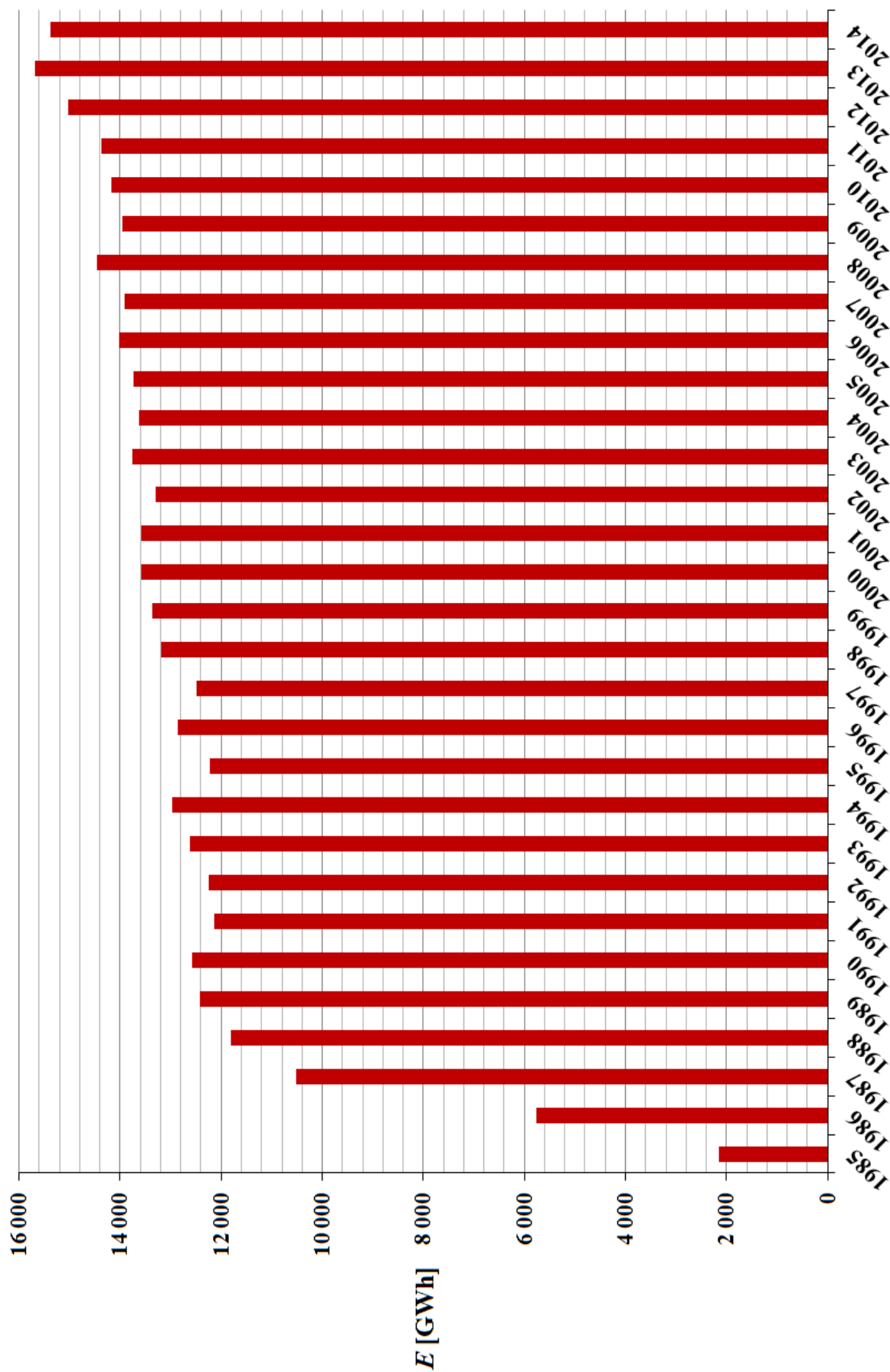
Všechny uskutečněné modernizace jsou shrnuty v přehledné tabulce Tab. 4.3. Vývoj výroby elektrické energie na EDU je shrnut v tabulce Tab. 4.4 a graficky zpracován na Obr. 4.2.

Tab. 4.3 Shrnutí modernizací zvyšování výkonu na EDU [22], [23], [24], [25], [26]

rok	bloky	očekávané zvýšení výkonu	etapa
[-]	[-]	[MW/blok]	[-]
1999-2000	1. - 4.	3,3	první (výměna kondenzátorů)
2005	3.	12,2	druhá (výměna nízkotlakých dílů turbín,...)
2007	4. a 1.	12,2	druhá (výměna nízkotlakých dílů turbín,...)
2008	2.	12,2	druhá (výměna nízkotlakých dílů turbín,...)
2009	3.	44,5	třetí (výměna vysokotlakých dílů turbín,...)
2010	4.	44,5	třetí (výměna vysokotlakých dílů turbín,...)
2011	1.	44,5	třetí (výměna vysokotlakých dílů turbín,...)
2012	2.	44,5	třetí (výměna vysokotlakých dílů turbín,...)

Tab. 4.4 Výroba EDU v letech 1985-2014 zaokrouhlená na GWh [27], [28], [29], [30]

Rok	1985	1986	1987	1988	1989
Výroba [GWh]	2 139	5 769	10 527	11 816	12 418
Rok	1990	1991	1992	1993	1994
Výroba [GWh]	12 585	12 132	12 250	12 627	12 977
Rok	1995	1996	1997	1998	1999
Výroba [GWh]	12 230	12 850	12 494	13 178	13 357
Rok	2000	2001	2002	2003	2004
Výroba [GWh]	13 588	13 593	13 299	13 755	13 632
Rok	2005	2006	2007	2008	2009
Výroba [GWh]	13 744	14 025	13 907	14 448	13 955
Rok	2010	2011	2012	2013	2014
Výroba [GWh]	14 176	14 369	15 022	15 680	15 371



Obr. 4.2 Výroba EDU v letech 1985-2014 zaokrouhlená na GWh [27], [28], [29], [30]

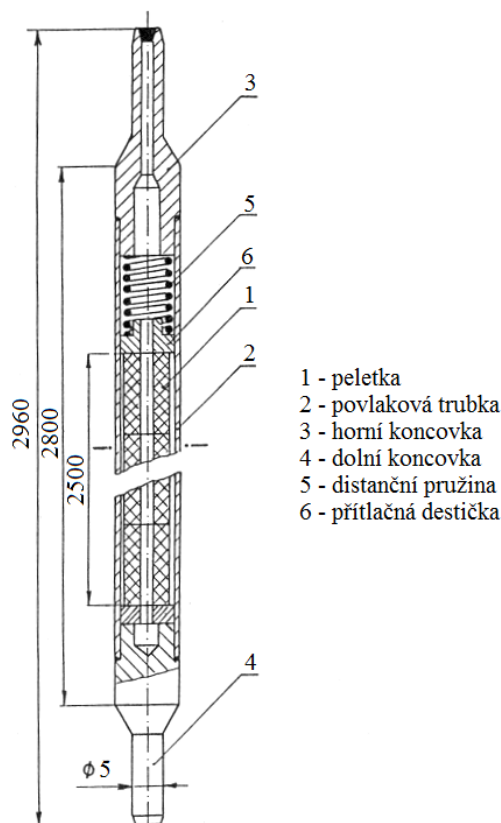
5 PALIVO REAKTORU VVER-440

V následující kapitole je uveden popis kazety pro tlakovodní reaktory typu VVER-440 (vodo-vodjanoj energetičeskij reaktor), které se používají v Elektrárně Dukovany. Tato kapitola je zde zařazena pro pochopení následující kapitoly o vývoji jaderného paliva. [7]

Nejmenší částí palivové kazety je peletka. Jedná se o oxid uranický UO_2 slisovaný do dutého válce. Peletky jsou vysoké 10 až 30 mm [7], o průměru 7,55 mm [7], průměr centrálního otvoru je v rozmezí 1,4 až 1,6 mm [7] s minimální hustotou $10\ 200\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. [1]

Peletky jsou uzavřeny v povlakové trubce tvořené ze slitiny zirkonia s 1 % příměsí niobu. Povlaková trubka je zakončena dvěma koncovkami, které k ní jsou přivařeny elektronovým svazkem. [1]

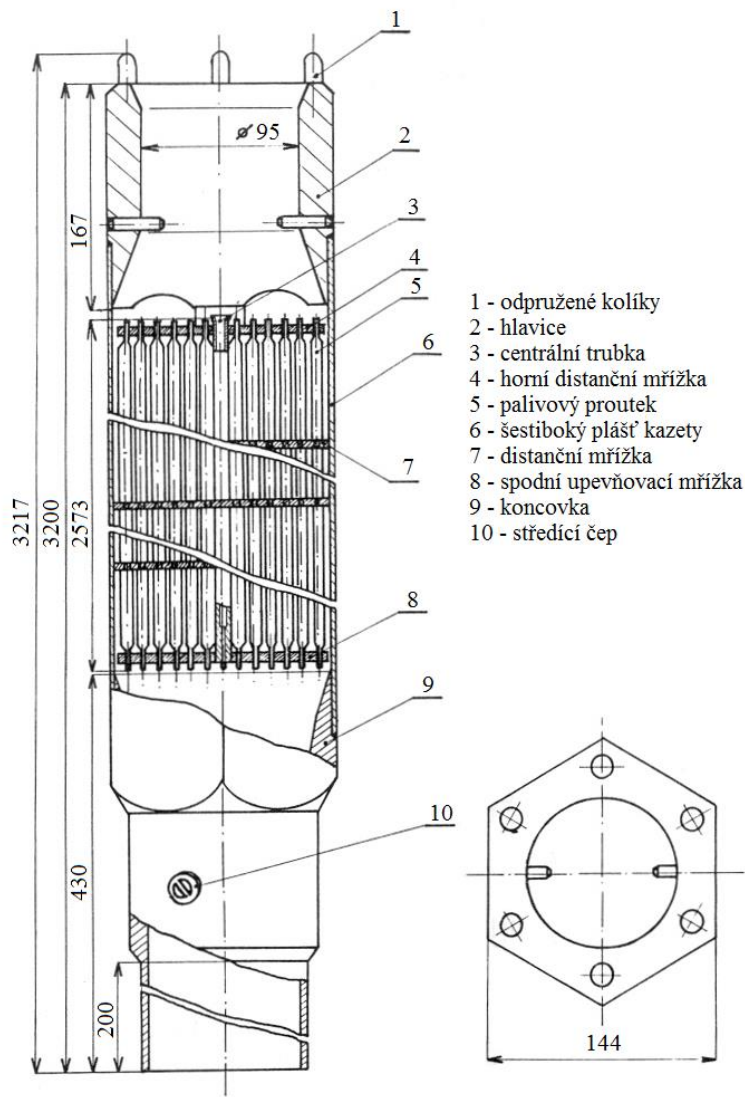
Povlaková trubka obsahující palivové peletky je umístěna v palivovém proutku, viz Obr. 5.1 (uvedené rozměry jsou v milimetrech). V horní části palivového proutku je umístěna distanční pružina, která dosedá na přítlačnou destičku a udržuje tak palivové peletky v pracovní poloze. Palivové proutky jsou při výrobě naplněny héliem s přetlakem 300 až 700 kPa [7] ke zlepšení přestupu tepla. S rostoucím vyhořením paliva roste tlak v proutku na 10 až 17 MPa [1], kvůli plynným produktům štěpení. Každý proutek obsahuje přibližně 1,06 kg UO_2 [7]. [1], [7]



Obr. 5.1 Palivový proutek reaktoru VVER-440 [7]

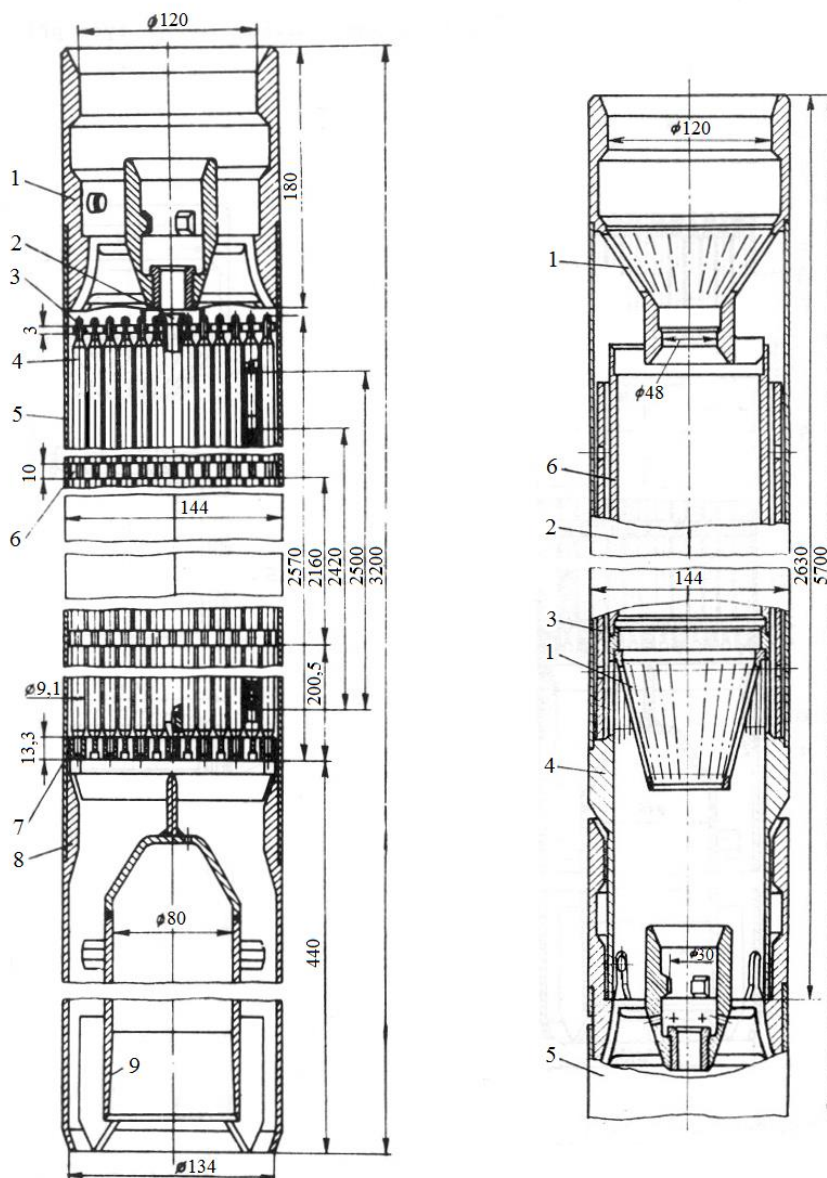
Palivová kazeta viz Obr. 5.2 (uvedené rozměry jsou v milimetrech) je základní jednotkou aktivní zóny. Nosnou část kazety představuje šestiboký plášť s hlavicí a koncovkou. Sto dvacet šest palivových proutků je udržováno distančními mřížkami v přesně definovaném geometrickém uspořádání. Palivové proutky jsou v kazetě uspořádány v trojúhelníkové mříži s roztečí 12,2 mm [7]. Proutky jsou svými dolními koncovkami upevněny ve spodní mřížce, zatímco horní mřížkou procházejí posuvně, což dovozuje rozdílnou teplotní roztažnost proutků a pláště kazety. Distanční

mřížky jsou ve středu spojeny centrální trubkou ze zirkonia. V hlavici palivové kazety je zabudováno šest odpružených kolíků, které umožňují pružné uložení kazety v reaktoru. Válcovou koncovkou je kazeta usazena ve spodní nosné desce. Ve spodní části je upevněn středící čep, který fixuje polohu palivové kazety. Šestiboký plášť kazety je vyroben ze slitiny zirkonia s 2,5 % příměsí niobu a rozměrově sedí na klíč 144 mm. [1], [7]



Obr. 5.2 Palivová kazeta reaktoru VVER-440 [7]

Regulační kazeta, viz Obr. 5.3 (uvedené rozměry jsou v milimetrech), je u reaktoru VVER-440 vertikálně pohyblivá a dvoudílná. Používá se jak pro regulaci reaktoru, tak pro havarijný odstavení reaktoru. Horní část tvoří absorpční nástavec a dolní část je analogická palivové kazetě. Změna reaktivity je tedy způsobena jak vysunováním palivové části z aktivní zóny, tak zasouváním absorbátoru do aktivní zóny (tandemová regulace). Absorpční část je vyrobena z šestibokého ocelového pláště, stejného tvaru jako plášť palivové kazety. Na vnitřním povrchu pláště jsou upevněny vložky z borové oceli obsahující dvě hmotnostní procenta bóru, vyplňující celý vnitřní povrch. Do absorpční části kazety je vložena další trubka, která zajišťuje intenzivnější odvod tepla z absorpčních elementů. Na spodním konci palivové části kazety je tlumící zařízení, které zmírňuje dopad kazety při bezpečnostním odstavení reaktoru. [7]



Palivová část regulační kazety

- 1 - hlavice
- 2 - centrální trubka
- 3 - horní distanční mřížka
- 4 - palivový proutek
- 5 - šestiboký plášť kazety
- 6 - distanční mřížka
- 7 - spodní upevňovací mřížka
- 8 - spodní koncovka
- 9 - hydraulický tlumič

