

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGY INSTITUTE

JADERNÁ ENERGETIKA V ČR

TITLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ ŘÍHA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

DOC. ING. JAN FIEDLER, DR.

BRNO 2009

Abstrakt

Práce pojednává o úloze jaderné energetiky v České republice. Analyzuje současný stav české energetiky a predikuje její vývoj do roku 2020. Srovnává možné cesty vývoje a hodnotí je z hlediska ekonomické realizovatelnosti, energetické i politické bezpečnosti a vlivu na životní prostředí. Zabývá se metodami prodlužování životnosti jaderných elektráren a případnou výstavbou nových jaderných zdrojů. Ukazuje historii jaderné energetiky v bývalém Československu a dotýká se problému s jaderným odpadem. Práce poskytuje komplexní přehled o daném tématu a vyzdvihuje další rozvoj jaderné energetiky jako nezbytné součásti energetického mixu.

Abstract

The thesis deals with role of nuclear power in the Czech Republic. It analyses the contemporary condition of Czech power plant engineering and predicts its evolution up to the year 2020. It compares possible ways of development and evaluates its viability, political and energy safety and the impact on our environment. The life-prolongation of nuclear power plants and the potential construction of new facilities is taken into consideration. It shows the history of the nuclear power plant engineering in former Czechoslovakia and the problem of nuclear waste is mentioned too. Thesis provides a complex overview of the given topic and emphasizes the subsequent development of the nuclear power plant engineering as the essential part of the power mix.

Klíčová slova

jaderná energetika, jaderný reaktor, historie jaderné energetiky, prodlužování životnosti, transmutační technologie

Keywords

nuclear power plant engineering, nuclear reactor, history of nuclear power plant engineering, life-prolongation, transmutation technology

Bibliografická citace

ŘÍHA, T. Jaderná energetika v ČR. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 32 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vytvořil vlastní samostatnou tvůrčí činností a použil jsem pouze primární a sekundární zdroje informací uvedené v seznamu použitých zdrojů.

Děkuji tímto vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Janu Fiedlerovi, Dr.
za jeho cenné rady a podnětné připomínky.

Obsah

1 Obecné pojetí jaderné energetiky	- 13 -
1. 1 Úvod do problematiky	- 13 -
1. 2 Fyzikální podstata jaderného štěpení a popis hlavních částí aktivní zóny	- 13 -
2 Historie jaderné energetiky na našem území.....	- 16 -
2. 1 Počátky využívání energie z jádra v Československu.....	- 16 -
2. 1. 1 Cesta sovětské technologie do Československa.....	- 16 -
2. 1. 2 Výstavba a provoz elektrárny A – 1 v Jaslovských Bohunicích	- 16 -
2. 2 Další vývoj čs. jaderné energetiky	- 17 -
2. 2. 1 Odklon od těžkovodních reaktorů k lehkovodním.....	- 17 -
2. 2. 2 Jaderné elektrárny v Jaslovských Bohunicích a Dukovanech.....	- 18 -
2. 2. 3 Jaderné elektrárny v Mochovcích a Temelíně.....	- 19 -
3 Současnost a možnosti rozvoje jaderné energetiky v Česku	- 19 -
3. 1 Nynější stav české energetiky	- 19 -
3. 2 Obecná predikce vývoje energetiky ČR do roku 2020 a význam jádra v ní.....	- 20 -
3. 3 Budoucnost jaderných zdrojů v ČR	- 23 -
3. 3. 1 Prodlužování životnosti jaderných elektráren	- 23 -
3. 3. 2 Výstavba nových bloků s novými typy reaktorů.....	- 25 -
4 Komplexní zhodnocení úlohy jaderné energetiky v ČR	- 29 -
Seznam použitých zdrojů.....	- 31 -

1 Obecné pojetí jaderné energetiky

1. 1 Úvod do problematiky

V dnešní době, kdy je neustále ze všech stran slyšet o nejrůznějších globálních problémech vzniklých v souvislosti s činností člověka, se stává nutností v rámci trvale udržitelného rozvoje celé společnosti hledat vhodná řešení těchto nesnází. Pokud se pak člověk zamýšlí nad řešením tak obrovských problémů, jakými jsou globální změny klimatu či možná energetická krize, nelze opomenout jadernou energetiku jako jeden z elegantních způsobů, jimiž se dá těmto nepříjemným skutečnostem čelit.

S raketově rostoucími ekonomikami některých ještě nedávno rozvojových zemí jde ruku v ruce neustálé zvyšování poptávky po všech druzích energie. Zároveň se ztenčují zásoby primárních energetických zdrojů. Celé světové společenství tedy chápe nutnost hledání jiných cest k zajištění dlouhodobého hospodářského růstu a zachování životního standardu bez stále výraznějšího drancování přírodního bohatství. Způsobů, jak tohoto cíle dosáhnout, je mnoho a ve sdělovacích prostředcích se o nich píše téměř denně. Jaderná energetika nabízí řešení tohoto komplexního problému. Tato technologie je ovládána bezmála sedmdesát let. Výroba elektrické energie v jaderných elektrárnách patří k čistým způsobům produkce elektřiny, což je výhodné zejména při dodržování mezinárodních závazků o snižování emisí skleníkových plynů. Obnovitelné zdroje energie (OZE) mohou sice zčásti nahradit produkci jaderné energie, ale pravděpodobně nikdy nebudou mít takový potenciál, aby ji pokryly, natož aby pokryly celosvětovou spotřebu, i kdyby bylo dosaženo výrazných úspor díky novým technologiím. Člověk může být příznivcem nebo odpůrcem jaderné energie, při pragmatickém zamyšlení se nad tímto problémem však brzy zjistí, že svět se dnes bez ní nedokáže obejít. A to i přes některá negativa tohoto způsobu výroby energie.

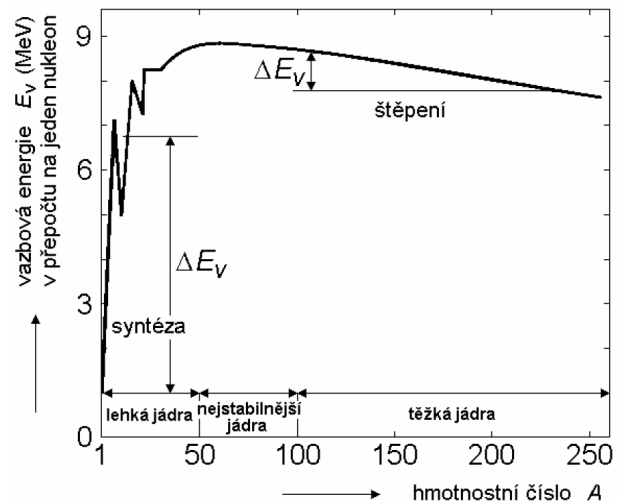
1. 2 Fyzikální podstata jaderného štěpení a popis hlavních částí aktivní zóny

Proces, na kterém celá jaderná energetika stojí, se nazývá jaderné štěpení. Při něm se překonává obrovská síla svazující k sobě kladně nabitě protony a spolu s nimi i elektricky neutrální neutrony. Této síle, překonávající elektrickou sílu odpuzující protony a udržující elementární částice v nepatrném objemu jádra, se říká síla jaderná (1, str. 1135). Její působení nesahá příliš daleko za hranice „povrchu“ jádra, má tedy vliv pouze na krátkou vzdálenost. Je vykládána jako přesah jedné ze základních fyzikálních sil – silné interakce poutající základní prvky hmoty – kvarky uvnitř nukleonu (2, str. 195).

Pro překonání jaderné síly a faktické rozdělení nukleonů na jednotlivé protony a neutrony je zapotřebí určitá hodnota energie nazvaná vazební (vazbová) energie jádra (1, str. 1134). Při dělení celkové vazební energie jádra počtem nukleonů se získá vazební energie na jeden nukleon E_v . Obrázek č. 1 ukazuje závislost této energie na hmotnostním čísle. Křivka závislosti na obou koncích klesá, což má neobyčejný praktický význam. Při nízkých hodnotách hmotnostního čísla dojde k uvolnění energie při sloučení dvou nuklidů. Tento proces se nazývá jaderná fúze. Na druhém konci křivky se energie uvolní při rozdělení velkého a méně stabilního nuklidu na menší a stabilnější fragmenty. Právě tomuto rozpadu se říká jaderné štěpení.

Na objevu jaderného štěpení se koncem 30. let podíleli němečtí vědci Lisa Meitnerová, Otto Hahn a Fritz Strassmann. Při ostřelování roztoků uranových solí tepelnými neutrony vzniklo mnoho radioaktivních nuklidů. Problém nastal, když byl jeden nuklid identifikován jako baryum.

Záhadu vyřešila během několika týdnů Meitnerová se svým synovcem Otto Frischem. Navrhli model, podle kterého se může jádro uranu po absorpci tepelného neutronu rozdělit na dvě přibližně stejné části a přitom uvolnit energii; jedna z těchto částí může být docela dobře baryum. Frisch pojmenoval tento jev štěpení (1, str. 1155).