Absorpční část regulační kazety

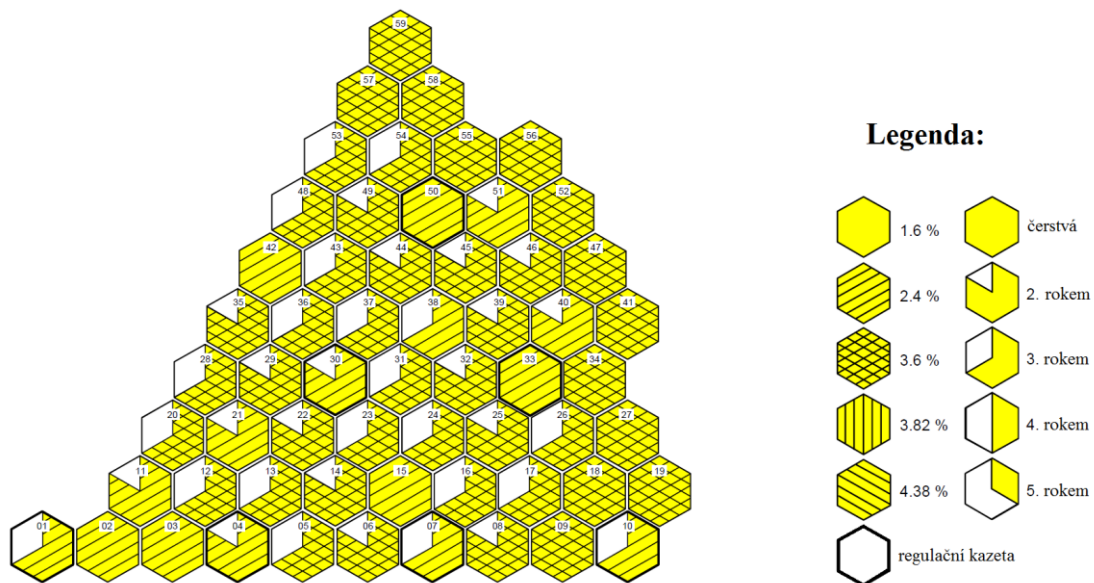
- 1 - perforovaný kužel
- 2 - šestiboký plášť
- 3 - absorpční vložka z borové oceli
- 4 - spojka
- 5 - palivová část

Obr. 5.3 Regulační kazeta reaktoru VVER-440 [7]

6 VÝVOJ PALIVOVÉHO CYKLU A PALIVA NA ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY

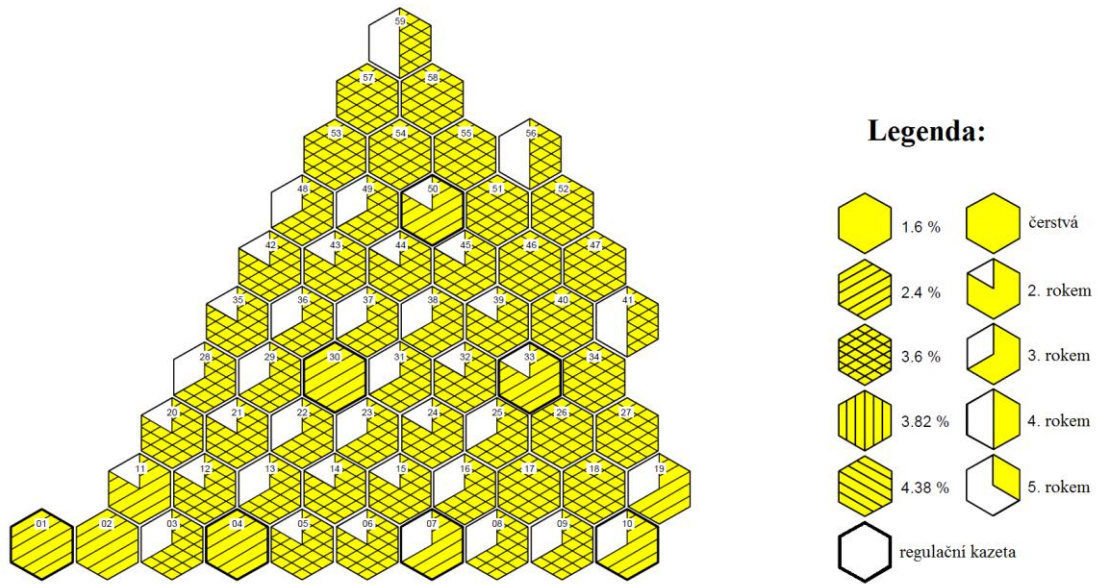
Palivový cyklus a palivo na Elektrárně Dukovany prošly během své historie mnoha změnami. Od projektovaného tříletého palivového cyklu je dnes na pětiletém s možným budoucím přechodem na šestiletý palivový cyklus, který se ale prozatím neplánuje.

Původně projektovaný palivový cyklus byl tříletý s délkou cyklu kolem 300 efektivních dní. Palivové kazety měly ve všech proutcích stejné obohacení a to 1,6 %, 2,4 % a 3,6 % ^{235}U . První a druhý rok se zaváželo 114 čerstvých palivových kazet a poslední rok cyklu 121. Průměrně se tedy ročně zaváželo 116 čerstvých kazet z toho 12 regulačních s obohacením palivové části 2,4 % ^{235}U , 24 palivových kazet s obohacením 2,4 % ^{235}U a 80 palivových kazet s obohacením 3,6 % ^{235}U . Původní schéma zavážení bylo "out-in-in", kde se čerstvé palivové kazety zavážely na okraj aktivní zóny, rok staré kazety se posunuly více do středu a nejstarší kazety se přesunuly do středu aktivní zóny. Toto schéma se ukázalo jako neekonomické, z důvodu vysokého úniku neutronů. Aktivní zóna je u reaktorů typu VVER šestinově symetrická, proto stačí jedna šestina aktivní zóny pro ukázkou rozložení palivových kazet v reaktoru Obr. 6.1. Další nevýhodou byla vysoká zátěž reaktorové nádoby neutronovým zářením. Jelikož je životnost celého reaktorového bloku bezprostředně závislá na životnosti reaktorové nádoby, začalo se postupně přecházet k čtyřletému palivovému cyklu. [31], [32]



Obr. 6.1 Tříletá palivová vsázka [32]

V roce 1987 nastal přechod k tři a půlletému cyklu (Obr. 6.2). Hlavním důvodem přechodu na tři a půlletý cyklus bylo snížení zátěže reaktorové nádoby a úspora čerstvých kazet. U tohoto cyklu se ročně zaváželo 99 čerstvých kazet z toho 12 až 13 regulačních kazet s obohacením palivové části 2,4 % ^{235}U a 87 palivových kazet s obohacením 3,6 % ^{235}U . [32]

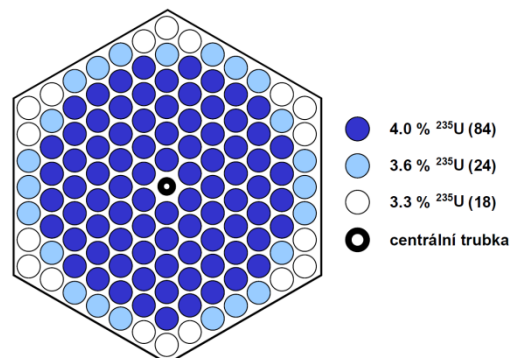


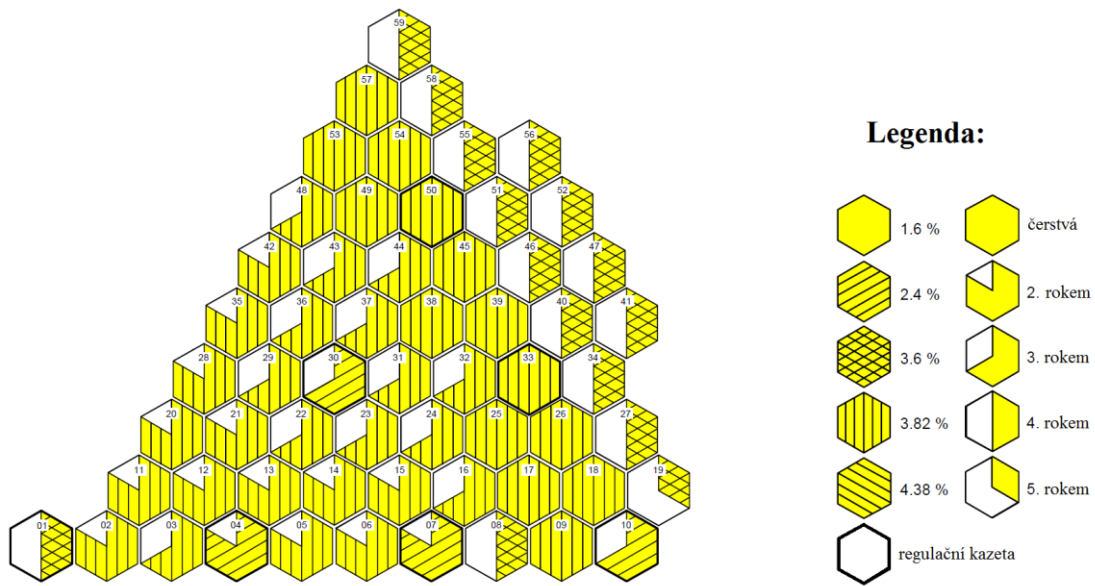
Obr. 6.2 Tři a půlletá palivová vsázka [32]

K budoucímu přechodu na plně čtyřletý cyklus muselo být provedeno několik inovací v konstrukci palivových kazet. Nejvýznamnějšími inovacemi bylo zvýšení obohacení palivových částí regulačních kazet na 3,6 % ^{235}U , zavedení radiálně profilovaných palivových kazet se středním obohacením 3,82 % ^{235}U (kombinace palivových proutků s obohacením 3,3 %, 3,6 % a 4,0 % ^{235}U) viz Obr. 6.3 a zlepšení neutronové bilance v aktivní zóně, a to vsázkami se sníženým únikem neutronů, snížením tloušťky obálky palivových kazet z 2 mm na 1,5 mm (u regulačních kazet zůstala tloušťka obálky 2 mm) a výměnou železných distančních mřížek za zirkoniové. U profilovaného paliva byl snížen průměr centrálního otvoru palivové peletky z 1,6 mm na 1,4 mm. [31], [32]

Vsázky se sníženým únikem neutronů byly největším přínosem ke zlepšení neutronové bilance. Schéma zavážení bylo "in-in-in-out", kde se na okraj aktivní zóny umísťují čtyřleté palivové kazety, které mají nízké relativní výkony, a tím se snižují dávky na tlakovou nádobu reaktoru. Výměna distančních mřížek a snížení tloušťky obálky přispěly ke snížení parazitního zachytu neutronů a tím prodloužení palivového cyklu. [31], [32]

V roce 1998 nastal přechod k čtyřletému cyklu (Obr. 6.4) a to díky inovacím vyjmenovaným výše. U tohoto cyklu se ročně zaváželo průměrně 87 čerstvých kazet z toho 6 regulačních kazet s obohacením palivové části 2,4 % ^{235}U , 5 regulačních kazet s obohacením palivové části 3,6 % ^{235}U a 76 radiálně profilovaných palivových kazet se středním obohacením 3,82 % ^{235}U . V roce 1999 se přešlo k používání regulačních kazet s obohacením 3,82 % ^{235}U . [31], [32]

Obr. 6.3 Řez radiálně profilované palivové kazety se středním obohacením 3,82 % ^{235}U [32]

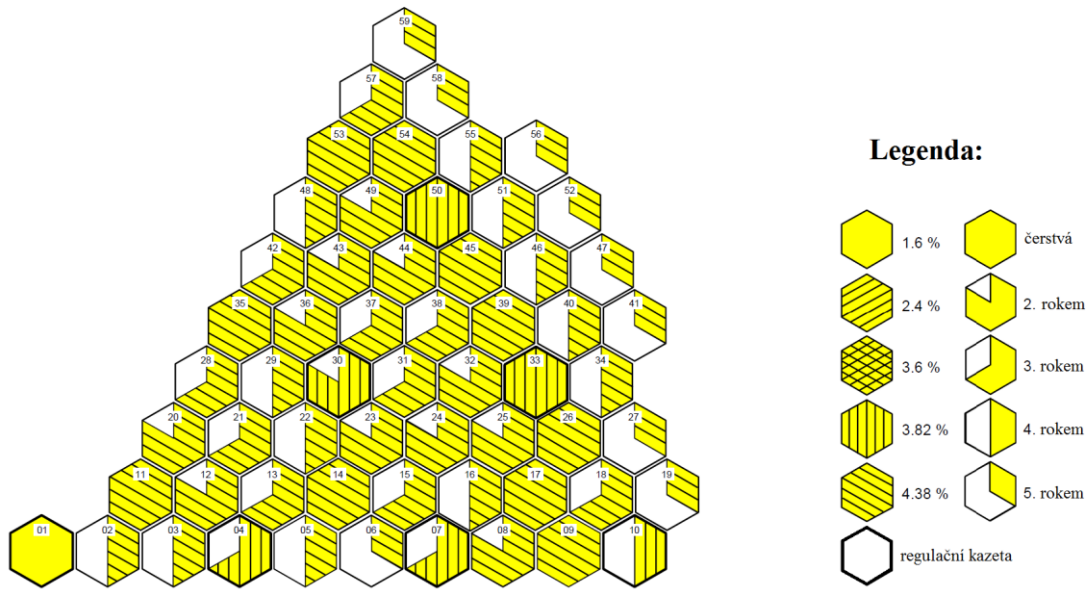


Obr. 6.4 Čtyřletá palivová vsázka [32]

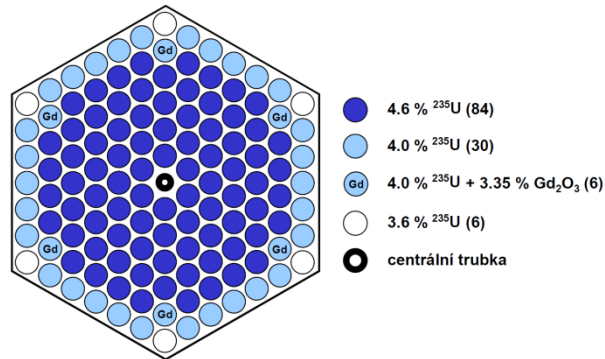
Přechod na pětiletý palivový cyklus (Obr. 6.5) nastal v roce 2003 a byl uskutečněn díky zavedení nových palivových kazet s vyhořivajícími absorbátory na bázi gadolinia, označovaných Gd-1 (Obr. 6.6). Tyto palivové kazety jsou radiálně profilované se středním obohacením 4,38 % ^{235}U . Jedná se o kombinace tří typů palivových proutků s obohacením 3,6 %, 4,0 % a 4,6 % ^{235}U . U těchto kazet byla snížena tloušťka obálky palivové části regulační kazety z 2 mm na 1,5 mm a také byl snížen obsah hafnia v pokrytí palivového proutku z 0,05 % na maximálně 0,01 %. Při výrobě peletek je oxid gadolinitý Gd_2O_3 přímo smíchán s uranem a ty pak tvoří šest palivových proutků s obohacením 4,0 % ^{235}U . V jedné peletce je obsaženo 3,35 % Gd_2O_3 . Použité izotopy gadolinia ^{155}Gd a ^{157}Gd mají vysoký účinný průřez pro záchyt neutronů, ale po reakci s neutronem se mění na izotopy ^{156}Gd a ^{158}Gd , které mají oproti izotopům ^{155}Gd a ^{157}Gd zanedbatelný účinný průřez pro záchyt neutronů. Proto se tyto absorbátory označují jako vyhořivající. Gadolinium pomáhá na začátku kampaně s vyrovnáním výkonu v aktivní zóně a s vyhoříváním paliva jejich absorpční schopnosti mizí (absorbují zhruba do poloviny první kampaně 100-150 dní [33]). [31], [32], [33]

V souvislosti se zavedením paliva obsahující příměs gadolinia se významně snížila aktivita tritia ve vypouštěných vodách. Gadolinium obsažené v palivu umožňuje snížit průměrnou koncentraci kyseliny borité (H_3BO_3), což způsobí snížení produkce tritia, protože tritium vzniká hlavně jadernou reakcí bóru ^{10}B s neutronem přes dvě alfa záření. [34]

U pětiletého palivového cyklu je ročně zaváženo v průměru 72 čerstvých kazet, z toho 9 regulačních kazet s obohacením palivové části 3,82 % ^{235}U a 63 palivových kazet s obohacením 4,38 % ^{235}U . [31], [32]

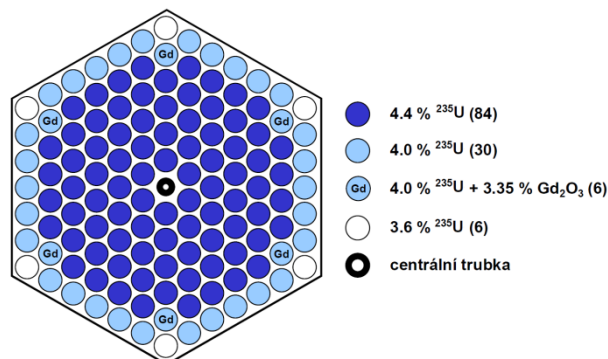


Obr. 6.5 Pětiletá palivová vsázka [32]



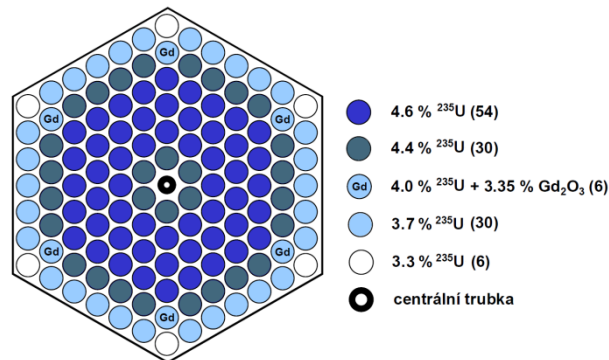
Obr. 6.6 Řez radiálně profilované palivové kazety Gd-1 [32]

V roce 2005 došlo k další inovaci palivových kazet, u kterých byl prodloužen palivový sloupec o 6 cm (zvýšila se hmotnost uranu v aktivní zóně), zlepšil se poměr voda - uran (zmenšil se vnější průměr pokrytí proutku a zvětšila rozteč mezi proutky z 12,2 na 12,3 mm) a snížil se průměr centrálního otvoru palivové peletky z 1,4 mm na 1,2 mm. Tato vylepšení umožnila snížit střední obohacení na 4,25 % ^{235}U . Toto palivo, označované jako Gd-2 (Obr. 6.7), si zachovalo díky zmíněným úpravám v konstrukci stejný multiplikační koeficient jako palivo typu Gd-1. [31], [35], [36]

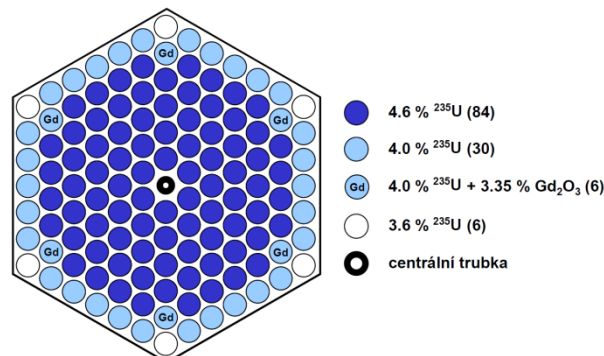


Obr. 6.7 Řez radiálně profilované palivové kazety Gd-2 [32]

Roku 2007 došlo k další inovaci palivové kazety, která se značí Gd-2+ (Obr. 6.8). Jde o kazetu vycházející z typu Gd-2 s optimalizací radiálního profilování obohacení. Toto palivo má stejné střední obohacení jako Gd-2 a umožnilo udržet pětiletý palivový cyklus při zkrácení doby odstávek. Ke zvýšení výkonu na 105 % a zároveň k udržení pětiletého cyklu bylo zapotřebí provést další inovaci palivové kazety, označenou jako Gd-2M (Obr. 6.9). Palivová kazeta Gd-2M, zavedena roku 2009, je konstrukčně shodná s kazetami typu Gd-2 a Gd-2+, ale radiální profilování obohacení má shodné s palivem Gd-1 (střední obohacení 4,38 % ^{235}U). Se zvýšením obohacení palivových kazet došlo také ke zvýšení obohacení palivové části regulační kazety a to z 3,82 % ^{235}U na 4,25 % ^{235}U . [31], [33], [35], [36], [37]

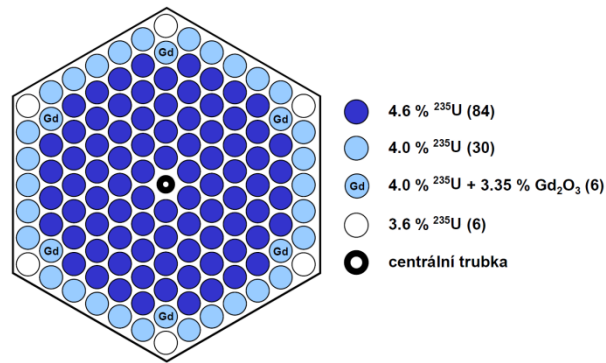


Obr. 6.8 Řez radiálně profilované palivové kazety Gd-2+ [38]



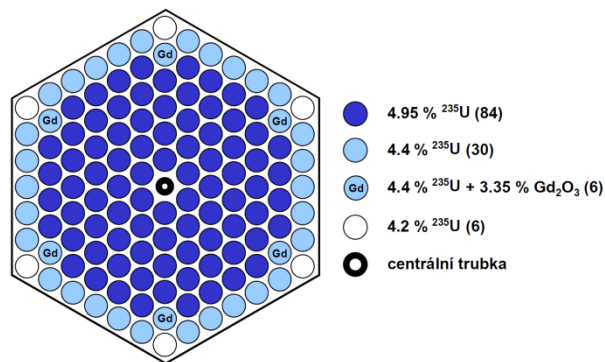
Obr. 6.9 Řez radiálně profilované palivové kazety Gd-2M [38]

V září 2014 byly poprvé zavedeny palivové kazety s označením Gd-2M+ (Obr. 6.10). Jedná se o palivo radiálně profilované se středním obohacením 4,38 % ^{235}U . Spolu se zavedením těchto nových palivových kazet se zvýšilo obohacení palivové části regulačních kazet ze 4,25 % ^{235}U na 4,38 % ^{235}U . Hlavní rozdíl oproti předchozím generacím paliva spočívá v optimalizaci konstrukce palivového proutku. Průměr palivové peletky byl rozšířen ze 7,6 mm na 7,8 mm a již neobsahuje centrální otvor (s výjimkou peletek s gadoliniovým vyhořivajícím absorbátorem). K dalším změnám patří ztenčení pokrytí peletek a zvětšení velikosti zrn v peletce z 10 μm na 25 μm , což kompenzuje záchyt štěpných produktů, který byl zmenšen kvůli odstranění centrálního otvoru. Obsah uranu se v jedné palivové kazetě zvýšil o 9,2 kg a v palivové části regulační kazety o 8,7 kg (rozdíl je způsoben různou hmotností uranu v palivové a regulační kazetě), což přispělo k vytvoření předpokladů pro prodloužení palivových kampaní při optimalizaci plánových odstávek při zachování pětiletého palivového cyklu, dále k zachování závažek bez negativního ovlivnění životnosti tlakové nádoby reaktoru a ke zvýšení efektivity využívání jaderného paliva. Konstrukce palivové kazety je nově doplněna tzv. debris filtrem, určeným pro zachytávání volných částic větších než 2 mm, které by mohly způsobit poškození palivových prutů při případném vniknutí do palivové kazety. [33], [36], [37], [39], [40]



Obr. 6.10 Řez radiálně profilované palivové kazety Gd-2M+ [36]

V budoucnu by byl možný přechod na šestiletý palivový cyklus, pro který by muselo být palivo Gd-2M+ (Obr. 6.11) obohaceno 4,76 % ²³⁵U. Při šestiletém cyklu by bylo zaváženo pouze 60 čerstvých kazet, což by znamenalo další úspory při nákupu paliva i při ukládání použitého paliva. Jeho použití se zatím nepředpokládá a větší důraz je kladen na udržení pětiletého palivového cyklu, případné zvyšování tepelného výkonu reaktoru, efektivnější využití paliva a snižování délky odstávek. [33], [36]



Obr. 6.11 Řez radiálně profilované palivové kazety Gd-2M+ s obohacením 4,76 % [36]

Průměrné počty zavážených palivových kazet pro tříletý až pětiletý palivový cyklus společně s jednotlivými množstvími palivových a regulačních kazet různých obohacení je zobrazen v Tab. 6.1. Důležité změny palivových kazet respektive palivových částí regulačních kazet v průběhu vývoje paliva je zobrazen v Tab. 6.2.

Tab. 6.1 Průměrné počty zavážených palivových kazet pro jednotlivé palivové cykly [32]

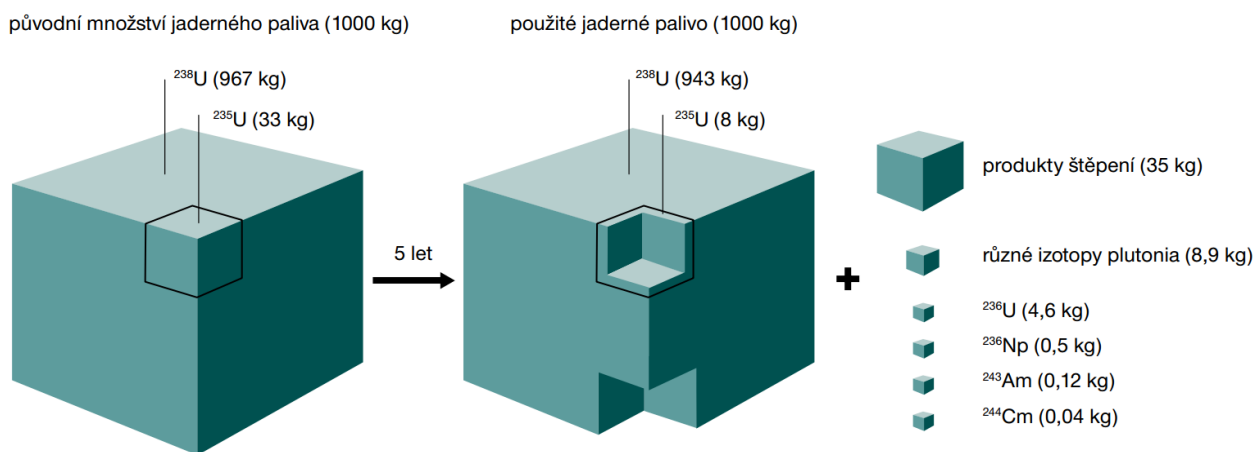
palivový cyklus	palivové kazety				palivové části regulačních kazet			roční počet zavážených kazet
	2,4 %	3,6 %	3,82 %	4,38 %	2,4 %	3,6 %	3,82 %	
tříletý	24	80,3			12			116,3
tří a půlletý	1,5	87			12			100,5
čtyřletý			76,5		6	4,5		87
pětiletý				63			9	72

Tab. 6.2 Důležité změny palivových kazet / palivových částí regulačních kazet v průběhu vývoje paliva [31], [32], [33], [35], [36], [38], [39], [40]

Typ jaderného paliva	Podstatné změny palivové kazety / palivové části regulační kazety vůči předchozím typům
Neprofilovaný standardní	Původní palivové kazety byly neprofilované (všechny proutky stejné obohacení) Původní obohacení kazet bylo 1,6 %, 2,4 % a 3,6 % ²³⁵ U
Neprofilovaný pokročilý	Výměna železných distančních mřížek za zirkoniové Snížení tloušťky obálky palivových kazet z 2 mm na 1,5 mm Zvýšení tlaku helia v palivových proutcích z 0,11-0,15 MPa na 0,45-0,75 MPa
Profilovaný 3,82 % ²³⁵ U	Zavedení profilování (kombinace tří typů palivových proutků s obohacením 3,3 %, 3,6% a 4 % ²³⁵ U) Zvýšení obohacení palivové kazety na 3,82 % ²³⁵ U Snížení průměru centrálního otvoru palivové peletky z 1,6 mm na 1,4 mm
Profilovaný Gd-1 4,38 % ²³⁵ U	Zavedení vyhořívajících absorbátorů na bázi gadolinia Zvýšení obohacení kazety z 3,82 % na 4,38 % ²³⁵ U (kombinace 3,6 %, 4 % a 4,6 % ²³⁵ U) Snížení tloušťky obálky palivové části regulační kazety z 2 mm na 1,5 mm Snížení obsahu hafnia v pokrytí palivového proutku z 0,05 % na maximálně 0,01 %
Profilovaný Gd-2 4,25 % ²³⁵ U	Prodloužení palivového sloupce o 6 cm (zvýšení hmotnosti uranu v aktivní zóně) Zvýšení rozteče mezi proutky z 12,2 mm na 12,3 mm Zmenšení tloušťky palivového proutku Snížení průměru centrálního otvoru palivové peletky z 1,4 mm na 1,2 mm Snížení obohacení kazety ze 4,38 % na 4,25 % ²³⁵ U při zachování stejného tepelného výkonu reaktoru
Profilovaný Gd-2+ 4,25 % ²³⁵ U	Optimalizace radiálního profilování obohacení
Profilovaný Gd-2M 4,38 % ²³⁵ U	Zvýšení obohacení kazety ze 4,25 % na 4,38 % ²³⁵ U při zvýšení tepelného výkonu reaktoru na 105 %
Profilovaný Gd-2M+ 4,38 % ²³⁵ U	Zvýšení průměru palivové peletky ze 7,6 mm na 7,8 mm Palivové peletky neobsahují centrální otvor (s výjimkou peletek s gadoliniovým absorbátorem) Ztenčení pokrytí peletek neobsahujících absorbátor z 0,63 mm na 0,54 mm Zvětšení velikosti zrn v peletce z 10 μm na 25 μm Zvýšení obsahu uranu v jedné palivové kazetě o 9,2 kg Zvýšení obsahu uranu v palivové části regulační kazety o 8,7 kg Přidání debris filtru pro zachytávání volných částic větších než 2 mm

7 POUŽITÉ PALIVO

Každý rok se v reaktoru vymění část palivových kazet, které už nejsou schopny ekonomicky udržovat řetězovou reakci. Toto použité palivo (Obr. 7.1) zůstává radioaktivní a po vyjmutí z reaktoru se pod hladinou vody přesouvá do bazénu vyhořelého paliva. Voda se musí neustále chladit, protože radioaktivním rozpadem se v palivu stále vyvíjí teplo. V bazénu je uloženo několik let, dokud jeho radioaktivita a zbytkový tepelný výkon neklesne na hodnotu umožňující jeho uložení do speciálních kontejnerů. Ty se poté přesouvají do meziskladu vyhořelého paliva, kde se skladují i několik desítek let. [41]



Obr. 7.1 Změna jaderného paliva po vyhoření v reaktoru [42]

7.1 Vyhoření paliva

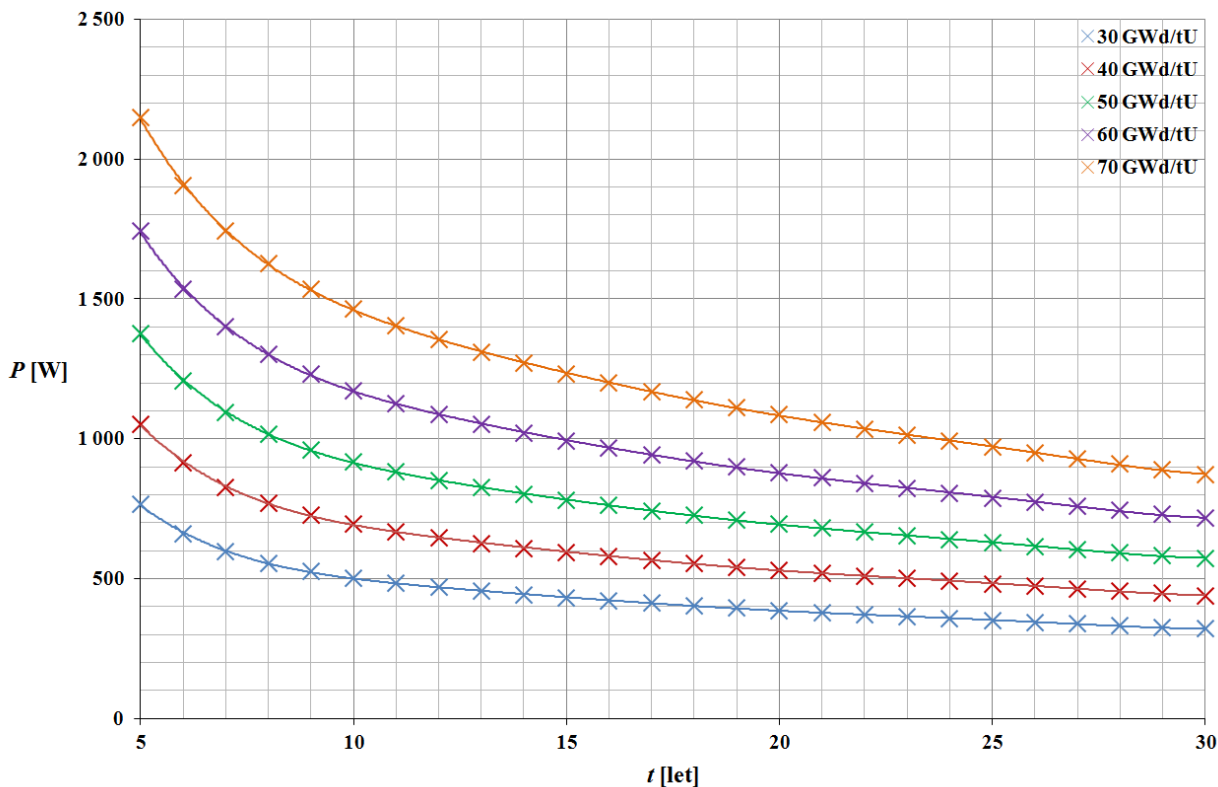
Pojem vyhoření paliva je používán k určení množství uranu spotřebovaného v reaktoru. Je vyjadřován v gigawatt dnech na tunu uranu (GWd/t_{U}). Vyhoření závisí na době ponechání paliva v aktivní zóně reaktoru a také na tepelném výkonu reaktoru. Hodnota vyhoření ovlivňuje teplotu paliva, radioaktivitu a fyzikální složení. [43]

V reaktoru se štěpením jader uranu uvolňuje energie a zahřáté pokrytí obklopující palivo reaguje s chladicí vodou. Touto reakcí vzniká na vnějším povrchu kovového pláště oxid a uvolňuje se vodík. Četnost této reakce je u čerstvého paliva malá, ale dosáhne-li palivo vyhoření $45 \text{ GWd}/t_{\text{U}}$, začíná se zvyšovat. Jako vysoké vyhoření se označuje takové, které přesáhne hodnotu $45 \text{ GWd}/t_{\text{U}}$. [43]

V průběhu let se vyhoření paliva v reaktorech zvýšilo a tím se umožnilo získat z paliva více energie. Průměrné vyhoření, které bylo před 20 lety $35 \text{ GWd}/t_{\text{U}}$ je dnes vyšší než $45 \text{ GWd}/t_{\text{U}}$. Velikost teploty a radioaktivity použitého paliva závisí na vyhoření, fyzikálním složení paliva a podmínkách v aktivní zóně. Všechny tyto okolnosti musí být brány v potaz při navrhování suchých kontejnerů a přepravních systémů pro použité palivo. [43]

Vyhoření je důležité pro posouzení návrhu kontejneru na použité palivo z důvodu teplotních a radioaktivních omezení. Při vysušování kontejneru se uvnitř zvyšuje tlak a palivo se zahřívá. To může způsobit zkřehnutí pokrytí paliva při jeho chlazení. Tyto změny závisí na vyhoření a typu pokrytí a musí se s nimi počítat pro systémy s vysokým vyhořením. Spousta práce byla udělána k pochopení podmínek, jak různé typy pokrytí jinak křehnou. [43]

Na Obr. 7.2 lze vidět, jak závisí zbytkový tepelný výkon použitého paliva na čase mimo reaktor při různě velkém vyhoření. Z grafu lze vyčíst, že při dvojnásobném vyhoření se zbytkový tepelný výkon použitého paliva více než zdvojnásobí, což zvyšuje dobu pro setrvání paliva v bazénu vyhořelého paliva.