Obr. č. 1: Závislost vazebné energie E_V na jeden nukleon na hmotnostním čísle A .
(zdroj: Česká zemědělská univerzita)

Problematika získávání jaderné energie zdaleka neznamená pouhý fyzikální popis mechanismu štěpení. Praxe je mnohem složitější, neboť i samotná technologie je svým způsobem výjimečná. Srdcem jaderné elektrárny, kde probíhá samotná štěpná reakce, je aktivní zóna. Je tvořena několika hlavními celky – palivovými články obsahujícími jaderné palivo a regulačními tyčemi, dále pak různými médii, které umožňují přenos tepla – chladiiva, či zpomalení neutronů – moderátory.

Celý proces vypadá zjednodušeně takto: z upraveného paliva, kde probíhá štěpení, se uvolňuje tepelná energie, která je předávána skrz pokrytí tohoto palivového elementu chladiivu. Moderátory zpomalují rychlé neutrony vznikající při štěpení a zvyšují tak pravděpodobnost dalšího štěpení. Reakci omezují regulační tyče vyrobené z materiálů zachytávajících velké množství neutronů. Tím je jaderná reakce omezována, resp. ji lze úplně zastavit. Aktivní zóna je tedy specifickým prostředím, pro něž je nutné použít velmi kvalitních a třeba i netradičních materiálů, nebo vyvinout úplně nové či použít alespoň nové technologické postupy, co se výroby těchto materiálů týče, aby byly zachovány veškeré požadované vlastnosti.

Jednou z veličin významně ovlivňujících samotný běh a řízení reakce je makroskopický účinný průřez Σ . Pro štěpení se značí Σ_r a pro absorpci Σ_a . Tato veličina se týká míry pravděpodobnosti štěpení či absorpce neutronu jádrem atomu při určitém počtu interakcí neutronů s jádrem vztažené na jednotku objemu.

Pro jaderná paliva je charakteristický vysoký makroskopický průřez pro štěpení. Jde o co nejvyšší míru využití neutronů k další reakci. Tabulka č. 1 shrnuje některé podstatné vlastnosti nejdůležitějších izotopů uranu, thoria a plutonia. Aktivní materiály palivových článků se dělí na dvě skupiny:

- materiály štěpné
- materiály množivé.

Tabulka č. 1. Vybrané vlastnosti izotopů uranu, thoria a plutonia.

Izotop	Výskyt [% hmotn.]	Poločas rozpadu [roky]	Účinný průřez pro štěpení a absorpci [10^{-28} m^2]			
			tepelné neutrony [$4 \cdot 10^{-22} \text{ J}$]		rychlé neutrony [$8 \cdot 10^{-16} \text{ J}$]	
			štěpení	absorpce	štěpení	absorpce
Th_{90}^{232}	100	$1,4 \cdot 10^{10}$	0	7,0	0,14	7,25
<i>U přírodní</i>	100	-	4,14	7,65	0,53	7,51
U_{92}^{233}	0,06	$1,6 \cdot 10^5$	527	581	2,73	2,93
U_{92}^{235}	0,712	$7,1 \cdot 10^8$	582	694	1,59	1,91
U_{92}^{238}	99,282	$4,5 \cdot 10^9$	0	2,8	0,52	7,50
Pu_{94}^{238}	0	89	17	519	-	-
Pu_{94}^{239}	0	$2,4 \cdot 10^4$	746	1026	1,83	2,15

(zdroj: 3, str. 142)

Pro palivové články tepelných reaktorů, kde jsou neutrony zpomalovány moderátorem tak, aby se dosáhlo vyšší pravděpodobnosti štěpného zachytu neutronu jádrem atomu, se používají aktivní materiály obsahující jeden z těchto izotopů U^{233} , U^{235} a Pu^{239} . Patří do první skupiny materiálů zajišťujících štěpnou reakci. Izotop U^{235} je tzv. primární štěpný materiál, vyskytuje se v přírodním uranu v koncentraci 0,712 %. Ostatním dvěma izotopům se říká sekundární štěpné materiály. V přírodě se vyskytují pouze stopově.

Pomocí tepelných neutronů ale není možné u uranu dosáhnout množení a využít tak více jeho energetický potenciál. Toto dokáží zajistit teprve rychlé reaktory (blíže v kapitole 3. 3. 2). Mezi množivé materiály patří např. izotopy U^{238} nebo Th^{232} . Jsou surovinou pro výrobu sekundárních štěpných materiálů.

Jaderné palivo uložené v tzv. palivovém článku může mít různé podoby. V zásadě je lze rozdělit následovně:

- kovová jaderná paliva
- keramická jaderná paliva

Kovové jaderné palivo zaručuje dobrou tepelnou vodivost a vysokou hustotu štěpného materiálu. Čistý uran má ale některé negativní vlastnosti, zvláště je málo odolný proti objemovým změnám vyvolaným radioaktivitou. Mnohem lepších vlastností se dosahuje, pokud je uran legován některými prvky (Cr, Ce, Y, Be, Mo). Zvyšuje se tak stabilita paliva a odolnost vůči radiačnímu růstu způsobenému uvolňováním plyných produktů štěpné reakce.

Keramickým jaderným palivem se rozumí oxidické sloučeniny uranu, thoria či plutonia. Výhodou je odolnost vůči vyšším teplotám ve srovnání s kovovými palivy, vyšší odolnost proti radiačnímu růstu, na druhou stranu se zhoršuje přestup tepla do chladiva.

Palivo v palivovém elementu je od chladiva izolováno tzv. pokrytím. Pokrytí zabraňuje průniku plyných produktů štěpení do chladiva a zároveň palivo před účinky chladiva chrání. Používají se austenitické oceli, slitiny niklu, zirkonia či beryliové povlaky (3, str. 142 – 144).

2 Historie jaderné energetiky na našem území

2. 1 Počátky využívání energie z jádra v Československu

2. 1. 1 Cesta sovětské technologie do Československa

V polovině července 1945 se završila snaha vědců projektu Manhattan. Po několika letech práce ozářil poušť nad Novým Mexikem první pokusný jaderný výbuch. Rok 1945 ovšem nepřinesl jen konec druhé světové války, ale i bipolární rozdělení světa. Tehdejší Československo zůstalo ve sféře vlivu Sovětského svazu, soupeřícího se Spojenými státy americkými ve všech oblastech života. Soubor velmocí se především projevoval ve snaze získat technologický náskok a vojenskou převahu. Jako stát patřící do tzv. východního bloku jsme samozřejmě většinu technologií získávali ze sovětského Ruska. Nebylo tomu jinak ani v případě technologie výroby elektrické energie z jádra.

V červnu 1954 byla v Obninsku u Moskvy spuštěna první „velká“ jaderná elektrárna (JE) na světě. Její výkon nebyl z dnešního hlediska nijak závratný, pouhých 5 MWe, ale demonstrovala schopnost výroby elektřiny tímto způsobem v průmyslovém měřítku. V dubnu 1955 podepsalo Československo a Sovětský svaz dohodu o sovětské pomoci při výstavbě centra jaderného výzkumu (dnes Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s.) a o pomoci při výchově specialistů v jaderných oborech. Nedlouho poté následovala nabídka pomoci se stavbou první československé jaderné elektrárny. Tehdejší moc příliš neváhala a souhlasila. Koncem roku 1955 tedy začala příprava projektu výstavby jaderné elektrárny nazvané A – 1.

2. 1. 2 Výstavba a provoz elektrárny A – 1 v Jaslovských Bohunicích

V polovině padesátých let se výzkum v SSSR zaměřoval na více typů reaktorů s cílem ověřit jejich vlastnosti a rozhodnout o nejvhodnější variantě pro výstavbu jaderné energetiky. Českoslovenští odborníci dali přednost přírodnímu uranu jako palivu budoucí elektrárny před uranem obohaceným izotopem U^{235} z důvodu bohatých nalezišť uranové rudy na našem území. Moderátorem byla zvolena těžká voda. V úvahu připadal i grafit. Podrobné technické údaje jsou obsaženy v tabulce č. 2, která je zahrnuta v příloze společně s tepelným schématem.

Po vyjasnění základní koncepce elektrárny byla podepsána mezistátní dohoda o pomoci při výstavbě JE, rozvoji technologie výroby čistého přírodního uranu a možnosti výroby těžké vody jako moderátoru přímo v Československu. Dohoda se zabývala dělbou práce mezi průmyslové podniky obou zemí. Sověti měli dodat těžkovodní nádobu, umístěnou uvnitř reaktoru, vyrobenou ze speciální hliníkové slitiny – avialu, dále se pak zavázali dodávat palivo a těžkou vodu jako moderátor. Ostatní části elektrárny měly být vyrobeny v čs. strojírenských závodech.