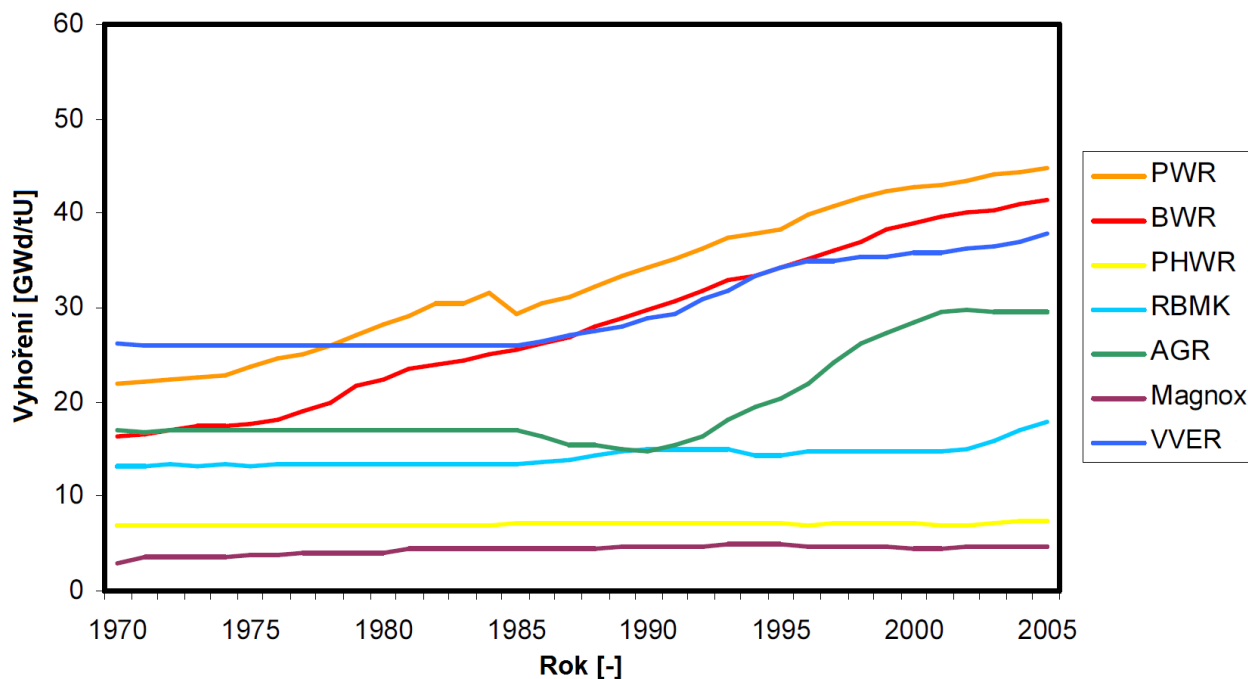
Obr. 7.2 Závislost tepelného výkonu použitého paliva na čase při různém vyhoření (PWR palivový soubor s obohacením 4,2 % ^{235}U) [44]

7.2 Změny v palivu

Cena jaderného paliva je malá v porovnání s pořizovacími náklady jaderné elektrárny. Přesto je palivo velmi drahé, a proto pokračuje snaha o zvyšování výkonu. Zvýšení energie získané z paliva způsobuje další náklady i úspory. Zvýšení nákladů je způsobeno nutností zvýšit obohacení paliva a náročnějším nakládáním s palivem s vysokým vyhořením. Oproti tomu úspory vznikají snížením počtu nakoupených a použitých palivových kazet. Z porovnání nákladů a úspor vychází dnes zvyšování vyhoření jako výhodnější, ale ekonomické studie naznačují, že zvýšené náklady pro vyhoření paliva nemusí být tak výhodné. [45]

Z výše zmíněných důvodů se zvyšuje vyhoření jaderného paliva používané všemi druhy reaktorů. Obr. 7.3, který zobrazuje vývoj vyhoření od roku 1970, ukazuje, dvojnásobné zvýšení průměrného vyhoření u lehkovodních reaktorů. K dosažení tohoto vyhoření bylo hlavní změnou zvýšení obohacení paliva, typicky z 2,5 % ^{235}U na přibližně 4,5 % ^{235}U , s dnešním maximem 4,95 % ^{235}U . [45]

Moderní jaderné palivo je výsledkem vysokých investic do výzkumu, zkušebních testů a operačních zkušeností. Změny jsou zaměřeny na zvýšení bezpečnosti, výkonu anebo na odstranění konstrukčního problému. Několik komplikací vzniklých se zvyšováním vyhoření paliva je rozepsáno níže. [45]



Obr. 7.3 Vývoj průměrného vyhoření pro různé druhy reaktorů [45]

7.2.1 Oxidace pokrytí

Jedním z limitů pro palivo reaktorů PWR je omezené množství oxidu vytvořeného na pokrytí paliva během provozu. Malé množství oxidu je přijatelné a dokonce chrání materiál pokrytí proti další korozi. Limit 100 mikronů je obecně aplikován, a pokud je dovoleno oxidu růst přes tuto hranici tak se ochranná vrstva oxidu rozpadne. Tohoto limitu je dosaženo s pokrytím Zircaloy-4 na průměrném vyhoření 45 GWd/t_U, takže program na zvýšení odolnosti pokrytí probíhá už několik let. Z počátku byly zkoušeny změny ve složení Zircaloy-4 a zvýšená odolnost proti oxidaci byla pozorována u slitin obsahujících méně cínu jako legující složky. V nedávné době byly představeny nové slitiny obsahující 1 % Nb jako legující materiál a to vedlo ke značnému snížení oxidace pokrytí během provozu. Díky tomu se nepředpokládá, že by bylo dosaženo limitní hodnoty 100 mikronů ani při vyhoření 100 GWd/t_U. [45]

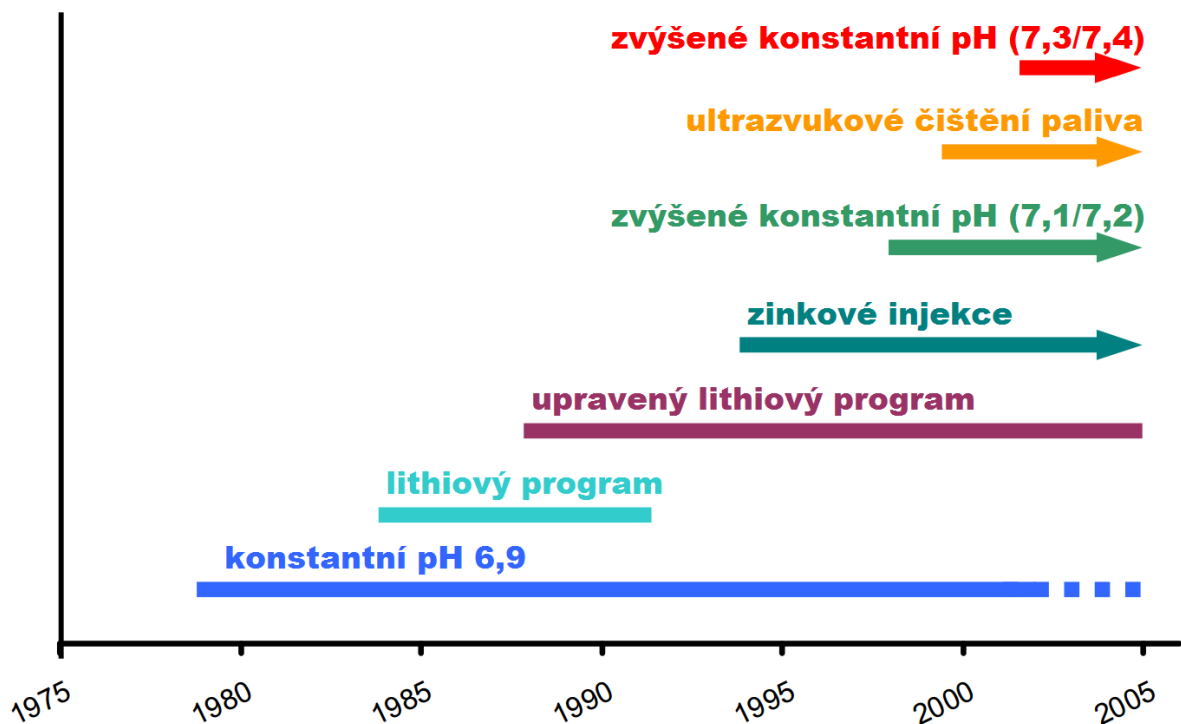
Zavedení těchto nových slitin je pomalé a odráží se zde velká opatrnost při zavádění nových materiálů jaderného paliva. Důvodem je nezbytné testování nových materiálů v reaktoru. Například testování nových typů paliva za přechodných podmínek při zvýšeném vyhoření je nutné pro ukázání přijatelného chování v abnormálních podmínkách a pro stanovení limitní hodnoty kdy dojde k selhání. Takovéto testy jsou velmi drahé a trvají řadu let. Pro testovací kazetu nové varianty paliva obvykle trvá 6 let dosáhnout zvýšeného vyhoření potřebného ještě před začátkem daného experimentu. [45]

7.2.2 Vlastnosti vody

Vztah mezi pokrytím paliva a vlastnostmi vody je velmi důležitý. Změny ve složení vody mohou zásadně ovlivnit rychlost oxidace paliva a uvolnění korozních produktů z parogenerátorů do paliva, kde se mohou ukládat jako rez. Důsledkem používání paliva s vyšším obohacením a prodlužováním cyklů výměny paliva je snížení vyrovnání rozložení výkonu v aktivní zóně reaktoru a výkon některých kazet se může lokálně zvyšovat. To vedlo k nanesení rzi z chladiva na kazety se zvýšeným výkonem a tím se způsobila deformace rozložení výkonu a dokonce došlo

i k selhání paliva z důvodu zvýšené oxidace. Tento problém je řešen pečlivým návrhem aktivní zóny a kontrolou vlastností vody. [45]

Doporučené vlastnosti vody se vyvíjely v průběhu let pro všechny typy vodních reaktorů. Příklad je uveden na Obr. 7.4 pro tlakovodní reaktory, kde vývoj začal se zavedením lithia (reaktory VVER používají místo lithia draslík) pro kontrolu pH v osmdesátých letech a na začátku 21. století se začal přidávat zinek pro kontrolu koroze parogenerátorů, následně se zvýšilo pH a začalo se čistit palivo pro odstranění rzi. Vliv všech těchto změn musí být neustále sledován, aby byl ihned nalezen jakýkoli vedlejší účinek na výkonnost paliva. Tento proces trvá mnoho let, a proto ani jakoukoliv změnu nelze očekávat v krátkém časovém úseku. [45]



Obr. 7.4 Vývoj doporučených vlastností vody pro tlakovodní reaktory [45]

7.2.3 Zesílení kazety

Dalším problémem s prodlouženou dobou pobytu paliva v reaktoru je, že radiační pole může způsobit prodloužení palivových tyčí a celé kostry kazety, která drží palivové tyče na svém místě. Toto prodloužení je v reaktoru omezené a kazeta se při vzniklém namáhání může ohnout. Tento jev byl pozorován u obou typů reaktorů PWR i VVER. Zkroucení kazety může způsobit lokální výkonové změny a problém se zasouváním regulačních kazet do aktivní zóny. Reakcí na tyto problémy došlo k vyztužení palivových kazet. [45]

7.2.4 Uvolnění štěpných plynů

Hlavním problémem pro konstruktéry paliva, kteří usilují o zvýšení vyhoření, je uvolňování štěpných plynů. Štěpné plyny jsou vytvářeny v palivu během pobytu v aktivní zóně a množství vzniklých plynů je přibližně přímo úměrné vyhoření. Větší množství štěpných plynů je problémem, když plyny uniknou z palivové peletky do proutku, kde zvyšují tlak, a tak může dojít k rozšíření proutku. Existují důkazy o zvýšení úniku štěpných plynů při vyšších vyhořeních a zkoumají se způsoby, proč k tomu dochází a jak tomu zabránit. Možnosti zahrnují přidání příměsí

do palivových peletek pro kontrolu mikrostruktury s cílem snížit rychlost uvolňování plynů z paliva při provozu a zvýšit odolnost paliva na výkonové změny. Před pár lety mělo palivo do reaktorů VVER prstencovou geometrii s centrálním otvorem, který zajišťoval nižší teplotu v centru peletky a volný prostor pro expanzi štěpných plynů a tím snížení vnitřního tlaku. Nicméně konstruktéři paliva pro reaktory VVER tento otvor odstranili pro zvýšení množství paliva v kazetě a její lepší využití, zatímco naopak konstruktéři paliva pro reaktory PWR, kteří používají plné peletky, zkoumají použití peletek s centrálním otvorem. [45]

Je možné pozorovat nové fyzikální jevy, když palivové peletky dosáhnou vysokého vyhoření. Když peletka přesáhne vyhoření 45 GWd/t_U, tak se na jejím okraji začne vyvíjet struktura s vysokou pórovitostí ovlivňující teplotní rozložení paliva. Tato struktura se poprvé objevuje při zvyšujícím se úniku štěpných plynů, ale experimentální výzkumy nepotvrzují samostatnou odpovědnost úniku plynů na vzniku struktury. Skutečný účinek této struktury na výkonnost paliva s vysokým vyhořením a také na další potenciální zařízení, které by mohly způsobit změny v rychlosti uvolňování štěpných plynů, je předmětem mnoha výzkumů a debat. [45]

7.2.5 Vyhořívající absorbátory a návrh rozložení aktivní zóny

K dosažení vysokého vyhoření prostřednictvím použití paliva s vyšším obohacením je nutné regulovat nadbytečnou reaktivitu v čerstvém palivu. Za tímto účelem jsou přidány do paliva vyhořívající absorbátory. Jedná se o materiály, které pohlcují neutrony a zajišťují tak bezpečné řízení jaderných reaktorů. V původním návrhu se používaly součástky obsahující bór nebo jiný neutronový absorbátor, které byly umístěny vedle palivových kazet, ale v dalších letech se přešlo na umístování absorbátorů přímo do palivových peletek ke zvýšení flexibility a hospodárnosti při jejich používání. Jako příklad lze uvést bórový povlak palivových pelet nebo pelety s příměsí gadolinia. Tyto absorbátory jsou navrženy tak aby se vyčerpaly (vyhořely) během první půlky kampaně a frekvence vyhořívání je optimalizována na zlepšení využití paliva. [45]

Další zlepšení ve využití paliva bylo dosaženo pečlivým návrhem aktivní zóny. U reaktorů s výměnou paliva po kampaních ovlivňuje umístění čerstvých a částečně vyhořelých palivových kazet rozložení výkonu v aktivní zóně a také neutronovou bilanci. Současné rozložení aktivní zóny je navrhováno s co nejmenším únikem neutronů a s co nejvyšším možným vyhořením všech palivových kazet. [45]

7.3 Budoucí vývoj

Při vylepšování jaderného paliva musí vždy zůstat rovnováha mezi náklady a přínosem. Během posledních třiceti let se palivo stalo spolehlivějším a původní úroveň vyhoření se zdvojnásobila (tlakovodní reaktory dnes dosahují 60 GWd/t_U), a tím se dvakrát snížil počet potřebných palivových kazet. [45]

Stále je možné další zlepšování. Původní limity na odolnost paliva jako například oxidace pokrytí byly překonány použitím pokročilejších materiálů pokrytí, kazety byly zesíleny, aby vydržely delší čas v reaktoru bez významného zkroucení a uvolňování štěpných plynů bylo sníženo díky pokročilejší technologii ve výrobě peletek. Předpokládá se, že se současnou technologií by se vyhoření paliva u lehkovodních reaktorů mohlo dostat dokonce i na hodnotu 100 GWd/t_U. Nicméně jsou zde další náklady pro dosažení této hranice, jako je například nutnost vyššího obohacení paliva. Všechny aktuální analýzy vzniku poruch byly provedeny na základě maximální úrovně obohacení 5 % ²³⁵U, ale pro dosažení cíleného vyhoření 100 GWd/t_U by bylo

zapotřebí zvýšit úroveň obohacení přes 8 % ^{235}U . Je pravděpodobné, že další zvyšování vyhoření bude postupovat stejně pomalu jako v minulosti. Další brzdou v rychlém zavádění nových typů paliva jsou jejich dlouhé ozařovací testy pro vyšší úrovně vyhoření. [45]

Jednou z oblastí, kde začíná nový vývoj je použití mírně obohaceného paliva pro těžkovodní reaktory. Jeden takovýto reaktor v Argentině již používá uran obohacený na přibližně 0,9 % ^{235}U a jeho úroveň vyhoření se zvýšila. Provozovatelé reaktorů typu CANDU uvažují nad vyšším obohacením a zvažují vyhoření paliva 25 GWd/tU. Tento proces bude opět pomalý z důvodu pečlivého zavádění nového paliva v kombinaci se zlepšením výpočetních programů pro předvídatelnost chování reaktoru s novým palivem. [45]

V dnešní době je trh s jaderným palivem plně komerční a patří mezi vysoce konkurenční, ve kterém je přebytek výroby. Dodavatelé se snaží získat zakázky od různých zákazníků a rozšiřují své produktové řady pro různé typy reaktorů. Tento vývoj je patrný zejména u dodavatelů paliva pro reaktory PWR a VVER. Zákazníci využívají trh a mění dodavatele, když to vyhovuje jejich konkrétním potřebám. Díky této konkurenci jsou dodavatelé nuceni zlepšovat své návrhy paliv a to vede ke zvýšení jejich spolehlivosti a odolnosti. Dodavatelé rozumí potřebám svých zákazníků a také podmínkám, ve kterých zákazníci pracují. Provozovatelé si dnes mohou vybrat, který z modelů paliva si přejí koupit, jaké obohacení a jakou úroveň vyhoření potřebují, a také jak dlouhý palivový cyklus nejlépe vyhovuje jejich místnímu trhu s elektřinou. To vede k široké škále upravených modelů paliv a k optimalizaci využití jaderných elektráren dle svých podmínek na trhu s elektřinou. [45]

8 ČERPÁNÍ PROJEKTOVÝCH REZERV NA REAKTORECH VVER-440 TYPU 213 VE SVĚTĚ

Na světě se nachází jen několik zemí, ve kterých jsou provozovány reaktory VVER-440 typu 213 a všechny leží v Evropě. Jedná se samozřejmě o čtyři české reaktory v Dukovanech, dále o dva reaktory ležící na okraji finského města Loviisa, čtyři reaktory v maďarském městě Paks, dva reaktory ve slovenských Jaslovských Bohunicích, čtyři reaktory ve slovenské obci Mochovce (z nichž dva jsou stále ve výstavbě), dva reaktory v ukrajinském městě Kuznecovsk a dva reaktory ležící na poloostrově Kola, na severozápadě Ruska. Na Ukrajině a v Rusku se výkon reaktorů nezvyšoval, proto se jim tato práce nebude dále věnovat.

8.1 Jaderná elektrárna Loviisa

Jaderná elektrárna Loviisa se nachází na okraji stejnojmenného města na jižním pobřeží Finska. Tato elektrárna je jedinečným konstrukčním provedením, protože namísto klasického hermetického boxu má reaktory umístěné v kontejmentu s ledovým kondenzátorem. Je tvořena dvěma výrobními bloky s elektrickým výkonem 520 MW [46] na jeden blok, což ji řadí na první místo v dosaženém výkonu na tomto typu reaktorů. První blok byl připojen do elektrizační soustavy v roce 1977 a o tři roky později byl připojen i druhý blok s původním elektrickým výkonem 440 MW. [47]

V roce 1994 začala studie o proveditelnosti modernizace elektrárny a zvýšení výkonu reaktoru. Díky velmi kladným výsledkům studie, téměř dvacetiletému provozu elektrárny, nutnosti vyučít novou generaci jaderných odborníků a končící provozní licence byl projekt roku 1995 zahájen. Tento projekt si kladl za cíle zkontrolovat celkovou bezpečnost elektrárny a případná zdokonalení, zvýšení tepelného výkonu bloku z 1375 na 1500 MW, zvýšení elektrického výkonu bloku na přibližně 500 MW, provedení opatření pro prodloužení životnosti elektrárny a zvýšení zkušeností zaměstnanců. [48]

Realizace projektu proběhla v několika fázích. Hlavní úkoly týkající se zvyšování výkonu reaktoru byly ukončeny v roce 1996 a testování postupného zvyšování tepelného výkonu reaktoru začalo v lednu 1997. Poslední zkouška proběhla úspěšně v prosinci 1997. V dubnu 1998 obdržela elektrárna novou provozní licenci na provozování reaktoru se zvýšeným tepelným výkonem o 9,1 % na 1500 MW. [48]

Zvýšení tepelného výkonu reaktoru bylo provedeno několika kroky. Došlo ke zvýšení teplotního rozdílu v primárním a chladícím okruhu za zachování stejného průtoku. V sekundárním okruhu se zachoval tlak syté páry, ale došlo ke zvýšení jejího průtoku turbínou přibližně o 10 %. V aktivní zóně se optimalizovalo rozložení výkonu, tak aby zatížení jakékoli kazety nebylo vyšší než maximální limit před zvýšením výkonu. Dále se upravily parní turbíny na vyšší průtok. Také došlo ke zvýšení jejich účinnosti a provozní spolehlivosti. [48]

Po zvýšení průtoku v sekundárním okruhu se z důvodu dlouhodobého provozování elektrárny kontroloval obsah vlhkosti v syté páře, vibrace v potrubním vedení a jeho komponentech, erozní koroze a únik tekutiny. Vlhkost obsažená v syté páře se mírně zvýšila v porovnání se situací před zvýšením výkonu, ale stále zůstala na přijatelné hodnotě pod 0,2 %. Vibrace se v některých potrubích zvýšily zcela jasně díky zvýšenému průtoku a tak došlo k instalaci tlumičů vibrací na hlavní potrubí. Erozní koroze závisí na kombinaci mnoha

rozdílných faktorů, a proto nebylo jednoznačně prokázáno její zvýšení z důvodu zvýšení výkonu. Zvýšení rizika úniku tekutiny bylo analyzováno jako velmi malé v důsledku zvýšení výkonu. [48]

Od roku 2014 probíhá modernizace vysokotlakých dílů turbín, která by měla být ukončena v roce 2017. Tato investice by měla zvýšit elektrický výkon Jaderné elektrárny Loviisa o přibližně 24 MW. Smlouva na renovaci byla podepsána s českou firmou Škoda Power a práce budou probíhat během plánovaných ročních odstávek. Modernizace je součástí pokračujícího projektu zaměřeného na zajištění bezpečnosti a produkce elektrické energie až do ukončení provozu elektrárny. [49]

Projekt také obsahuje modernizaci krytů, vnitřních částí a rychlozávěrných ventilů čtyř vysokotlakých dílů turbín v elektrárně. Podstatně se zvýší výkon generátoru, aniž by se zvýšil tepelný výkon reaktoru. Díky tomu, že se renovují pouze turbíny, nemá tato modernizace žádný vliv na reaktorovou nádobu nebo na jadernou bezpečnost. [49]

V letech 2015 až 2017 bude probíhat modernizace osmi separátorů vlhkosti a přehříváků. Očekávané zvýšení elektrického výkonu Jaderné elektrárny Loviisa je přibližně 5 MW. Separátory vlhkosti a přehříváky jsou součástí sekundárního okruhu, které vysušují a přehřívají páru vycházející z vysokotlakého dílu turbíny a tím zvyšují míru využití nízkotlakých dílů turbíny. Smlouva na renovaci byla podepsána s německou společností Balcke-Dürr GmbH a práce budou probíhat během plánovaných ročních odstávek. [50]

8.2 Jaderná elektrárna Paks

Jaderná elektrárna Paks se nachází ve středním Maďarsku nedaleko stejnojmenného města na pravém břehu Dunaje. Elektrárna se skládá ze čtyř bloků připojených do elektrizační soustavy mezi lety 1982 až 1987. Po ukončení projektu zvyšování výkonu všech bloků je dnes elektrický výkon elektrárny 2000 MW a pokrývá přibližně 40 % celkové spotřeby elektrické energie v Maďarsku. [51]

Původní elektrický výkon jaderné elektrárny 440 MW byl v prvním kroku zvýšen na přibližně 465 MW za zachování původního tepelného výkonu reaktoru. K této změně došlo mezi lety 1997 a 2001 a obsahovala změny na turbínách a kondenzátorech. Příslušné úpravy spočívaly v nahrazení lopatek všech stupňů rotoru a těsnění vysokotlaké a nízkotlaké části turbíny. Pro usnadnění rekonstrukce turbín nakoupila elektrárna všechny rotory pro turbíny jednoho bloku od firmy EWN Greifswald (KKW Nord). Těmto rotorům byly vyměněny lopatky v areálu OAO Turboatom (Harkovskij turbinnyj zavod) a následně zde byly také vyváženy na jmenovité otáčky. Tyto německé rotory byly namontovány do turbín jednoho bloku a demontované rotory z tohoto bloku prošly stejnou výměnou lopatek a vyvažovacím procesem jako nově koupené rotory. Takto byly vyměněny rotory všech bloků a projekt byl ukončen v roce 2001. Souběžně byly také vyměněny kondenzátory všech turbín. Jedním z důvodů bylo zvýšení přenosu tepla v kondenzátorech, nicméně hlavním cílem bylo zavedení nového materiálu do potrubí tepelného výměníku k zajištění zvýšení pH vodního režimu. [52]

Po dokončení bezpečnostních vylepšení a rekonstrukce turbíny, začala elektrárna zkoumat možnosti dalšího zvyšování výkonu. Pro zjištění možností a stanovení optimální strategie byla připravena studie proveditelnosti. Byla dokončena na konci roku 2001 a následně zaslána do finské firmy Fortum pro poznámky a připomínky. Studie podává přehled možných způsobů zvyšování výkonu a jejich dopad na systémy elektrárny, uvádí překážky a navrhuje hlavní kroky

projektu. Bezpečnostní posudek provedený ve studii také ukázal, že zvýšení tepelného výkonu reaktoru na 108 % nezpůsobí žádnou významnou změnu v úrovni bezpečnosti. [52]

V roce 2002 experti z Jaderné elektrárny Paks vytvořili koncepci na zvýšení výkonu. Finální projekt byl vytvořen na základě této koncepce. Podle plánu projektu odsouhlaseného vedením a valným shromážděním bylo cílem zvýšení elektrického výkonu bloku na alespoň 500 MW a zvýšení tepelného výkonu bloku z 1375 MW na 1485 MW. Realizace zvýšení výkonu začala na čtvrtém bloku v roce 2006 a musela splňovat požadavky na zachování kritérií bezpečnosti, zachování doby pro odstávky a vrácení investice před ukončením provozu elektrárny. [53]

Za účelem dosažení souladu s fyzikálními limity reaktoru a zajištění bezpečného provozu bylo nutné provést upravení používaných palivových kazet, rekonstrukci regulátoru tlaku v primárním okruhu, rekonstrukci kontrolního systému, změnu parametrů hydraulických akumulátorů, upravení hlavních cirkulačních čerpadel na druhém bloku, upravení turbín a také zvýšení koncentrace kyseliny borité v systému havarijního (nouzového) chlazení aktivní zóny. [53], [54]

Zvýšení výkonu reaktoru bylo umožněno díky použití modernějšího paliva. Původně byl používán čtyřletý palivový cyklus s radiálně profilovanými kazetami se středním obohacením 3,82 % ^{235}U . Nový typ paliva se vytvářel ve dvou etapách. V první se zvýšil krok mříže proutků z 12,2 mm na 12,3 mm pro účinnější chlazení kazety a do horní části regulační kazety se přidalo hafnium pro snížení výkonových špiček v kazetách na okraji aktivní zóny a pro rovnoměrnější distribuci výkonu. Zavedení tohoto provizorního paliva stačilo ke zvýšení tepelného výkonu reaktoru na 108 %, ale z důvodu nutnosti zajistit přebytek reaktivity, bylo nutné vyměnit při odstávce více použitých kazet za čerstvé a palivový cyklus se tak stal méně ekonomickým. Druhá etapa vývoje byla zaměřena na optimalizaci vyhoření palivových kazet prostřednictvím nového typu paliva. U tohoto typu paliva došlo ke zvýšení obohacení na 4,2 % ^{235}U a byly použity tři absorpční tyče obsahující vyhořívající absorbátor ve formě gadolinia. Díky tomuto palivu byl umožněn přechod na pětiletý cyklus a tím ke zvýšení ekonomičnosti. [52], [53], [54]

Původní tlaková kontrola v primárním okruhu byla provozována s rezervou, z důvodu neměnné hodnoty teploty syté páry. Výměnou původního systému za nový bylo zaručeno přesnější udržení tlaku v primárním okruhu, a také bylo zavedeno kontinuální měření teploty syté páry. Díky tomu, bylo možné snížit rezervu, a tím vznikl prostor pro zvýšení tepelného výkonu reaktoru. [53], [54]

Modernizovaný kontrolní systém reaktoru zajišťuje vyšší přesnost a datový tok, snižuje počet cyklů ke zpracování dat a počítá s tlakem příslušným k aktuální teplotě syté páry v primárním okruhu pro zvýšený tepelný výkon reaktoru. [53], [54]

Změna parametrů hydraulických akumulátorů byla nutná k udržení bezpečnostních podmínek. Podstatou rekonstrukce je změna parametrů hydraulických akumulátorů sloužících jako pasivní chlazení aktivní zóny. Došlo ke zvýšení objemu chladicí vody uložené v hydraulickém akumulátoru ze 40 na 50 m³ a ke snížení tlaku 58 na 35 barů. V důsledku této změny jsou hydraulické akumulátory schopny dodat více chladicí vody do reaktoru v případě výskytu mimořádné události. [53]

Proudění chladiva primárním okruhem je na každém bloku Jaderné elektrárny Paks různé. Limitujícím faktorem z pohledu bezpečnosti je výstupní teplota chladiva vycházejícího z aktivní zóny, která díky zvyšování tepelného výkonu reaktoru roste. Z tohoto důvodu bylo nutné zvýšit průtok chladiva primárním okruhem druhého bloku, jehož průtok byl nejnižší. Zvýšení bylo

provedeno výměnou oběžného kola na hlavních cirkulačních čerpadlech. Tato modernizovaná kola byla vyrobena za pomoci nových zámečnických a svářečských technologií a jejich rozměry byly o něco větší než původní. Jejich instalace proběhla během dlouhé odstávky bloku v roce 2008. [53], [54]

Z důvodu zvýšení průtoku syté páry bylo nutno upravit turbíny a to výměnou stávajících trysek za nové se zvýšeným průřezem do vysokotlaké části turbíny. Požadavky na bezpečné, ekonomické a spolehlivé rozložení páry si vynutily také změny v kontrolním systému. [53], [54]

Nová aktivní zóna se stejnou délkou kampaně má více reaktivity než původní. Tato přebytečná reaktivita musí být na začátku kampaně absorbována kyselinou boritou, a tedy celková koncentrace kyseliny borité v aktivní zóně reaktoru se musí zvýšit. V důsledku se zvýšila maximální koncentrace kyseliny borité v aktivní zóně na 12 g/kg, a také minimální koncentrace kyseliny borité v systému havarijního chlazení aktivní zóny vzrostla z 12 na 13,5 g/kg. [53], [54]

Po ukončení jednotlivých úprav a celkové údržbě se najíždění bloků na výkon odehrávalo ve třech krocích podle autorizovaného operačního programu. První se elektrárna najela na původní hodnotu tepelného výkonu (1375 MW), dále se zvýšilo o čtyři procenta a nakonec elektrárna najela na tepelný výkon o osm procent vyšší (1485 MW). Na každé výkonové úrovni byly provedeny komplexní testy reaktoru, technologické a chemické průzkumy a také měření vibrací na určeném úseku sekundárního okruhu. [54]

Jako první dosáhl plného tepelného výkonu 1485 MW (108 %) čtvrtý blok 28. 9. 2006, následně první blok 19. 6. 2007, poté druhý blok 5. 12. 2008 a nakonec třetí blok 13. 11. 2009. Od té doby modernizované bloky fungují stabilně na zvýšeném výkonu. Parametry aktivní zóny jsou v povolených mezích a také limitní parametry mají dostatečné rezervy. Radiochemické a chemické parametry jsou v souladu s kritériem. Absolutní hodnoty vibrací měřených na sekundárním okruhu jsou také podle výpočtů v povoleném rozsahu. [54]

8.3 Jaderná elektrárna Jaslovské Bohunice

Jaderná elektrárna Jaslovské Bohunice se nachází na západě Slovenska nedaleko města Trnava. V areálu elektrárny se nachází celkem pět bloků, ale tři z nich jsou již vyřazeny z provozu. Dnes jsou zde provozovány dva reaktory, které byly připojeny v letech 1984 a 1985. Po ukončení modernizací je dnes elektrický výkon elektrárny 1010 MW. [55]

Z důvodu neustále rostoucích bezpečnostních požadavků na provoz jaderných elektráren proběhl v letech 2002 až 2008 program modernizace a zvyšování bezpečnosti jaderné elektrárny. Cílem bylo zajistit, aby byl provoz bloků bezpečný, spolehlivý a ekonomický. [56]

Tato modernizace se zaměřovala hlavně na seizmické zpevnění konstrukcí budov, požární ochranu, výměnu pojistných ventilů kompenzátoru objemu, úpravu víka primárního kolektoru parogenerátoru, dochlazování primárního okruhu a radiační ochranu a monitorování. Dílčí úkony modernizace, které nemohly být provedeny při provozu reaktoru, probíhaly během plánovaných odstávek bloků dle doporučení MAAE. [57], [58]

Provedená modernizace vytvořila předpoklad pro prodloužení životnosti elektrárny na 40 let a také umožnila zvýšení elektrického výkonu bloků díky využití výkonových rezerv. To bylo provedeno zvýšením tepelného výkonu reaktoru a také zvýšením účinnosti sekundárního okruhu. [57]

Zvýšení tepelného výkonu reaktoru na 107 % původního výkonu (z 1375 MW na 1471 MW) bylo umožněno výkonovou rezervou vzniklou v roce 2010 po ukončení výměny původního profilovaného paliva s obohacením 3,82 % ^{235}U za nový typ paliva Gd-2 s obohacením 4,25 % ^{235}U u palivové kazety a s obohacením 3,84 % ^{235}U u regulační kazety, které se začalo zavážet v roce 2006. [57], [59]

V roce 2012 byl na elektrárnu Jaslovské Bohunice zavezen novější typ paliva Gd-2 s vyšším obohacením než původní, a to 4,87 % ^{235}U . Tento typ paliva byl vybrán díky nejlepší ekonomické hodnotě pro plánované palivové cykly. Hlavními důvody pro změnu paliva bylo plánované snížení odstávek bloků ze 40 na 20 dnů, prodloužení doby používání elektrárny z 30 na 50 až 60 let, udržení zvýšeného tepelného výkonu reaktoru 1471 MW a snížení počtu použitých palivových kazet (potenciální vysoce aktivní radioaktivní odpad). [60]

Se zavezením nového typu paliva bylo pro zvýšení výkonu reaktoru nutné nainstalovat v primárním okruhu systém automatické kalibrace neutronového toku v reaktoru, dále v sekundárním okruhu byl vyměněn systém hydraulické regulace turbogenerátoru, systém ochran turbogenerátoru a bylo upraveno měření průtoku napájecí vody a syté páry. V elektrické části byly upraveny zapouzdřené vodiče, generátorové vypínače a byly vyměněny generátorové odpojovače. Na blokových transformátorech bylo převinuto vinutí, vyměněny průchodky, upraven chladicí systém a nainstalován nový diagnostický systém. Generátory byly převinuty, došlo k výměně chladicího systému a instalaci diagnostického systému. [61]