Místem stavby byly určeny Jaslovské Bohunice na západě Slovenska, které splňovaly základní kritéria vhodnosti lokality pro stavbu, především dobrou dopravní dostupnost, vhodné geologické podloží, blízkost Váhu jako zdroje vody a Dunaje jako místa odvodu vody odpadní.

Stavba elektrárny A – 1 byla zahájena v roce 1958. Uvedení elektrárny do provozu se očekávalo v polovině 60. let. Ovšem technické problémy, omezení investic do vědy a výzkumu v důsledku zpomalení tempa růstu čs. ekonomiky a také politické změny na konci 60. let způsobily, že energetické spouštění elektrárny se uskutečnilo až koncem roku 1972.

První československá elektrárna však nepracovala dlouho. V únoru 1977 došlo k vážné nehodě. Obsluha chtěla zavézt nový palivový článek do reaktoru. Ten byl ovšem špatně uskladněn a látka chránící článek před vlhkostí napadala do distanční mřížky, kudy proudil oxid uhličitý. Po zavezení se stal článek pro plyn neprůchodným a nechladené pruty se teplem roztavily. Těžká voda nakonec pronikla až ke chladicímu plynu a radioaktivita kontaminovala vnitřní plochy reaktoru a primárního okruhu (4, str. 64). Elektrárna byla okamžitě odstavena.

Vzhledem ke končící životnosti těžkovodní nádoby, ale i jiných částí elektrárny, vysoké ceně na obnovu provozu bylo rozhodnuto o uvedení elektrárny A – 1 do klidu. Svou roli sehrálo i rozhodnutí SSSR orientovat se na lehkovodní reaktory typu VVER (PWR) a vývoj rychlých reaktorů používajících jako chladivo tekutý sodík.

Elektrárna byla v provozu necelých pět let, do konce roku 1976 vyrobila 1350 GWh elektrické energie, což může v dnešní době vypadat vzhledem k celkové ceně investice, tehdy asi 3 mld. Kč, jako neekonomické (4, str. 63). Je třeba si ale uvědomit, v jakém stádiu se vývoj jaderné energetiky v té době nacházel a také fakt, že A – 1 byla jedinou elektrárnou na světě spalující přírodní uran za použití těžké vody jako moderátoru (4, str. 66), nelze brát cenu jako jediné kritérium při hodnocení úspěšnosti projektu. Přidanou hodnotou mohou být nejen zkušenosti čs. výzkumníků a techniků, ale i zvládnutí výroby materiálů, komponent a zařízení vhodných pro použití v našich dalších jaderných zařízeních.

Plánovaná výstavba dalších podobných bloků A – 2 a A – 3 se kvůli nízké životnosti elektrárny A – 1 a její náročnosti na množství těžké vody nikdy neuskutečnila.

2. 2 Další vývoj čs. jaderné energetiky

2. 2. 1 Odklon od těžkovodních reaktorů k lehkovodním

Ještě v polovině 60. let se v Československu počítalo s výstavbou jaderné energetiky na bázi těžkovodních reaktorů. Stále zpoždování uvedení elektrárny A – 1 v Jaslovských Bohunicích do provozu společně s deficitem v palivoenergetické bilanci a politickými událostmi konce 60. let, kdy se stal jakýkoli termín spuštění nejistým, přivedlo čs. jadernou energetiku na rozcestí. Realizovat vyzkoušené lehkovodní reaktory VVER sovětské výroby, nebo koupit z tehdejších západních zemí licence na jaderné elektrárny s těžkovodním reaktorem používajícím jako palivo přírodní uran? Při koupi západního typu elektrárny bylo třeba koupit navíc i licence na zařízení pro výrobu těžké vody a jaderného paliva. Přes některé výhody kanadských reaktorů CANDU se Československo přiklonilo k reaktorům VVER 440 z SSSR především z důvodů nedořešených otázek kolem těžké vody a nereálnosti devizového pokrytí předpokládané výstavby jaderných elektráren v 90. letech 20. století (4, str. 109).

I dnes jsou reaktory PWR nejrozšířenějším typem průmyslově vyráběných reaktorů na celém světě. Jsou oblíbené zejména pro svoji jednoduchost (v porovnání s ostatními typy), vysokou spolehlivost a pro své rozšíření je s nimi nejvíce zkušeností.

2. 2. 2 Jaderné elektrárny v Jaslovských Bohunicích a Dukovanech

Po rozhodnutí o stavbě jaderných bloků typu VVER, byla v roce 1970 uzavřena dohoda mezi Československem a SSSR týkající se kooperace při budování elektráren podobně jako v případě elektrárny A – 1. Sověti měli poskytnout technickou i materiální pomoc při stavbě dvou jaderných zdrojů, z nichž každý měl být vybaven dvěma reaktory VVER 440.

Stavenišťem první elektrárny byly zvoleny Jaslovské Bohunice. Existovala zde již infrastruktura z důvodu výstavby A – 1. Příprava staveniště nového zdroje, nazvaného V – 1, začala z těchto důvodů velice brzy, již v roce 1972, a v roce 1973 byly zahájeny výkopové práce. Druhou lokalitou byly určeny Dukovany na Třebíčsku. I tam se začalo pracovat roku 1973, šlo ovšem pouze o přípravu stavby.

Podle plánu měly být obě jaderné elektrárny uvedeny do provozu do roku 1980. Projekt elektrárny V – 1 pokračoval rychle kvůli již vybudovanému zázemí, v Dukovanech byly práce zpomaleny v důsledku diskuse o jaderné bezpečnosti. Zatímco západní dodavatelé uzavírali reaktory do ochranných obálek z předepjatého betonu s ocelovou vystýlkou kvůli hermetičnosti bloku v případě úniku radioaktivity, Sověti nadále spoléhali na vysokou kvalitu všech vyrobených komponentů, ale např. proti prasknutí potrubí, při nichž by došlo k velkým ztrátám chladiva (havárie LOCA – loss of coolant accident), neexistovala ochrana. Sověti přistoupili na bezpečnostní opatření doporučená Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (MAAE) a upravili projekty lehkovodních reaktorů. Při netěsnosti primárního okruhu by se začala radioaktivní voda měnit v páru. Primární okruh byl však uzavřen do betonové budovy reaktorovny a nadbytečná pára by odešla do tzv. barbotéru, kde by zkondenzovala. Nedošlo by tak k zamoření ostatních prostor elektrárny či jejího okolí radioaktivitou (4, str. 135).

Termín spuštění v roce 1980 se zdál být již zcela nereálný. Jako kompenzace zpoždění byla schválena duplikace elektrárny V – 1 v Jaslovských Bohunicích, označená V – 2 a také v Dukovanech byl projekt rozšířen o další dva bloky VVER 440. V roce 1976 padlo v SSSR rozhodnutí o vybavenosti všech budoucích reaktorů typu VVER 440 systémem dochlazování aktivní zóny a barbotérem kvůli ochraně před únikem radiace, nové typy reaktorů VVER 1000 pak byly projektovány s jednoduchou plnotlakou obálkou (4, str. 140). Kvůli značné pokročilosti ve výstavbě pokračovala ve staré koncepci pouze elektrárna V – 1, nový blok V – 2 a všechny čtyři bloky v Dukovanech se přizpůsobily novému projektu.

Elektrárna V – 1 byla spuštěna koncem roku 1978, v únoru 1980 pak byl spuštěn i druhý blok. Termín dokončení ovšem nebyl splněn u V – 2 a u elektrárny Dukovany, elektřina prvního bloku V – 2 se objevila v síti až v roce 1984, druhého v roce 1985. Ve stejném roce byl připojen k síti i první blok JE Dukovany, další tři bloky následovaly postupně až do roku 1987. Každý jaderný zdroj měl celkový výkon 1760 MWe. Technické parametry EDU jsou uvedeny v tabulce č. 3 v příloze.

Jaderná elektrárna Dukovany je stále stabilním zdrojem elektrické energie, které za prvních dvacet let v provozu vyrobila 240 292 GWh, roční výroba se pohybuje okolo 13,5 TWh, což je zhruba 20% celkové výroby elektrické energie v České republice (5, str. 159). Výkon elektrárny se díky modernizacím turbín zvyšuje, v roce 2007 dosáhl 1808 MW (6). Plánovaná životnost je až šedesát let (7).

V Jaslovských Bohunicích probíhala v devadesátých letech rekonstrukce obou bloků V – 1, zejména co se týče jaderné bezpečnosti (8). V roce 2000 byla rekonstrukce dokončena. Slovenská republika se ovšem zavázala v rámci přístupových jednání s Evropskou unií ukončit provoz elektrárny ke konci roku 2008.