Díky zvýšení tepelného výkonu reaktoru musely nastat také změny na cirkulačních chladicích věžích. Byl rekonstruován chladicí systém, upraven systém distribuce vody, vyměněn systém zimního ostřiku a regulován průtok přes jednotlivé věže. Společně s chladicími věžemi byly upraveny i hlavní kondenzátory turbín. Kondenzátory byly upraveny na modulový typ, byly vyměněny trubičky a také došlo k úpravě vodních komor. [61]

Zvýšení účinnosti sekundárního okruhu bylo provedeno úpravami na vysokotlaké a nízkotlaké části turbíny. Na vysokotlaké části byly upraveny vnější části, vyměněny rozváděcí kola, rotor, spojky, vnitřní ucpávky a rozváděcí ventily na vstupu páry do turbíny. Na nízkotlaké části byly upraveny vnitřní části, vyměněny rozváděcí kola, vnitřní ucpávky a také rotor a spojky. [61]

8.4 Jaderná elektrárna Mochovce

Na jihu Slovenska, mezi Nitrou a Levicemi se nacházejí čtyři bloky Jaderné elektrárny Mochovce. První blok elektrárny dodává elektrickou energii od léta roku 1998, druhý byl spuštěn na konci následujícího roku. Oba tyto bloky pracují dohromady s elektrickým výkonem 940 MW (2x470 MW). Výstavba třetího a čtvrtého bloku byla v roce 1992 pozastavena a následně byla opětovně spuštěna v roce 2008. Podle zpráv z konce roku 2014 by měl třetí blok začít komerčně vyrábět elektrickou energii v listopadu 2016 a čtvrtý blok o rok později. [62], [63]

Základním kamenem pro zvýšení výkonu bloku bylo získání licence od výrobce paliva na provozování reaktoru se zvýšeným výkonem. V tu dobu bylo používáno palivo Gd-2 s obohacením 4,25 % ^{235}U u palivové kazety a s obohacením 3,84 % ^{235}U u regulační kazety. Toho bylo docíleno v roce 2008, a již toho roku zvýšila elektrárna svůj instalovaný výkon o 7 %. Tepelný výkon jednoho bloku vzrostl z 1375 MW na 1471,25 MW a elektrický výkon bloku se zvýšil ze 440 MW na 470 MW. [34]

Zvýšení výkonu bylo provedeno za zachování všech původních provozních charakteristik a bez rekonstrukce technologického zařízení bloku pouze využitím jejich výkonových rezerv. Také nedošlo ke zvýšení limitních bezpečnostních parametrů pro lokální kritéria bezpečnosti (maximální výkon kazety, maximální výkon palivového proutku a maximální lineární výkon), ale zvýšení výkonu aktivní zóny bylo dosaženo vyšším vyrovnáním uvolňování energie po celé délce palivové kazety a palivového proutku. [34]

Zvýšení tepelného výkonu aktivní zóny vyvolalo zvýšení teplotního rozdílu chladiva v reaktoru a v parogenerátorech se tím zvýšila výroba páry. Takto zvýšená výroba páry umožnila dosáhnout vyššího elektrického výkonu v turbogenerátorech. Maximální dosažitelný výkon na svorkách turbogenerátoru je však omezený na hodnotu 235 MW. Limitní hodnota 235 MW byla stanovená na základě měření, s určitou provozní rezervou, podle podmínek provozu turbogenerátoru a dalších elektrických zařízení stanovených výrobcem těchto zařízení. [34]

V podstatě je možné shrnout, že první dva bloky Jaderné elektrárny Mochovce jsou po zvýšení výkonu provozované tak, že podle přírodních podmínek (teploty cirkulační chladicí vody tekoucí do kondenzátorů) jsou vždy udržované maximální možné hodnoty tepelného výkonu aktivní zóny a elektrického výkonu bloku. Musí být vždy dodrženy limitní hodnoty 1471,25 MW tepelného výkonu aktivní zóny a 235 MW elektrického výkonu pro každý turbogenerátor. [34]

V praxi to znamená, že pokud se teplota cirkulační chladicí vody nedostane nad hodnotu 21 °C, jsou bloky provozované na relativně snížený tepelný výkon aktivní zóny (nižší než 1471,25 MW) při zachování elektrického výkonu bloku 470 MW (limitující je výkon turbogenerátoru). Pokud teplota cirkulační chladicí vody vzroste nad hodnotu 21 °C, je tepelný výkon aktivní zóny udržovaný na konstantní hodnotě 1471,25 MW (limitující je tepelný výkon aktivní zóny) a elektrický výkon bloku se sníží a odpovídá tepelné účinnosti sekundárního okruhu. [34]

Na celý proces a shodu s národními a mezinárodními bezpečnostními normami dohlížel Úřad jaderného dozoru Slovenské republiky. Úřad vydal 29. května 2008 licenci provozovateli Jaderné elektrárny Mochovce, která ho na základě dobrých výsledků všech zkoušek opravňuje zvýšit výkon reaktoru na 107 % původního výkonu. Proces zvyšování výkonu začal 2. června 2008, kdy bloky dosáhly 104 % nominálního výkonu a maximálního výkonu 107 % bylo dosaženo 16. června 2008. [64]

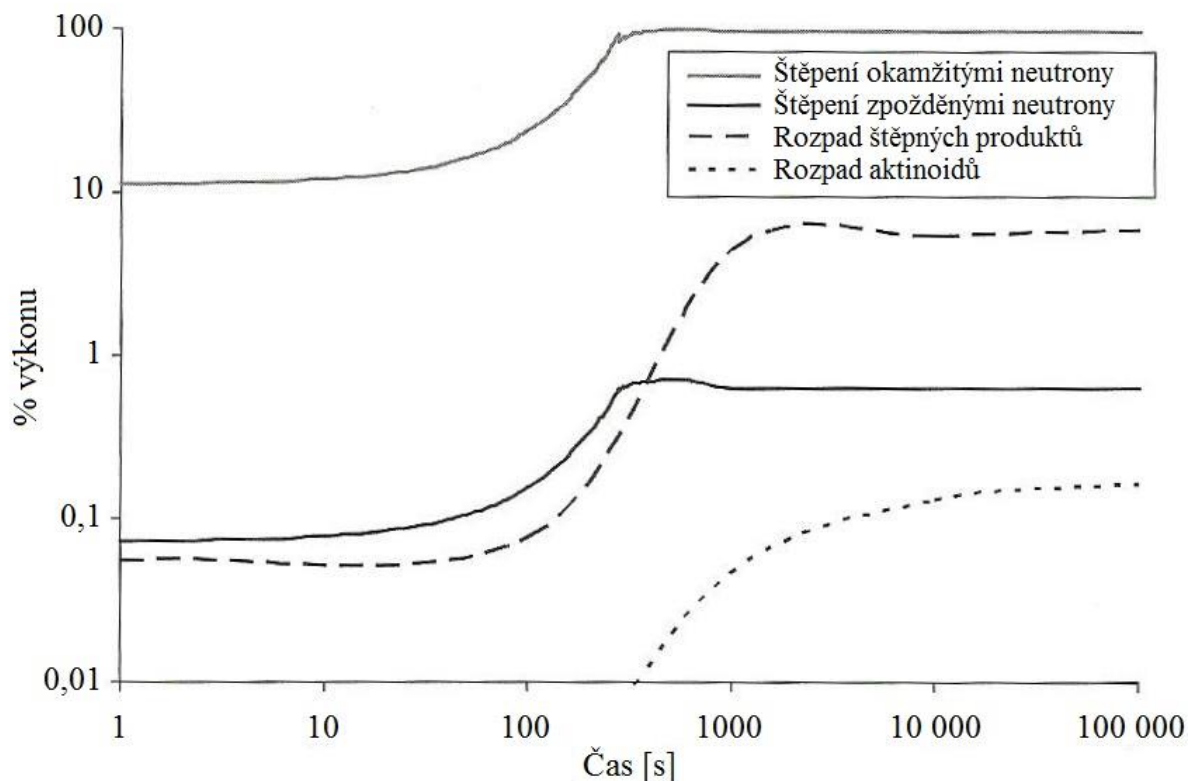
Ze stejných důvodů jako na Jaderné elektrárně Jaslovské Bohunice byl v roce 2011 zavezen na Jadernou elektrárnu Mochovce novější typ paliva Gd-2. [60]

9 VÝPOČET ZBYTKOVÉHO TEPELNÉHO VÝKONU PALIVOVÝCH KAZET

Je důležité vyhodnotit množství energie generované v reaktoru po jeho odstavení pro určení požadavků na chlazení za normálních podmínek a dopady havárie při mimořádných událostech. Aby tak bylo možné učinit, je názorné nejprve posoudit zdroje energie při výkonu reaktoru, a pak ukázat, jak tyto jednotlivé zdroje energie při odstavení mizí nebo se mění. [65]

Uváží-li se najíždění typického lehkovodního reaktoru na plný výkon, pak zdroji energie, při zanedbání energie neutrin, jsou štěpení okamžitými neutrony, štěpení zpožděnými neutrony, rozpad štěpných produktů a rozpad aktinoidů. [65]

Rychlost růstu výkonu z těchto zdrojů je znázorněna na Obr. 9.1 pro lehkovodní reaktor, jehož palivem byl oxid uranický UO_2 s obohacením 3% ^{235}U . Na začátku byla nastavena kladná reaktivita na přibližně 0,1 β (0,065 %). V čase 77 s byla naopak nastavena záporná reaktivita na 0,065 % což bylo dostatečné pro dosažení 100 % výkonu bez jakéhokoli zpětnovazebního efektu. Relativní velikosti výkonových přínosů a čas k dosažení rovnovážného stavu jsou pro všechny zdroje energie přehledně znázorněny na Obr. 9.1. Štěpení okamžitými neutrony dominuje jak velikostí, tak rychlostí odezvy. Zpožděné neutrony, kterých je přibližně 0,67 % ze všech neutronů, následují stejný časový profil, ale jsou pár sekund pozadu. [65]



Obr. 9.1 Spouštění reaktoru a návrat do kritického stavu [65]

Po odstavení klesá velmi rychle přínos ze štěpení okamžitými neutrony. Zbytkový tepelný výkon po odstavení reaktoru je pak součtem výkonů zbývajících složek a to štěpení zpožděnými neutrony, rozpad štěpných produktů a aktinoidů a dalších aktivních produktů vzniklých zachytem neutronů. Tyto zdroje zpočátku přispívají stejným podílem výkonu po odstavení. Nicméně během několika minut po odstavení je příspěvek ze štěpení zpožděnými neutrony zanedbatelný. [65]

9.1 Výkon z rozpadu štěpných produktů

Hlavním zdrojem zbytkového tepelného výkonu po odstavení reaktoru je rozpad štěpných produktů. Základní empirické vzorce pro rychlost uvolňování energie β a γ zářením z rozpadajících se štěpných produktů jsou dány [65]

$$\text{rychlost uvolňování energie } \beta \text{ zářením} = 1,40t'^{-1,2} \text{ MeV}/(\text{štěpení} \cdot \text{s}) \quad (9.1)$$

$$\text{rychlost uvolňování energie } \gamma \text{ zářením} = 1,26t'^{-1,2} \text{ MeV}/(\text{štěpení} \cdot \text{s}) \quad (9.2)$$

kde t' je čas po výskytu štěpení v sekundách.

Rovnice (9.1) a (9.2) jsou přesné pro $10 \text{ s} < t' < 100 \text{ dní}$ ($8,64 \times 10^6 \text{ s}$). Integrací rovnic (9.1) a (9.2) přes provozní dobu reaktoru získáme míru uvolněné energie z rozpadu štěpných produktů po odstavení reaktoru. [65]

Za předpokladu, že se při každém štěpení uvolní 200 MeV, je potřeba $3,1 \times 10^{10}$ štěpení za sekundu k vytvoření provozního výkonu 1 W. Takže rychlost štěpení $3,1 \times 10^{10} q_0$ štěpení/cm³s je potřeba k vytvoření q_0 W/cm³ (objemový tepelný výkon). Zbytkový tepelný výkon z rozpadu v čase τ (čas po spuštění reaktoru) vzniklý štěpením během časového intervalu mezi τ' (čas na začátku štěpení) a $\tau'+\Delta\tau$ (čas na konci štěpení) je dán [65]

$$dP_\beta = 1,40(\tau - \tau')^{-1,2} (3,1 \times 10^{10}) q_0 d\tau' \text{ MeV/cm}^3\text{s} \quad (9.3)$$

$$dP_\gamma = 1,26(\tau - \tau')^{-1,2} (3,1 \times 10^{10}) q_0 d\tau' \text{ MeV/cm}^3\text{s} \quad (9.4)$$

Pro reaktor pracující s konstantním výkonem po dané období τ_s (doba provozu), integrováním rovnic (9.3) a (9.4) dostaneme zbytkový tepelný výkon z rozpadu ze všech štěpení [65]

$$P_\beta = 2,18 \times 10^{11} q_0 [(\tau - \tau_s)^{-0,2} - \tau^{-0,2}] \text{ MeV/cm}^3\text{s} \quad (9.5)$$

$$P_\gamma = 1,95 \times 10^{11} q_0 [(\tau - \tau_s)^{-0,2} - \tau^{-0,2}] \text{ MeV/cm}^3\text{s} \quad (9.6)$$

Zbytkový výkon z rozpadu může být vyjádřen jako podíl ke konstantnímu provoznímu výkonu (P_0), který je spojen s objemovým tepelným výkonem v ustáleném stavu. Vynásobením výkonů z gama a beta záření v rovnicích (9.5) a (9.6) hodnotou $1,602 \times 10^{-13}$ se převedou jednotky na W/cm³ a přeskládáním dostaneme [65]

$$\frac{P_\beta}{P_0} = 0,035 [(\tau - \tau_s)^{-0,2} - \tau^{-0,2}] \quad (9.7)$$

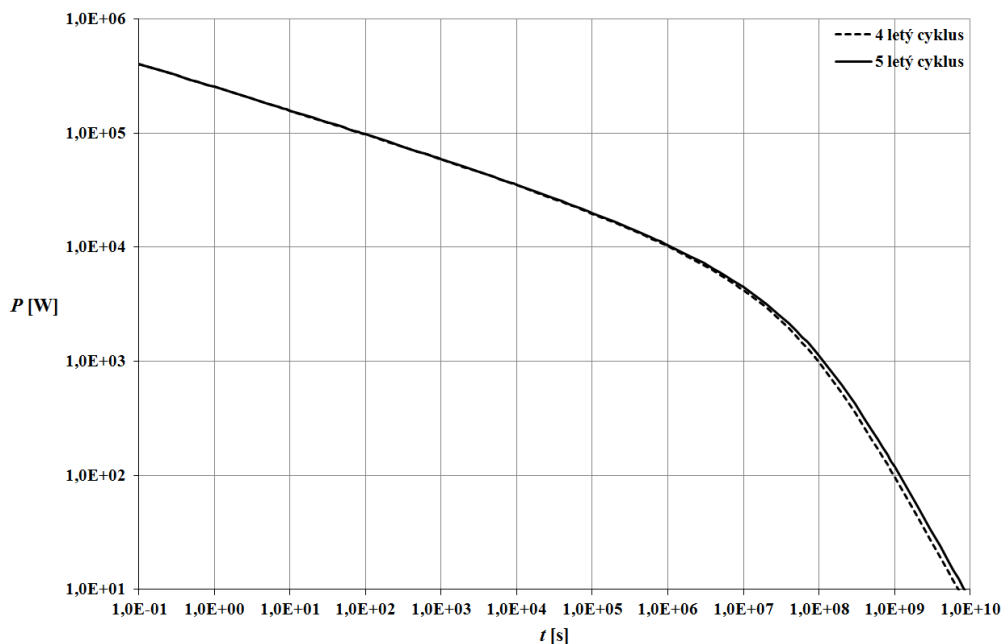
$$\frac{P_\gamma}{P_0} = 0,031 [(\tau - \tau_s)^{-0,2} - \tau^{-0,2}] \quad (9.8)$$

Celkový výkon z rozpadu štěpných produktů (P) je dán součtem rovnic (9.7) a (9.8) [65]

$$P = 0,066 P_0 [(\tau - \tau_s)^{-0,2} - \tau^{-0,2}] \text{ W} \quad (9.9)$$

Zbytkový tepelný výkon z rozpadu štěpných produktů je dle rovnice (9.9) zobrazen na Obr. 9.2 pro dvě doby provozu palivových kazet v Elektrárně Dukovany a to pro 4 a 5 let. Jako výkon P_0 je použit původní tepelný výkon elektrárny a to $P_0=1375 \text{ MW}$, ale protože počítáme výkon jedné kazety a víme, že aktivní zóna elektrárny se skládá z 349 kazet, pak průměrný výkon jedné kazety je

$$P_{0k} = \frac{P_0}{349} = \frac{1375 \times 10^6 \text{ MW}}{349} = 3,94 \text{ MW} \quad (9.10)$$

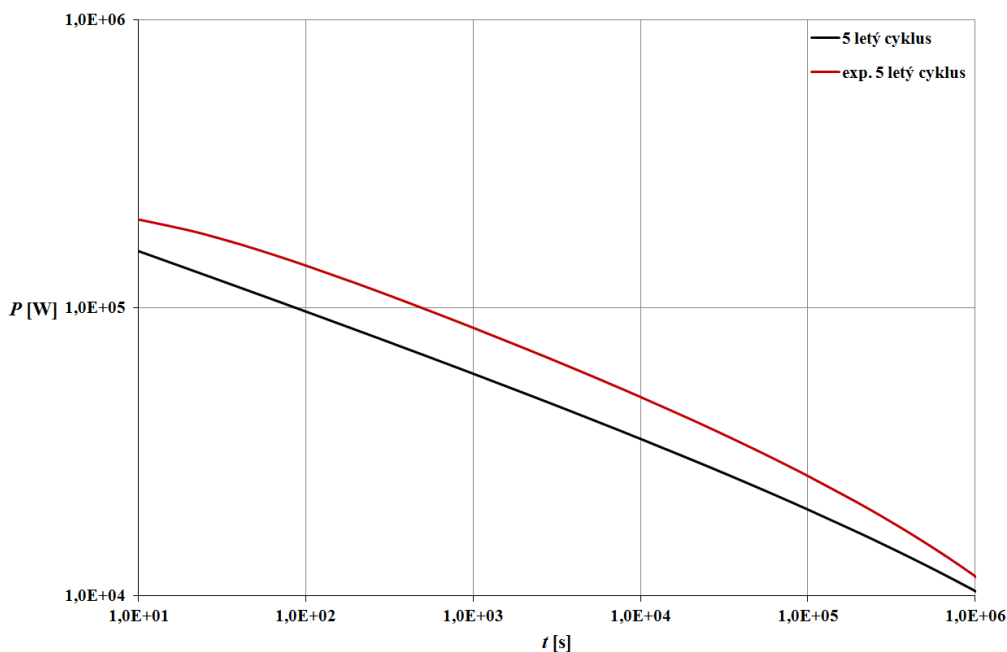


Obr. 9.2 Závislost zbytkového tepelného výkonu z rozpadu štěpných produktů na čase po odstavení reaktoru [65]

Pro porovnání byla později experimentálně získaná další rovnice z měření uranové tyče s průměrem 2,54 cm. Výsledná rovnice je po vyjádření P podle [65]

$$P = 0,1P_0[(\tau - \tau_s + 10)^{-0,2} - (\tau + 10)^{-0,2} + 0,87(\tau + 2 \times 10^7)^{-0,2} - 0,87(\tau - \tau_s + 2 \times 10^7)^{-0,2}] \text{ W} \quad (9.11)$$

Rovnice předpovídá vyšší výkony z rozpadu (Obr. 9.3) díky zahrnutí tepla z rozpadu aktinoidů ^{239}U a ^{239}Np společně s rozpadem štěpných produktů vzniklých štěpením ^{235}U . Účinek záchytu neutronů ve štěpných produktech zvyšuje výkon z rozpadu o jednotky procent, v závislosti na vyhoření a době provozu.