2. 2. 3 Jaderné elektrárny v Mochovcích a Temelíně

Do roku 1990 plánovalo Československo vybudovat dvanáct bloků VVER 440 a čtyři bloky VVER 1000. Pro zbývající čtyři bloky VVER 440 byla vybrána lokalita Mochovce na jižním Slovensku, bloky o výkonu 1000 MW měly stát v Malovicích u Českých Budějovic. Výběr místa však ovlivnilo zemětřesení z počátku roku 1977 s epicentrem v Rumunsku, které se projevilo na zařízení bulharské jaderné elektrárny Kozloduj. Výběr geologicky stabilních oblastí pro JE tak byl zpřísněn. Místo stavby v Mochovcích se posunulo dále od Hronu, který měl být zdrojem vody, na stabilnější podloží, Malovice se opustily zcela a místo nich byla vybrána lokalita Temelín.

Přípravné práce v Mochovcích začaly v roce 1981, samotná stavba v listopadu 1982. Plánované uvedení do provozu koncem 80. let se nezdařilo. Po sametové revoluci a rozdělení federace narazila slovenská strana na nedostatek peněz. Po vstupu zahraničních strategických partnerů bylo v roce 1995 rozhodnuto vládou SR o zprovoznění pouze dvou bloků. Na ostatních dvou blocích byla práce zastavena. Ke konci roku 2008 ovšem padlo rozhodnutí v rámci energetické bezpečnosti SR a v souvislosti s odstavením obou bloků V – 1 v Jaslovských Bohunicích dostavět Mochovce na původní výkon.

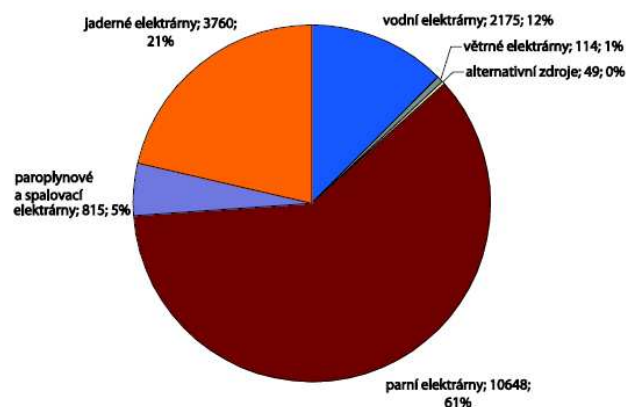
Cesta k provozu temelínské elektrárny byla také značně složitá. Práce na staveništi probíhaly od roku 1983, stavba začala o čtyři roky později. Ani Temelínu se nevyhnula zpoždění kvůli pádu minulého režimu, poklesla výrazně ekonomika, začala restrukturalizace průmyslu a snížila se spotřeba elektrické energie. V březnu 1993 tedy byla přehodnocena potřeba zdroje o velikosti 4000 MW a schválena byla stavba pouze dvou bloků. Celá devadesátá léta se nesla ve vylepšování zařízení elektrárny (např. modernizace řídicího systému) a zvyšování bezpečnosti pod dohledem MAAE (a pod tlakem domácích a zahraničních ekologických aktivistů, zejména rakouských) (9). V letech 2002 a 2003 byla elektrárna nakonec uvedena do provozu. Technické údaje jsou uvedeny v tabulce č. 3 v příloze. Dostavba je ve fázi diskuse, ovšem vlastník JE, společnost ČEZ, podala v červenci 2008 na MŽP žádost o provedení studie vlivu na životní prostředí (EIA).

3 Současnost a možnosti rozvoje jaderné energetiky v Česku

3. 1 Nynější stav české energetiky

Česká republika je v dnešní době soběstačná ve výrobě elektrické energie. Ke konci roku 2007 činil celkový instalovaný výkon 17 561 MWe, jak vyplývá z obrázku č. 2, celková netto produkce v témže roce dosáhla 81,41 TWh netto, spotřeba pak 59,75 TWh netto (5, str. 15). Přebytek se exportuje. Energetika je v současné době stabilní, stojí na dvou bázích: hnědém uhlí a jaderném palivu; obojí je z tuzemských zdrojů. Dalšími zdroji energie jsou především vodní a paroplynové elektrárny, dále pak elektrárny se spalovacími turbinami – tj. plynové elektrárny, celkovou výrobu ještě doplňují větrné a alternativní zdroje s nepatrnou hodnotou celkového výkonu.

Výroba elektřiny neustále vzrůstá, v letech 2000 až 2007 zhruba o 20 %, největší skok za poslední léta byl zaznamenán v souvislosti s uvedením ETE do provozu. Spotřeba elektrické energie ovšem nijak nezůstává pozadu. V uvedeném časovém horizontu se zvedla o 13,5 %. Tento nárůst by mohl být daleko vyšší, vezme-li se v potaz vysoký hospodářský růst, kterým naše republika v té době prošla. Na takovém nízkém růstu spotřeby (průměrně o necelá 2 % ročně) při tomto donedávna výrazném růstu HDP má jistě podíl celkové snižování energetické náročnosti ekonomiky. V porovnání s vyspělými západoevropskými zeměmi mělo hospodářství České republiky v roce 2006 o 45 – 50 % vyšší spotřebu energie při přepočtu na jednotku HDP podle parity kupní síly (5, str. 11). Tyto hodnoty jsou ale zaznamenávány ve všech zemích bývalého východního bloku a souvisí s transformací na tržní systém hospodářství a jeho modernizací.

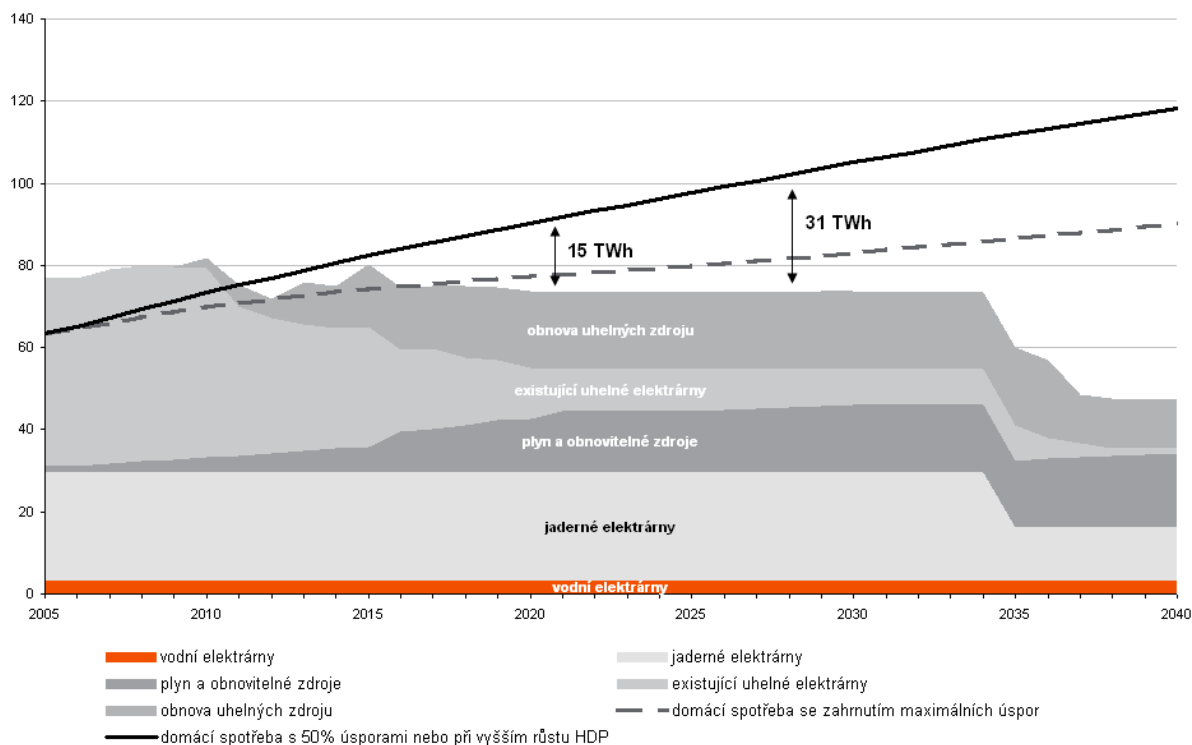


Obr. č. 2: Struktura instalovaného výkonu v ČR v roce 2007 vyjádřená v MW a procentech (zdroj: ERÚ).

3. 2 Obecná predikce vývoje energetiky ČR do roku 2020 a význam jádra v ní

Z předchozí kapitoly se může zdát, že naše energetika je velmi stabilní. Z pohledu dneška tomu tak skutečně je. Bohužel výhled, a to již výhled krátkodobý, není tak optimistický. V horizontu několika let můžeme očekávat vyrovnanou bilanci výroby a spotřeby elektřiny, a to i při současném zpomalení růstu ekonomiky v důsledku světové hospodářské krize. Tato situace podle všeho nastane po roce 2012. Příčin je několik: stoupající spotřeba elektrické energie, vyřazování uhelných elektráren z důvodů konce jejich životnosti a absence výstavby nových zdrojů. Závažnost tohoto stavu bude navíc akcentována skutečností, že v podobné situaci bude většina zemí našeho regionu, a tudíž elektřinu nebude odkud dovézt (10, str. 8). Jestliže nedojde k výstavbě nových energetických zdrojů, deficit se bude postupujícím časem zvyšovat, jak je vidět z obrázku č. 3.