Obr. 9.3 Srovnání tepelného výkonu z rozpadu štěpných produktů s experimentální rovnicí počítající s teplem vyvinutým rozpadem štěpných produktů i aktinoidů [65]

9.2 Výkon z rozpadu podle standardu ANS

Předpovídání výkonu z rozpadu a jeho uzákonění pro konstrukční použití prošlo řadou úprav prostřednictvím zveřejňování standardů ANS (Americká nukleární společnost). V roce 1961 se sloučila data z několika experimentů k vytvoření přesnější metody pro předpovídání výkonu z rozpadu štěpných produktů. V roce 1971 byly výsledky přijaty Americkou nukleární společností jako základ pro návrh normy pro chladicí požadavky odstaveného reaktoru. Přepracované normy, které byly později vydány, postupně snižují konzervatismus v předpokládaném výkonu z rozpadu. [65]

Vyšetřováním nepřesností z normy 1971 ANS byl navrhnout nový standard na předpokladu, že výkon rozpadu štěpných produktů z různých štěpných izotopů je stejný a vlivy záchytu neutronů jsou zanedbatelné. Tento standard byl vytvořen v roce 1979 a znovu potvrzen v roce 1985. Přepracovaný standard přímo počítá s výkonem z rozpadu štěpných produktů ze štěpení ^{235}U , ^{238}U a ^{239}Pu . Záchyt neutronů ve štěpných produktech je zahrnut v korekčním činiteli. Přesnost v prvních 10^4 s po odstavení reaktoru byla zdůrazněna ve vývoji nového standardu pro hodnocení následků nehod. [65]

Následující úpravy standardu byly vydány v letech 1994 a 2005. Tyto novely především zdokonalily výpočty se záchytem neutronů ve štěpných produktech, zpřesnily předpokládaný výkon z rozpadu štěpných produktů hlavních štěpných materiálů v lehkovodních reaktorech (^{235}U , ^{239}Pu , $^{241}\text{Pu}_{\text{tepelné}}$, $^{238}\text{U}_{\text{rychlé}}$), zahrnuly výkon z rozpadu dalších aktinoidů (^{239}U , ^{239}Np) a rozšířily výsledky pro delší dobu po odstavení reaktoru (dobu chlazení). [65]

Podle standardu 2005 ANS, který se vztahuje na lehkovodní reaktory s palivem z oxidu uraničitého UO_2 s obohacením 4,2 % ^{235}U , jež bylo provozováno v reaktoru 1350 efektivních dnů (tato časová doba je dostatečná k dosažení saturace všech štěpných produktů a tak může být považována za nekonečnou dobu provozu) na plný výkon s korespondujícím vyhořením 51 MWd/kg_U byly vytvořeny rovnice [65]

$$P = -6,14575 \times 10^{-3} P_0 \ln(t_s) + 0,060157 \text{ W}; \text{ pro } 1,5 < t_s \leq 400 \text{ s} \quad (9.12)$$

$$P = 1,40680 \times 10^{-1} P_0 \times t_s^{-0,286} \text{ W}; \text{ pro } 400 < t_s \leq 4 \times 10^5 \text{ s} \quad (9.13)$$

$$P = 8,70300 \times 10^{-1} P_0 \times t_s^{-0,4255} \text{ W}; \text{ pro } 4 \times 10^5 < t_s \leq 4 \times 10^6 \text{ s} \quad (9.14)$$

$$P = 1,28420 \times 10^1 P_0 \times t_s^{-0,6014} \text{ W}; \text{ pro } 4 \times 10^6 < t_s \leq 4 \times 10^7 \text{ s} \quad (9.15)$$

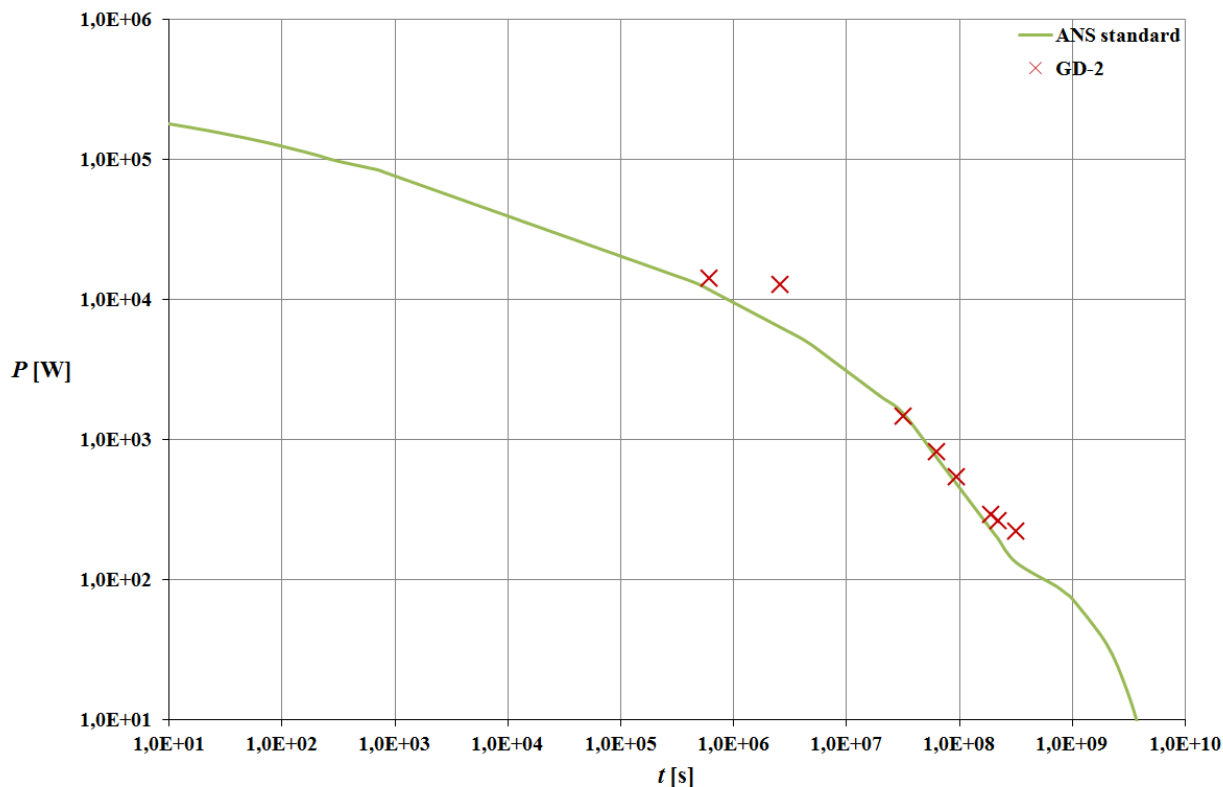
$$P = 4,03830 \times 10^4 P_0 \times t_s^{-1,0675} \text{ W}; \text{ pro } 4 \times 10^7 < t_s \leq 4 \times 10^8 \text{ s} \quad (9.16)$$

$$P = 3,91130 \times e^{-7,3541 \times 10^{-10} t_s} \text{ W}; \text{ pro } 4 \times 10^8 < t_s \leq 10^{10} \text{ s} \quad (9.17)$$

kde t_s je doba od odstavení v sekundách.

Výkon z rozpadu podle standardu 2005 ANS vytvořený dle rovnic (9.12) až (9.17) je porovnán s hodnotami z EDU a zobrazen na Obr. 9.4. [65]

Zbytkové výkony z EDU jsou vypočteny pracovníky odboru reaktorové fyziky programem PAL 440, který vyvíjí Škoda JS. Pro porovnání s výpočty bylo použito palivo Gd-2 s obohacením 4,25 % ^{235}U , provozované 5 let v reaktoru, při tepelném výkonu 1375 MW s koncovým vyhořením 50 MWd/kg_U. [66]



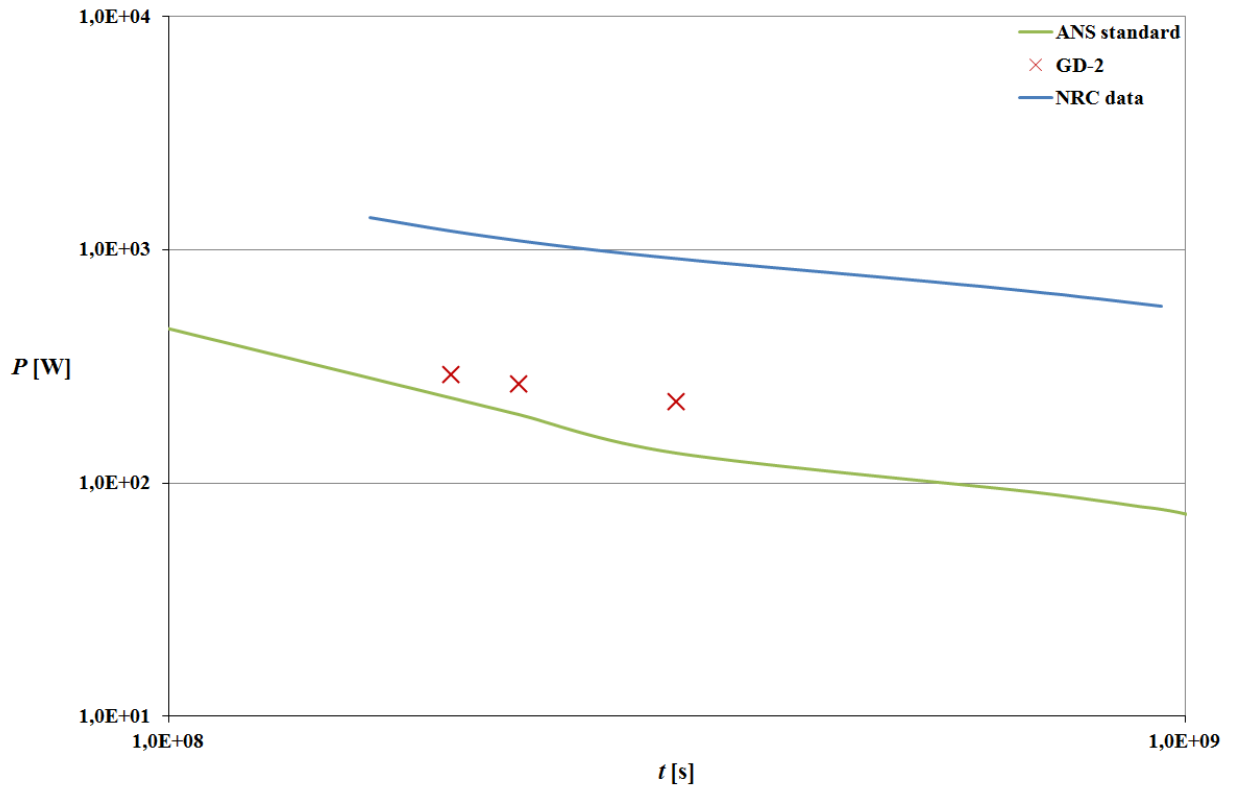
Obr. 9.4 Srovnání tepelného výkonu z rozpadu dle standardu ANS s hodnotami z EDU [65], [66]

V Tab. 9.1 jsou srovnány zbytkové tepelné výkony z EDU, vypočtené z rozpadu štěpných produktů a vypočtené podle standardu 2005 ANS. Neočekávaně vysoké rozdíly mezi výpočty jsou způsobeny různými druhy měření zbytkových výkonů pro určení původních experimentálních rovnic, ze kterých se vycházelo u výpočtu zbytkového výkonu ze štěpných produktů a standardu ANS. Dalším faktorem je nepřesný způsob výpočtu zbytkového výkonu kazet na Elektrárně Dukovany, kde se výkon vypočítává nepřímo přes ohřev a průtok chladiva. Rozdíl je způsoben i nepřesným určováním vyhoření, zanedbáváním historií kazet a různým druhem paliva (reaktory typu PWR používají čtvercové kazety, kde je jiný průtok chladiva než u šestihřanných kazet pro reaktory typu VVER).

Tab. 9.1 Srovnání zbytkových výkonů naměřených v EDU s vypočtenými výkony z rozpadu štěpných produktů a podle standardu 2005 ANS [65], [66]

doba chlazení			P_{EDU}	$P_{\text{štěpné produkty}}$	P_{ANS}
[let]	[dní]	[s]	[W]	[W]	[W]
0,019	7	604 800	14 300,00	12 184,12	11 886,95
0,082	30	2 592 000	12 740,00	7 617,48	6 399,48
1	365	31 536 000	1 485,00	2 477,85	1 564,33
2	730	63 072 000	825,00	1 412,83	750,50
3	1 095	94 608 000	547,70	1 176,41	486,82
6	2 190	189 216 000	292,80	656,40	232,29
7	2 555	220 752 000	265,90	569,72	197,04
10	3 650	315 360 000	224,30	404,35	134,65

Pro ukázání rozdílů mezi reaktory je zde přidán Obr. 9.5. Je názorně zobrazeno, jak se liší zbytkové tepelné výkony z různých reaktorů, a proto je vždy nutné provádět měření a výpočty pro daný blok.



Obr. 9.5 Srovnání zbytkového tepelného výkonu dle ANS standardu, s naměřenými daty z Elektrárny Dukovany a s naměřenými daty z NRC (Jaderná regulační komise)[44], [65], [66]

10 ZÁVĚR

Čerpání projektových rezerv jaderných elektráren je celosvětovým trendem. Jedná se o „levný“ způsob jak rychle získat více vyrobené elektrické energie z jednoho z nejstabilnějších zdrojů. Většina dnes provozovaných jaderných elektráren byla připojena do sítě v 70. a 80. letech 20. století. Díky rychlému rozvoji techniky vzniklo od té doby spousta nových možností čerpání projektových rezerv, kterými se dá zvýšit výkon reaktoru až o 20 %.

Elektrárna Temelín byla spouštěna v roce 2000 s elektrickým výkonem jednoho bloku 981 MW. Díky mnoha úpravám jak na primárním okruhu (zvyšování tepelného výkonu reaktoru) tak na sekundárním okruhu (výměna nízkotlakých a vysokotlakých částí turbín) se podařilo zvýšit elektrický výkon prvního bloku až na 1078 MW a po dokončení probíhající odstávky dosáhne stejného výkonu i druhý blok. Elektrárna Dukovany byla spuštěna v roce 1985 s elektrickým výkonem jednoho bloku 440 MW a díky modernizacím kondenzátorů, turbín a paliva se výkon zvýšil na dnešních 500 MW. Na stránkách energetického regulačního úřadu lze najít vyšší instalované výkony, než jsou zde uvedeny. Důvodem je počítání úřadu s instalovaným výkonem turbogenerátorů.

Projektovaný palivový cyklus na Elektrárně Dukovany byl původně tříletý a ročně se zaváželo v průměru 116 kazet. Díky úpravám paliva a přeskládání aktivní zóny je dnes palivový cyklus pětiletý a zaváží se průměrně 72 čerstvých kazet. 44 uspořené kazet reprezentuje velkou finanční úsporu a to jak na nákupu, tak na uskladnění. Na druhou stranu má použité palivo vyšší vyhoření, které znesnadňuje jeho další uložení, z důvodu vyššího zbytkového tepla a vyšší aktivity štěpných produktů a aktinoidů.

Vývoj paliva na EDU je velmi bohatý. Původním palivové kazety měly ve všech proutcích stejné obohacení 1,6 %, 2,4 % a 3,6 % ^{235}U . S požadavkem na prodloužení délky palivového cyklu se musely měnit i kazety. Pro čtyřletý palivový cyklus se vyvinuly radiálně profilované kazety se středním obohacením 3,82 % ^{235}U . Při vývoji nových palivových typů se nejenom zvyšovalo obohacení, ale také byla snaha o co nejmenší parazitní záchyt neutronů v konstrukčních materiálech kazet. Pro přechod na pětiletý palivový cyklus musely být do palivových kazet přidány vyhořívající absorbátory. Ty pomáhají na začátku kampaně s vyrovnáním výkonu v aktivní zóně a s časem jejich absorpční schopnosti mizí. Další vývoj paliva je úzce spjatý s možným přechodem EDU na šestiletý palivový cyklus, se kterým se ale zatím nepočítá.