Aby se předešlo nedostatku elektřiny, musí být učiněna rychlá rozhodnutí o dalším vývoji naší elektroenergetiky. Především musí být zajištěna podpora státu při naplňování energetické koncepce. Politická nejistota v otázkách energetiky se totiž neprojevuje výraznými objemy investic do tohoto segmentu. Musí být jasně řečeno, kterým směrem se bude energetika ubírat a na kterých palivových bázích se bude rozvíjet, protože import některých paliv zvyšuje závislost České republiky na zemích, z nichž tyto suroviny pochází. Zejména po zkušenosti s plynovou krizí začátkem ledna 2009 je jasné, že snižovat emise odstavením uhelných elektráren a nahrazovat je plynovými je sice ekologičtější řešením, ale zvyšuje naši závislost na Ruské federaci. V případě dalšího pozastavení dodávek zemního plynu by se tak nemuselo dostávat nejen tepla, ale i elektřiny. Tato možnost vývoje tedy očividně odporuje snaze o diverzifikaci zdrojů zvláště poté, co Rusko v roce 2005 definovalo energetiku jako nástroj obnovení svého velmocenského postavení ve světě.



Obr. č. 3: Výhled spotřeby elektrické energie v ČR v porovnání s dostupnými zdroji – bez výstavby nových zdrojů; pouze obnova stávajících (zdroj: ČEZ, a. s.)

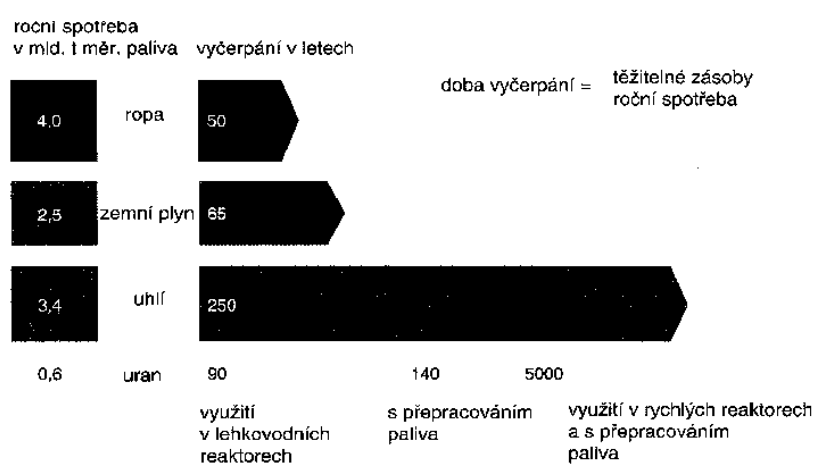
Obecným receptem na zvládnutí možné krize v energetické bilanci je tedy postupné obnovování zdrojů spotřebovávající domácí suroviny. V případě tepelných elektráren je palivem tuzemské hnědé uhlí. Jeho zásoby jako v dnešní době rozhodujícího zdroje v energetice jsou však omezené. V horizontu několika desítek let budou zásoby vyčerpané. Životnost jednotlivých lomů v ČR je 14 – 50 let (5, str. 20). Těžbu v blízké budoucnosti omezí i ekologické limity stanovené v devadesátých letech. Jen na dole ČSA patřící Mostecké uhelné, a. s. je územními limity blokováno na 750 mil. tun zásob hnědého uhlí. Prolomení limitů by tedy bylo jedním z významných rozhodnutí, která vývoj české energetiky ovlivnila, situace je ovšem kvůli existující zástavbě velmi citlivým tématem.

Další domácí surovinou je uranová ruda, jež se dnes průmyslově těží v ČR i v celé EU pouze v Dolní Rožínce v rámci státního podniku Diamo. Je pravdou, že palivo do jaderných elektráren je dodáváno ze zahraničí (od roku 2010 výhradně ruskou firmou TVEL), ovšem v případě výrazné renesance jaderné energetiky ve světě bude mít ČR jako producent této suroviny stále jistou výhodu. Zatímco státy nedisponující uranovou rudou budou palivo nakupovat, ČR může žádat pouze jeho přepracování do podoby palivových článků. Vzhledem k růstu ceny uranu na světových trzích a předpokládaným růstem poptávky je jeho těžba na našem území žádoucí, ne-li nutná (9).

Jaderná energetika má v ČR zhruba pětinový podíl (21 %) na celkovém instalovaném výkonu (obr. č. 2). Výroba elektřiny v elektrárnách Dukovany (EDU) a Temelín (ETE) se podílí na veškeré produkci asi 31 % (5, str. 158). Ovšem v kontextu předchozí kapitoly je takřka jisté, že bez výstavby nových jaderných bloků a prodloužení životnosti těch stávajících bude ohrožena naše energetická bezpečnost. Toto nebezpečí zvyšuje současný růst poptávky v kombinaci s odstavováním tradičních elektráren spalujících fosilní paliva z důvodu konce jejich životnosti. Jaderná energetika nejenže umožňuje soběstačnost naší země ve výrobě

elektriny, ale je také ideálním řešením ambiciózních plánů Evropské unie v oblasti snižování emisí skleníkových plynů. EU se do roku 2020 zavázala snížit objem vypouštěných skleníkových plynů o 20 % oproti úrovni roku 1990. Snížení není z důvodů míry vyspělosti pro všechny státy stejné, pro ČR platí snížení o 13 % (5, str. 77). Od roku 2012 se navíc změní obchodování s emisními povolenkami. Nebudou se již přidělovat jako doposud, ale nakupovat. Nastal tedy přechod od politické diskuse k prvním konkrétním opatřením týkajících se boje proti globálním změnám klimatu. Právě proto je třeba neustále poukazovat na absenci vzniku skleníkových plynů při provozu jaderných elektráren. Vždyť elektrárny Dukovany a Temelín pomohly řešit nejen energetické potřeby ČR, ale podílely se značnou měrou i na zlepšení stavu životního prostředí. Zvláště spuštění ETE umožnilo vyřadit některé zastaralé bloky uhelných elektráren z provozu a ulehčit tak severní části naší republiky výrazně zatížené povrchovou těžbou uhlí, značnou hustotou průmyslu a právě výrobou elektriny.

Co se týká obnovitelných zdrojů energie, je třeba vzít v úvahu vzrůstající spotřebu primárních energetických zdrojů a zároveň jejich reálný nedostatek hrozící již v příštích několika desetiletích (obr. č. 4). Potenciál obnovitelných zdrojů v jiných částech světa je jistě tak velký, aby pokryl spotřebu tamních ekonomik; v ČR toto ovšem neplatí. Žádný obnovitelný zdroj sám



Obr. č. 4: Roční spotřeba vybraných paliv a doba do jejich vyčerpání (zdroj SÚJB).

o sobě (ani jejich kombinace) není schopen uspokojit naše energetické nároky. Z obnovitelných zdrojů by v České republice bylo možno vyrobit až 49,8 TWh elektrické energie (5, str. 193). Při spotřebě asi 59,8 TWh netto by se tak již dnes muselo spoléhat na jiné než OZE. Přes veškerý technologický pokrok v této oblasti se v roce 2020 očekává hodnota 11,70 TWh. Při představě, jakou úroveň bude mít naše spotřeba energie v době, kdy budeme potenciál OZE schopni plně využít, je myšlenka pokrytí veškerých energetických potřeb tímto způsobem zcela nereálná.

Ani úspory snižující energetickou náročnost české ekonomiky, které mohou v roce 2020 dosáhnout až 15 TWh elektrické energie (7), ani zvyšování podílu OZE nemůže zaručit vyrovnanou bilanci výroby a spotřeby elektrické energie u nás. Vliv na tuto skutečnost bude mít i postupné odstavování tepelných elektráren z důvodu konce jejich životnosti. Navíc na výrobu energie v hnědouhelných elektrárnách bude mít dopad i již zmíněná změna na trhu emisních povolenek. Prostředky, které by tak mohly být reinvestovány do sektoru elektroenergetiky, budou odcházet jinam, což pravděpodobně způsobí při nedostatečně „zelených“ technologiích zvýšení ceny elektriny. Všechna výše uvedená fakta jednoznačně ukazují, že význam jaderné energetiky se bude zvyšovat. Jaderná energetika zůstane v podstatě jedinou možností, jak vyrobit velké množství relativně levné a čisté energie a zároveň zachovat udržitelný rozvoj nejen ČR, ale i celého světa.