V průběhu let se vyhoření paliva stále zvyšuje. V EDU se dnes dosahuje dvojnásobně vysokého průměrného vyhoření než při uvádění do provozu. Zvyšování vyhoření zároveň způsobuje další náklady i úspory. Z ekonomického hlediska dnes stále vychází lépe zvyšování vyhoření. Hlavním problémem zvyšujícího vyhoření je vysoký zbytkový tepelný výkon a vysoká aktivita použitého paliva. Toto palivo pak musí setrvat déle v bazénu vyhořelého paliva, a tak časem může nastat problém s maximální kapacitou bazénu.

Na světě se nachází pouze 6 zemí, ve kterých se nachází reaktory VVER-440 typu 213. Jedná se o Českou republiku, Finsko, Maďarsko, Slovensko, Ukrajinu a Rusko. Česká EDU se v elektrickém výkonu bloku řadí na přibližně střední pozici. Při případném navýšení tepelného výkonu bloku na maximální provozovanou hladinu u tohoto typu reaktorů (1500 MW), při zachování stejné účinnosti přeměny tepla na elektřinu by mohl elektrický výkon vzrůst až na 520 MW (stejně jako nejvýkonnější finská Loviisa).

Čerpání projektových rezerv paliva ovlivňuje další nakládání s použitým palivem, dobu jeho chlazení, možnost zavezení do kontejneru CASTOR a také vyžaduje nutnost dalšího vývoje kontejnerů. Je tedy potřeba určit zbytkový výkon a aktivitu použitého paliva. Určování zbytkového tepelného výkonu je složitá problematika. Hlavním problémem je těžko měřitelné vyhoření kazet a zároveň chyby vznikající při vypočítávání samotného zbytkového výkonu. Při porovnávání výpočtů z experimentálních vzorců s daty z EDU byla zjištěna nečekaně vysoká odchylka. Nepřesnosti mohly být způsobeny mnoha faktory, například rozdíly mezi palivy pro reaktory PWR a VVER.

Tato práce svým obsahem pokryla čerpání projektových rezerv v České republice, vývoj jaderného paliva na EDU, vyhoření paliva, změny probíhající v palivu, čerpání projektových rezerv na reaktorech typu VVER-440 typu 213 ve světě a na závěr demonstrovala složitou problematiku výpočtu zbytkového tepelného výkonu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BEČVÁŘ, Josef a kolektiv. *Jaderné elektrárny*. Vyd. 1. Praha/Bratislava: SNTL/Alfa, 1978, 636s.
- [2] LIBRA, Martin, Jan MLYNÁŘ a Vladislav POULEK. *Jaderná energie*. Vyd. 1. Praha: Ilsa, 2012, 167 s. ISBN 978-80-904311-6-4.
- [3] The Generation IV International Forum. *The Generation IV International Forum* [online]. 2014 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public
- [4] Olkiluoto-3:sta sähköä vasta vuonna 2016?. *Raumalainen* [online]. 2013 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.raumalainen.fi/jutut/rauma-ja-alue/juttu-olkiluoto-3sta-sahkoa-vasta-vuonna-2016>
- [5] ČEZ, a. s.: Bezpečnost. *ČEZ, a. s.* [online]. [cit. 2014-11-22]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/zvazovana-dostavba-elektrarny-temelin/bezpecnost.html>
- [6] Small Modular Reactors. 2014. *Stanford University* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://large.stanford.edu/courses/2014/ph241/handoko1/>
- [7] RAČEK, Jiří. *Jaderná zařízení*. Vyd. 2. Brno: Novpress, 2013, 251 s. ISBN 978-80-214-4745-5.
- [8] MATOUŠEK, Antonín. *Výroba elektrické energie*. Vyd. 1. Brno: VUT FEKT, 2007, 139 s. ISBN 978-80-214-3317-5.
- [9] Palivový cyklus. *VUJE, a. s.* [online]. 2012 [cit. 2014-11-23]. Dostupné z: <http://www.vuje.sk/sk/index.php?page=popup/schemy/palivovy-cyklus>
- [10] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY AND THE INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Uranium 2014: Resources, Production and Demand*. 2014. Dostupné z: <http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2014/7209-uranium-2014.pdf>
- [11] Základní informace. 2015. *Správa úložišť radioaktivních odpadů* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/O-SURAO/Zakladni-informace>
- [12] Nedávná studie EU o energetické budoucnosti lidstva zcela jasně potvrdila, že to prostě bez jaderné energie nepůjde. *Časopis CzechIndustry* [online]. 2013 [cit. 2014-12-29]. Dostupné z: <http://www.casopisczechindustry.cz/products/nedavna-studie-eu-o-energeticke-budoucnosti-lidstva-zcela-jasne-potvrdila-ze-to-proste-bez-jaderne-energie-nepujde/>
- [13] HANSEN, Teresa. Power engineering. *Nuclear Plant Uprates*. 2007. DOI: 00325961. Dostupné z: <http://web.a.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=5165233d-e1b9-43c6-bfac-12dd8f4822ea%40sessionmgr4001&vid=1&hid=4209>
- [14] Temelín. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2014-12-29]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete.html>
- [15] SVITÁK, Marek. Temelín zvýší výkon bloku nejméně na 1020 MWe. In: *Skupina ČEZ* [online]. 2007 [cit. 2014-12-29]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/pro-media/aktuality-z-jadernych-elektraren/1585.html>
- [16] *Temelínky* [online]. 2013 [cit. 2014-12-29]. Dostupné z: http://www.temelinky.cz/file/edee/temelinky/2013_temelinky/2013_7_temelinky.pdf

- [17] Zvýšení výkonu generátorů na JE Temelín. 2013. *BRUSH SEM s.r.o.* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.brush-sem.cz/novinky/zvyseni-vykonu-generatoru-na-je-temelin>
- [18] Poslední rotor největší české turbíny přijel na Temelín. *Skupina ČEZ* [online]. 2014, č. 459 [cit. 2014-12-29]. Dostupné z: <http://www.temelinky.cz/cs/clanky/posledni-rotor-nejvetsi-ceske-turbiny-prijel-na-temelin-459.html>
- [19] Temelín uzavřel rok 2013 historicky druhou nejvyšší výrobou. *Skupina ČEZ* [online]. 2014, č. 362 [cit. 2014-12-29]. Dostupné z: <http://www.temelinky.cz/cs/clanky/temelin-uzavrel-rok-2013-historicky-druhou-nejvyssi-vyrobou-362.html>
- [20] SVITÁK, Marek. Temelín loni pokryl pětinu české spotřeby. In: *Skupina ČEZ* [online]. 2015 [cit. 2015-01-02]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/4952.html>
- [21] Historie a současnost EDU. *Skupina ČEZ* [online]. 2014 [cit. 2014-12-29]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/edu/historie-a-soucasnost.html>
- [22] Turbíny jaderných elektráren jsou pro ŠKODA POWER, a Doosan copany významnou prioritou. *Technický týdeník* [online]. 2010, roč. 2010, č. 25 [cit. 2014-12-30]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/turbiny-jadernych-elektaren-jsou-pro-skoda-power-a-doosan-copany-vyznamnou-prioritou_17114.html
- [23] Škoda dokončila modernizaci bloku pro Dukovany. In: *Regionplzen.cz* [online]. 2007 [cit. 2014-12-30]. Dostupné z: <http://www.regionplzen.cz/zpravodajstvi/?skoda-dokoncila-modernizaci-bloku-pro-dukovany>
- [24] SUCHARDA, Jan. Velká rekonstrukce ukončena: DUKOVANY = 4 x 500 MW. In: *Aktivní zóna* [online]. 2012 [cit. 2014-12-30]. Dostupné z: <http://www.aktivnizona.cz/cs/clanky/velka-rekonstrukce-ukoncena-dukovany-4-x-500-mw-129.html>
- [25] *Využití projektových rezerv bloků jaderné elektrárny Dukovany* [online]. 2012 [cit. 2014-12-30]. Dostupné z: http://www.spininvest.cz/files/PP_Dukovany_2012_CZ.pdf
- [26] POKLOP, Vladimír. Výkon bloků Jaderné elektrárny Dukovany navýšen. *Technický týdeník* [online]. 2012, roč. 2012, č. 18 [cit. 2014-12-30]. Dostupné z: <http://skodapraha.cz/files/SKODA-PRAHA-Invest-VPR-EDU.pdf>
- [27] SPILKA, Petr a Jan SUCHARDA. SKUPINA ČEZ. *Jaderná elektrárna Dukovany včera, dnes a zítra*. 2010, 96 s. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/brozura_edu.pdf
- [28] SPILKA, Petr. Dukovany se připravují na rekord. In: *Aktivní zóna* [online]. 2013 [cit. 2014-12-30]. Dostupné z: <http://www.aktivnizona.cz/cs/clanky/dukovany-se-pripravuji-na-rekord-890.html>
- [29] SPILKA, Petr. Informace z JE Dukovany 2/1/2014. In: *Skupina ČEZ* [online]. 2014 [cit. 2014-12-30]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/pro-media/aktuality-z-jadernych-elektaren/13043.html>
- [30] BEZDĚK, Jiří. Informace z JE Dukovany 2/1/2015. In: *Skupina ČEZ* [online]. 2015 [cit. 2015-01-02]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/pro-media/aktuality-z-jadernych-elektaren/14313.html>

- [31] BURKET, Daneš. Zkušenosti s palivem s vyhořívajícími absorbátory v jaderné elektrárně Dukovany. *Energetika* [online]. 4/2006 [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/elektrarny/jaderne/palivo_dukovany.pdf
- [32] BURKET, Daneš. *Palivové vsázky se zdokonaleným palivem na Jaderné elektrárně Dukovany*. Dukovany, 2003. 214 s. Dostupné z: <http://www.danes.burket.cz/files/burketdp.pdf>. Dizertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. Karel Matějka, CSc.
- [33] GERŽA, Jiří. PALIVOVÝ CYKLUS JE DUKOVANY. Prezentace prezentována na: [Výzkum, vývoj a inovace v oblasti výroby elektrické energie na Ústavu elektroenergetiky; 2014-11-04; Brno; Česká republika.]
- [34] Zvýšenie výkonu blokov JE EMO12 v Mochovciach. *CENIA, česká informační agentura životního prostředí* [online]. 2008 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: http://portal.cenia.cz/eiasea/detail/EIA_MZP009M
- [35] Dukovanský palivový cyklus byl v roce 2005 zase o krok lepší. In: BURKET, Daneš. *Česká nukleární společnost* [online]. 2006 [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <http://www.csvts.cz/cns/news06/060109d.htm>
- [36] SMETANA, Jan. *Jaderná paliva pro tlakovodní reaktory* [online]. Brno, 2014 [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=87100. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.
- [37] New Fuel for Dukovany Plant a Way to Improve Fuel Cycle. 2014. MIASNIKOV, A. *International Atomic Energy Agency* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: [https://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/Technical-Areas/NFC/documents/TWGFPT/2014/Presentations/9-New_Fuel_for_Dukovany_Plant_a_Way_to_Improve_Fuel_\(A._Miasnikov\).pdf](https://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/Technical-Areas/NFC/documents/TWGFPT/2014/Presentations/9-New_Fuel_for_Dukovany_Plant_a_Way_to_Improve_Fuel_(A._Miasnikov).pdf)
- [38] BELATKA, Martin a Antonín MATOUŠEK. Changes of Fuel Cycle in Dukovany Nuclear Power Plant. *Proceedings of the 9th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2008* [online]. 2008, s. 3 [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/vyzkum-a-vyvoj/publikace?action=detail&pub_id=74104
- [39] BEZDĚK, Jiří. Reaktor prvního bloku Jaderné elektrárny Dukovany je opět připraven k provozu. In: *Skupina ČEZ* [online]. 2014 [cit. 2014-12-11]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/4839.html>
- [40] MARTINÁKOVÁ, Želmíra. Nové palivo pro Dukovany. In: *Česká nukleární společnost* [online]. 2014 [cit. 2015-01-02]. Dostupné z: <http://www.csvts.cz/cns/news14/140515z.htm>
- [41] Vyhořelé palivo. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/palivo_4.html
- [42] Pokročilé jaderné technologie a skupina ČEZ. *Skupina ČEZ* [online]. 2006 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/micrositesutf/odpovednost/content/pdf/cez_a_pokrocile_jaderné_technologie_-_nahled.pdf

- [43] Backgrounder on High Burnup Spent Fuel. *U.S. Nuclear Regulatory Commission* [online]. 2013 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/bg-high-burnup-spent-fuel.html>
- [44] Design Calculation or Analysis Cover Sheet. *U.S. Nuclear Regulatory Commission* [online]. 2012 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0907/ML090770390.pdf>
- [45] Current Trends in Nuclear Fuel for Power Reactors. *International Atomic Energy Agency* [online]. 2007 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC51/GC51InfDocuments/English/gc51inf-3-att5_en.pdf
- [46] Data on Loviisa NPP. *STUK* [online]. 2013 [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitosten-toiminta/loviisa/en_GB/loviisa_tekniset/
- [47] Upgrading and Operational Experience at the Loviisa NPP. AF POWER AGENCY A.S. *VVER 2013* [online]. 2013 [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: <http://ftp.vver2013.com/VVER%202013%20-%20Day%20II.,%20Parallel%20Section%20I.,%20PDF/Tuomisto%20H..pdf>
- [48] KESKINEN, Aarno. Modernisation and power upgrading of the Loviisa NPP. *International Atomic Energy Agency* [online]. [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/32/011/32011677.pdf
- [49] Fortum's Loviisa nuclear power plant to modernize turbines and increase output by 24 MW. *Fortum* [online]. 2012 [cit. 2015-03-19]. Dostupné z: <http://www.fortum.com/en/mediaroom/Pages/Fortum%27s-Loviisa-nuclear-power-plant-to-modernize-turbines-and-increase-output-by-24-MW.aspx>
- [50] Fortum increases the output of Loviisa NPP by 5 MW through turbine island modernization. *Fortum* [online]. 2013 [cit. 2015-03-19]. Dostupné z: <http://www.fortum.com/en/energy-production/nuclear-power/nuclear-news/Pages/Fortum-increases-the-output-of-Loviisa-NPP-by-5-MW-through-turbine-island-modernization-.aspx>
- [51] About us. *MVM Paks Nuclear Power Plant* [online]. [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: <http://paksnuclearpowerplant.com/about-us>
- [52] The Role of Instrumentation and Control Systems in Power Upgrading Projects for Nuclear Power Plants [online]. Vienna: IAEA, 2008, s. 50-60 [cit. 2015-03-23]. ISBN 978-92-0-102508-1. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1331_web.pdf
- [53] SZŐKE, LARISZA. CAPACITY UPGRADE AT PAKS NUCLEAR POWER PLANT. *MVM Paks Nuclear Power Plant* [online]. 2009 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: http://paksnuclearpowerplant.com/download/1271/FW_%20TNcikk2_n.pdf
- [54] Capacity upgrade. *MVM Paks Nuclear Power Plant* [online]. 2009 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://paksnuclearpowerplant.com/capacity-upgrade>
- [55] AE Bohunice. *Slovenské elektrárne, a. s.* [online]. 2015 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.seas.sk/ae-bohunice-v2>
- [56] Čistá energia. *Slovenské elektrárne, a.s.* [online]. 2013 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.seas.sk/data/contentlink/cfakepathebofactssk-web.pdf>

- [57] MODERNIZÁCIA JADROVEJ ELEKTRÁRNE V2. *International Atomic Energy Agency* [online]. 2003 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/053/39053555.pdf#search=%22MODERNIZ%C3%81CIA%20JADROVEJ%20ELEKTR%C3%81RNE%20V2%22
- [58] NÁRODNÁ SPRÁVA SLOVENSKEJ REPUBLIKY. *Úrad jadrového dozoru Slovenskej republiky* [online]. 2013 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.ujd.gov.sk/files/NS.pdf>
- [59] GREŽĎO, O. a M. KAČMAR. Utilisation of Gd II Fuel Assemblies at Bohunice NPP Unit 3, 4. *International Atomic Energy Agency* [online]. 2006 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/071/38071914.pdf#search=%22bohunice%204%2C2%22
- [60] GREŽĎO, Ondrej. Operational experience with Gd 4.8% fuel type at Bohunice NPP. *International Atomic Energy Agency* [online]. 2013 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/122/44122477.pdf#search=%22bohunice%20fuel%20cycle%22
- [61] Atómové elektrárne BOHUNICE V2 Projekt dlhodobej prevádzky. In: *Občianska informačná komisia Bohunice* [online]. 2012 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: http://www.oik.sk/wp-content/uploads/2012/11/01_SE-EBO_Ing_Molnar.pdf
- [62] AE MOCHOVCE. *Slovenské elektrárne, a. s.* [online]. 2015 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.seas.sk/ae-mochovce>
- [63] Mochovce pokračujú, štát kývol na zvýšenie rozpočtu. *P E R E X, a. s.* [online]. 2014 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://spravy.pravda.sk/ekonomika/clanok/337116-mochovce-pokracuju-stat-kyvol-na-zvysenie-rozpoctu/>
- [64] Elektrárne zvýšili výkon Mochoviec na 107 % pôvodného maxima. *Petit Press, a.s.* [online]. 2008 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://ekonomika.sme.sk/c/3931029/elektrarne-zvysili-vykon-mochoviec-na-107-povodneho-maxima.html>
- [65] TODREAS, Neil E a Mujid S KAZIMI. 2012. *Nuclear systems*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor, 1004 s. ISBN 978-1-4398-0887-0.
- [66] BÁRTA, Martin a Josef BAJGL. Konzultace [2015-05-07].