3. 3 Budoucnost jaderných zdrojů v ČR

3. 3. 1 Prodlužování životnosti jaderných elektráren

Udržení stávajících energetických zařízení v provozu znamená provádět jejich údržbu. Tato oblast zahrnuje pravidelnou kontrolu funkčnosti komponent a zachování jejich kvality a provádění testů všech systémů. Patří sem také dodržování všech stanovených postupů a další aktivity, zajišťující bezpečný a ekonomický provoz. Údržba se týká prakticky většiny zařízení, se kterými se můžeme v životě setkat. Její zanedbání vede nakonec ke ztrátě funkčnosti, a tím ke škodě, v lepším případě ekonomické, v horším případě ke škodě na zdraví, popř. na životech.

Každé zařízení má svůj životní cyklus. Délka tohoto cyklu závisí na konstrukci, použitých materiálech, zatížení apod. U tak složitého, technologicky náročného a nákladného komplexního celku, jakým je jaderná elektrárna, je ale třeba přemýšlet o prodloužení doby provozu nad rámec původně projektovaného časového horizontu. Důvody jsou zřejmé. Při prodlužování životnosti klesají celkové náklady na vyrobenou jednotku elektrické energie, která se tak stává konkurenceschopnější. Navíc náklady na udržování elektrárny v provozu jsou nesrovnatelně nižší než suma nutná k výstavbě elektrárny nové. V neposlední řadě jde i o posun následných výdajů, neboť likvidace jaderného zařízení není kvůli radiotoxicitě mnoha komponent jednoduchá.

Prodlužování životnosti jaderné elektrárny se realizuje důslednou kontrolou životnosti všech součástí, při jejímž vyčerpání se komponenta vymění. Tato činnost je založena na následujících principech: řízení doby života komponent, analýza integrity materiálů a životnosti celých zařízení a měření nejrůznějších veličin a jejich následná interpretace. Při této činnosti se používají výpočtové modely a nejmodernější diagnostické metody včetně počítačového modelování.

Řízené stárnutí představuje systém zjišťování skutečného stavu namáhání jednotlivých součástí vedoucí ke stanovení zbytkové životnosti. Výsledkem je efektivní předcházení poruchám, správné načasování výměny součástí, popř. její opravy za přijatelnou cenu. Po opravě součásti je samozřejmostí záruka bezpečného provozu celého zařízení v budoucnosti.

Porušení integrity materiálu komponent v jaderném zařízení by mohlo mít katastrofální důsledky, proto je třeba tomuto jevu věnovat mimořádnou pozornost. Cílem je, aby k němu za žádných okolností nedošlo. Všude v průmyslu mohou být použité materiály vystaveny nepříznivým, až agresivním podmínkám, ať již fyzikální či chemické povahy. V jaderné elektrárně však působí kromě vysokých teplot a tlaků či koroze ještě jeden specifický faktor: radioaktivita. Má samozřejmě vliv pouze na primární okruh. Právě v primárním okruhu má specifické postavení jedna z nejdůležitějších částí elektrárny – tlaková nádoba. Nelze ji vyměnit. Životnost celé elektrárny tak záleží na životnosti tlakové nádoby.

Tlaková nádoba je těžké a rozměrné těleso vyrobené z kvalitní oceli se specifickými požadavky na mechanické vlastnosti a odolnost vůči nejrůznějším provozním vlivům jako teplotní a mechanické namáhání, koroze, eroze, radiační poškození či případné poškození vlivem seizmicity. Hledisko bezpečnosti bezvýhradně vyžaduje naprostou spolehlivost nádoby po dobu provozu (několik desítek let). Během tohoto času se v materiálu postupně

hromadí defekty způsobené všemi těmito výše zmíněnými jevy nebo jejich kombinací a dochází ke komplexnímu stárnutí materiálu čili ke ztrátě jeho mechanických vlastností (zejména houževnatosti). Lze říci, že reaktorové tlakové nádoby pracují vždy v oblasti opakovaného namáhání a že hromadění provozního poškození může vést ke vzniku trhlinek v místech koncentrací napětí (většinou na povrchu stěny nádoby) a kolem makrodefektu (původem např. z výroby). Provozní poškození je únavového typu. (3, str. 323 – 324).

Odolnost proti radiačnímu poškození je jednou z hlavních vlastností, která musí být u materiálu tlakové nádoby dostatečně zajištěna, neboť řada nepříznivých provozních vlivů je tímto jevem urychlována. Důsledkem je výraznější změna struktury materiálu, zvláště pak je ovlivněna houževnatost. Neutronové záření tedy působí postupné zkřehnutí tlakové nádoby. Během provozu se z tlakové nádoby odebírají tzv. svědečné vzorky, na kterých se zjišťují hodnoty mechanických vlastností. Nízkou houževnatost materiálu je třeba obnovit, např. regeneračním žíháním; tak dochází k prodloužení její životnosti. Tato operace je velmi náročná, probíhá několik desítek hodin a musí být dodržena úzká tolerance žíhacích teplot (11). Správným výběrem materiálu a zvláště použitím vhodných technologií při výrobě tlakových nádob reaktorů (chemické složení, ovlivnění mikrostruktury) lze účinek radioaktivity na materiál zmírnit, nikoli však zcela utlumit.

Součásti v nejaderné části elektrárny jsou namáhány jevy jako teplota, tlak a koroze. Zjišťování stavu součástí je založeno na sběru dat o chování materiálů, z nichž jsou vyrobeny, a predikci stavu těchto materiálů v budoucnu. Tato data jsou použita v platných materiálových teoriích a s pomocí výpočtového aparátu a počítačového modelování jsou interpretována do potřebné podoby. Jedná se především pevnostní a stabilitní výpočty, modelování stacionárního a nestacionárního šíření tepla nebo dynamické výpočty související s kmitáním. Zvláštní důležitost má složité modelování vlivu seizmické aktivity kvůli jaderné bezpečnosti, i když jsou lokality pro výstavbu jaderných elektráren pečlivě zkoumány a vybírány jsou pouze místa se stabilním podložím bez zlomů či jiných geologických vad.

Celková modernizace se ovšem nevztahuje pouze na strojní zařízení. Systémy kontroly a řízení, monitorování radiace a diagnostiky primárního okruhu jsou stále dokonalejší, pracují sofistikovaněji, jsou schopny odhalit riziko poruchy s větší pravděpodobností než dříve. K ještě vyšší míře bezpečnosti přispívá budování plnorozsahových simulátorů, které slouží ke zlepšování schopností obsluhy reaktoru potýkat se s náhlými provozními událostmi.

Jaderná elektrárna Temelín byla spuštěna před několika málo lety, její životnost tedy není zdaleka vyčerpaná. Navíc díky úpravám projektu provedeným během stavby v 90. letech je ETE na úrovni bezpečnosti srovnatelné se západními elektrárnami podobného typu. Není důvod, proč by i ETE nemohla vyrábět elektřinu i po vypršení původního intervalu její životnosti.

Prodloužení životnosti nad projektovaný rámec se ale takřka bezprostředně týká elektrárny v Dukovanech. Její stavba probíhala v 80. letech za použití tehdy nejlepších dostupných technologií. Životnost tak byla plánována na třicet let, tedy do roku 2015. V důsledku kvality všech zařízení a modernizace během provozu je možné počítat s desetiletým odkladem odstavení. Elektřina by se tak v EDU měla vyrábět až do roku 2025. Již dnes se ale hledají cesty, jak posunout její definitivní konec až k roku 2045.

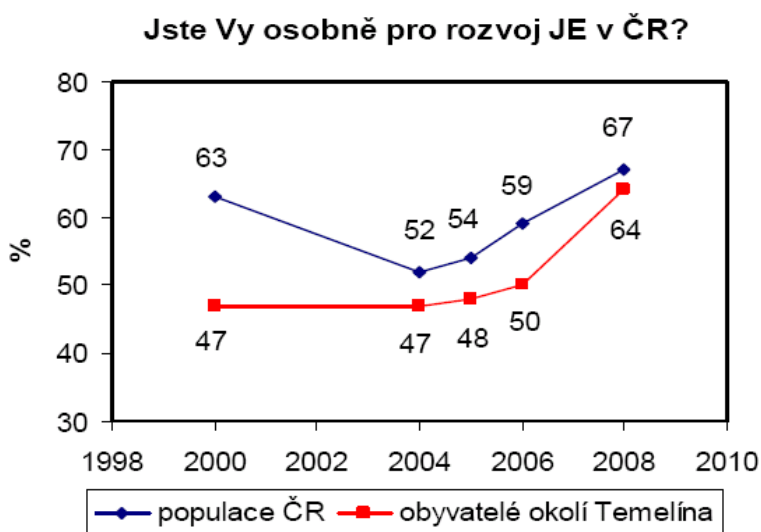
3. 3. 2 Výstavba nových bloků s novými typy reaktorů

Samotné prodlužování životnosti jaderných elektráren má jistě svoji nezastupitelnou úlohu. V dnešní době plánovaná životnost až šedesát let je především z ekonomického hlediska velmi zajímavá. Není nutná tak častá obnova celých jaderných bloků a s tím spojená nákladná demontáž veškerých zařízení, včetně komponent zasažených radioaktivitou. Celkové vyrobené množství elektřiny připadající na jeden reaktor za dobu provozu se tak zvýší, nicméně instalovaný výkon zůstává v podstatě konstantní. Postupná výměna některých komponentů za účinnější (příkladem zvyšování účinnosti EDU) zvýší výkon pouze řádově v procentech.

V případě trvalého růstu poptávky po elektrické energii kolem 2 % ročně se tak musí počítat se zahájením výstavby nových bloků. Tento scénář se pravděpodobně České republice nevyhne. Je ovšem časově náročný, neboť proces schvalování stavby, získávání veškerých povolení a samotná realizace projektu trvá zhruba 15 let (7). Celý proces je tedy dlouhodobý a vyžaduje jasné politické rozhodnutí o směřování energetiky a dodržování této koncepce.

Jestliže padne rozhodnutí o budování energetiky na jaderné bázi podporované ještě dnes významným podílem výroby elektřiny z uhlí, popř. zemního plynu a OZE, je nutno udělat několik dalších závažných rozhodnutí. Předně musí být vyřešeny otázky bezpečnosti, typu a počtu reaktorů a s tím souvisejícího instalovaného výkonu, financování, lokality budoucí JE a ukládání vyhořelého paliva.

Bezpečnost je velice důležitá z hlediska následků případné havárie (Core Damage Frequency). Pravděpodobnost této havárie se u dnešních moderních reaktorů (Generace III a III+) pohybuje v řádech $10^{-6} - 10^{-7}$ (12). Nejedná se ale pouze o bezpečnost vyjádřenou v číslech, důležité je ukázat veřejnosti, že se podobných projektů nemusí obávat. Podpora veřejného mínění je významným faktorem zvláště u tak citlivé otázky, jakou výstavba jaderných elektráren bezesporu je. V České republice je podpora rozvoje jaderné energetiky stabilní, pohybuje okolo 60 %, jak je vidět na obrázku č. 5. V posledních letech přibývá rozhodných stoupenců. Tento nárůst pravděpodobně souvisí s obecnými jevy poslední doby, jakými jsou např. zvyšování ceny elektřiny a donedávna rekordní ceny ropy. Tyto věci se začínají zásadněji dotýkat celé společnosti a v důsledku aktivizace diskuse kolem těchto témat lidé začínají měnit svoje názory a postoje (13).



Obr. č. 5: Vývoj veřejného mínění v otázce rozvoje JE v ČR (zdroj: STEM).

Počet reaktorů se odvíjí od energetických potřeb ČR. Částečně ale také závisí na uvažované lokalitě. O případném výběru místa a portfoliu vhodných lokalit bude pojednáno níže. Dnes nejdiskutovanější variantou je kompletace jaderné elektrárny Temelín na původně plánovaný rozsah čtyř bloků. Dva bloky VVER 1000 již několik let pracují. Ač vládní prohlášení odmítá jakékoli kroky k rozvoji jaderné energetiky u nás, ČEZ jako vlastník a provozovatel většiny elektráren podal v červenci 2008 na MŽP žádost o provedení studie vlivu na životní prostředí (EIA). Po obdržení všech studií a povolení, což bude trvat několik let, se může začít s realizací stavby. V rámci platné energetické koncepce se hovoří o nutnosti dvou nových jaderných bloků do roku 2020. Podle společnosti ČEZ je pro jejich spuštění v daném termínu nutné dodržet následující podmínky: postavit tlakovodní reaktor, osvědčený (ne prototyp), provedení stavby na klíč (příprava staveniště rok, samotná výstavba pět let), zapojení lokálního průmyslu a samozřejmě politická podpora (7).

V úvahu přicházejí moderní reaktory generace III, a to pět následujících typů:

- VVER 1000 – ASE 92 od ruského Atomstrojexportu,
- EPR 1600 od evropské společnosti AREVA,
- EU 1700 od japonského dodavatele Mitsubishi Heavy Industries,
- ATMEA, což je společný projekt korporací Mitsubishi a AREVA,
- AP 1000 od Westinghouse (14).

VVER 1000 ASE 92 je modernizovaný typ reaktoru vyráběný ruskou společností Atomstrojexport. Základem je typ II. generace VVER 1000, model 320. Dva bloky tohoto staršího typu již v Temelíně stojí. Nespornou výhodou dodavatele by tak byla znalost prostředí. Navíc podpůrné systémy elektrárny, koncipované na čtyři bloky, by jistě postačovaly i těmto modernějším. Hrubý výkon reaktoru je 1050 MWe, plánovaná životnost je 60 let. Dodavatel uvádí maximální snížení odstávek a dosažení hodnoty load factor až 90 %. Možné je i využití tepla vznikajícího při štěpení k vytápění objektů. Projekt je certifikován vůči požadavkům EUR, což je certifikace organizace evropských provozovatelů jaderných elektráren (European Utility Requirements). Výstavba tohoto typu reaktoru probíhá v Bulharsku (Belene) a v Indii (Kudankulam 1, 2) (7; 12).

Projekt EPR 1600, jehož dodavatelem je evropské konsorcium AREVA (Framatome a Siemens) kombinuje francouzské a německé zkušenosti s vývojem a provozem jaderných zařízení. Francouzská strana dodává komponenty samotného reaktoru, německá zajišťuje strojní zařízení. EPR úspěšně prošel certifikací EUR, je licencován ve Finsku a ve Francii. V obou zemích je tento typ ve fázi stavby (Olkiluoto 3, Flamanville 3). Výkon reaktoru je 1650 MWe, plánovaná doba provozu je 60 let, samotná výstavba pak trvá v ideálním případě 57 měsíců (12).

Dodavatelem EU 1700 je Mitsubishi Heavy Industries. Reaktor je typu APWR (Advanced Pressurized Water Reactor - pokročilý tlakovodní reaktor). Projekt vychází ze zkušeností s provozem třidvaceti tlakovodních elektráren z produkce Mitsubishi v Japonsku a je uzpůsoben evropským i americkým požadavkům na provoz a bezpečnost. Výkon reaktoru je kolem 1700 MWe, plánovaná životnost 60 let. Doba výstavby se pohybuje kolem 46 měsíců. Žádost o certifikaci EUR byla podána v roce 2008. EU 1700 je v plánu v Japonsku (Tsuruga 3, 4) a ve Spojených státech (Comanche Peak – Texas 1, 2) (12).

ATMEA je společným projektem společností AREVA a Mitsubishi. Zatím nebyla podána žádost o certifikaci EUR. Výkon je kolem 1100 MWe (12).

Posledním typem reaktoru, který podle ČEZu připadá v úvahu, je AP 1000 od amerického výrobce Westinghouse. Prošel již certifikací EUR, licensován je ve Spojených státech a v Číně. Právě v Číně by měla v roce 2009 začít stavba prvních čtyř bloků tohoto typu (Sanmen 1, 2 a Haiyang 1, 2). Hrubý výkon AP 1000 je 1200 MWe. Stejně jako ostatní typy reaktorů je doba provozu plánována na 60 let. Ze všech uvedených reaktorů by však měl mít nejkratší dobu výstavby, a to 36 měsíců (12).

Výběr vhodného typu bude záležet na více kritériích. Tím nejsilnějším bude cena. Stavba JE patří všude na světě k investičně nejnáročnějším projektům. Na cenu má vliv bezpochyby bezpečnost, která se v žádném případě nemůže obcházet. Komponenty jsou z vysoce kvalitních materiálů, jejich výroba je náročná a nelze dosáhnout velké sériovosti. Také prostředky vynakládané na vývoj nových technologií, zlepšování vlastností používaných materiálů a zvyšování účinnosti všech zařízení jsou nemalé a musí se výrobci rentovat. Případná cena kompletace ETE nemůže být prozatím stanovena, neboť není rozhodnuto o dodavateli. Některé uvažované typy se ale staví v zahraničí, proto lze porovnat ceny stávajících zahraničních projektů. Celkové náklady na dva bloky VVER 1000 ASE 92 budované v Belene v Bulharsku činí 3,997 mld. Euro (15). Třetí blok finské JE Olkiluoto, který dodává AREVA (EPR 1600) má vyjít na 3 mld. Euro (16). Podle společnosti ČEZ bude stavba financována pouze vlastním kapitálem společnosti a bankovními úvěry. Stát by se tak měl pouze zaručit stabilitou politického prostředí (např. nezvratné schválení výstavby jaderných bloků v parlamentu) a na veřejné finance by stavba v podstatě neměla mít vliv (17).

Dalším důležitým kritériem může být diverzifikace dodavatelů. Ruský Atomstrojexport má sice z dřívějších dob mnoho zkušeností s naší jadernou energetikou, ovšem bylo by vhodné porušit závislost na jednom typu technologie. Od roku 2010 bude i do ETE dodávat palivo ruský TVEL namísto původního amerického dodavatele Westinghouse. I v dodávkách paliva do reaktorů by tak Česká republika byla závislá pouze na Ruské federaci, což z politického hlediska není právě žádoucí (10, str. 15).

Projekt by měl být posouzen i podle energetického výhledu. Výkon jednotlivých typů bloků se velmi liší a bude záležet na predikci spotřeby energie. Musí se vzít v úvahu i uzavírání zastaralých tepelných elektráren. Nový jaderný zdroj by měl být schopen pokrýt obojí, protože deficit energetické bilance (i krátkodobý) se může vymstít. Nedostatek jakéhokoli statku se projevuje zvýšením jeho ceny. Cena elektřiny je již dnes řízena mezinárodním trhem a každá chybějící kapacita se v konečné kalkulaci může projevit. Ať tedy bude výběr projektu probíhat jakkoli, výsledek by měl představovat přijatelnou rovnováhu mezi ekonomickými, energetickými a bezpečnostními aspekty stavby.

Lokalit vhodných ke stavbě JE je v České republice několik. Nejvhodnějším místem je samozřejmě Temelín, ke jehož dostavbě byla vztažena část této kapitoly výše. Byla zmíněna připravenost místa v souvislosti s původním konceptem výstavby čtyř bloků. Ani Dukovanům se čas od času nevyhýbají diskuse o jejich rozšíření o jeden či dva bloky, Temelín však nadále zůstává místem číslo jedna. Existují i některé jiné lokality, o kterých se uvažuje, především Blahutovice v Olomouckém kraji a Tetov v kraji Středočeském.

Často zmiňovanou skutečností, na kterou poukazují odpůrci jaderné energie jsou radioaktivní odpady vznikající při štěpení. Uvažujeme-li otevřený palivový cyklus, je pravdou, že při produkci energie vznikají odpady i silně radioaktivní. Veškeré tyto látky jsou dnes uchovávány v meziskladech vyhořelého paliva. V areálu EDU dnes existují dvě zařízení

tohoto typu: Mezisklad vyhořelého jaderného paliva a Sklad vyhořelého jaderného paliva. V Temelíně je stavba podobného skladu plánována.

Cílem je ale bezpečné a dlouhodobé skladování v hlubinném úložišti. Tato úložiště musí být budována v místě geologicky stabilním, aby byla zaručena naprostá izolace radioaktivních látek od životního prostředí po velice dlouhou dobu; uvádí se až jeden milion let. V dnešní době se dlouhodobé úložiště buduje ve Finsku, o výstavbě v ČR se uvažuje s výhledem uvedení do provozu kolem roku 2065 (5, str. 143).

Jistým mezičlánkem mezi otevřeným a uzavřeným cyklem je otevřený cyklus s přepracováním (transmutací) paliva. Neřeší problém jaderného odpadu úplně, ale dokáže výrazně snížit jeho hromadění. Koncepce ukládání vyhořelého jaderného paliva v hlubinných úložištích staví totiž celou jadernou energetiku v očích části veřejnosti do špatného světla. Cílem transmutačního procesu (souhrnně označený ADTT – Acceleration Driven Transmutation Technology) je likvidace radionuklidů s dlouhým poločasem rozpadu a jejich přeměna na krátkodobé nebo dokonce stabilní izotopy (18). Technologie spočívá v nárazech urychlených částic do terče z těžkého kovu, při kterých se z tohoto terče uvolňují neutrony udržující štěpnou reakci v reaktoru.

Transmutační technologie mají několik výhod:

- snižují celkové množství radioaktivního odpadu
- při transmutaci se vyrábí další energie (tzv. „odpad“ z dnešních jaderných elektrárnách totiž stále obsahuje asi 96 % původního množství uranu)
- produkty transmutace jsou sice radioaktivní, ale hodnoty poločasů rozpadu obsažených radionuklidů jsou výrazně nižší než v původním materiálu
- výhodou transmutačního reaktoru je obsah podkritického množství štěpného materiálu a tudíž nemožnosti nekontrolovatelné štěpné reakce (výkon zařízení lze regulovat pomocí urychlovače)

Řešením palivového cyklu bude v horizontu několika desetiletí spouštění tzv. rychlých či množivých reaktorů. Tyto reaktory patří ke IV. generaci. Budou schopny využívat zhruba stonásobné množství energie z jednotky hmoty paliva oproti současným jaderným elektrárnám II. generace. Zásoby paliva tak vystačí i při vzrůstající potřebě energie na několik tisíc let. Rychlé reaktory navíc umožňují vyrobit více plutonia Pu než sami spotřebují. Toto lze následně použít opět jako palivo (proto název množivý). Vysoce radiotoxické plutonium a minoritní aktinidy lze ale také postupně v těchto reaktorech spalovat a tak výrazně snížit množství radioaktivního odpadu. Doba nutná k izolaci od životního prostředí je díky snížené míře radioaktivity výrazně nižší než při otevřeném palivovém cyklu využívaném dnes a pohybuje se kolem jednoho tisíce let (5, str. 143 – 144). Mezi další výhody této technologie může patřit schopnost velkovýroby vodíku a jeho následné použití v dopravě, nebo dále produkce sladké vody díky odsolování vody mořské.

V současné době se uvažuje v rámci mezinárodní spolupráce (kvůli obrovským nákladům) o stavbě šesti typů rychlých reaktorů: SCWR (reaktor chlazený vodou s nadkritickými parametry), SFR (sodíkem chlazený rychlý reaktor), VHTR (vysokoteplotní reaktor), GFR (plynem chlazený rychlý reaktor), LFR (olovem chlazený rychlý reaktor) a MSR (reaktor na bázi tekutých solí) (5, str. 147). Uvedení do komerčního provozu je otázkou pravděpodobně 2. poloviny 21. století, ať již kvůli dostupnosti současných generací jaderných zařízení nebo kvůli vysokým nákladům být jen na demonstraci těchto reaktorů, popř. technickým překážkám, které je nutno teprve vývojem překonat.

4 Komplexní zhodnocení úlohy jaderné energetiky v ČR

Jaderná energie byla již od počátku 70. let součástí energetiky tehdejšího Československa. Je významná i v dnešní době samostatné České republiky a v následujících letech a desetiletích bude její role pravděpodobně vzrůstat. Jestliže proběhne plánovaná kompletace elektrárny Temelín na původní rozsah čtyř bloků a možná výstavba jaderných zařízení i na dalších místech, bude vyřešeno několik problémů najednou.

V první řadě nebude potíž s pokrytím neustále vzrůstající spotřeby elektrické energie související s růstem naší ekonomiky a celkovým rozvojem společnosti. V případě odmítnutí výstavby jaderné energetiky by Česku hrozil vzhledem ke skladbě použitelných primárních zdrojů energie deficit elektřiny, a to i přes jistě významná opatření v oblasti úspor domácností a snížení energetické náročnosti naší ekonomiky.

Jaderná energetika představuje nezávislost a energetickou bezpečnost. I při nutnosti nechat přepracovávat uran na palivové články v zahraničí, je uranová ruda jednou z mála surovin, jimiž Česko disponuje. Představy o energetice postavené na plynu a obnovitelných zdrojích energie (OZE) bohužel nejsou přijatelné. OZE nemají v České republice takový potenciál, aby pokryly celkovou spotřebu, a závislost na plynu importovaném z Ruské federace odporuje zájmům státu o diverzifikaci zdrojů energie. Ve stínu plynové krize z ledna 2009 by se tak v budoucnosti nemuselo dostávat ani tepla, ani elektřiny. Ruská federace dodává do ČR většinu ropy a od roku 2010 bude také výhradním dodavatelem paliva do jaderných elektráren. V této situaci je z politického i bezpečnostního hlediska důležité neposilovat tuto palivoenergetickou závislost zvýšením dovozu zemního plynu, zvláště poté, co Rusko v roce 2005 prohlásilo energetiku za nástroj obnovy svého velmocenského postavení ve světě.

Dalším, neméně důležitým přínosem jaderné energetiky bude nahrazení dosluhujících tepelných elektráren. To bude znamenat přispění ke zdravějšímu životnímu prostředí a snížení objemů vypouštěných skleníkových plynů. Česká republika tak splní cíl omezit emise těchto látek o 13 % do roku 2020, ke kterému ji zavazuje Evropská unie již dnes. Navíc spalováním uhlí pro výrobu elektřiny se připravujeme o surovinu životně důležitou pro naše teplárenství, které je nedostatkem uhlí ohroženo. V případě neprolomení ekologických limitů na těžbu uhlí z počátku 90. let se očekává vyčerpání zásob hnědého uhlí v průběhu několika desetiletí. Pokud nesnížíme podíl tepelných elektráren na celkové výrobě, budou se zásoby ztenčovat ještě rychleji. Jaderná energetika zůstane pravděpodobně jediným způsobem, jak vyrobit velké množství relativně levné a čisté energie při zachování trvale udržitelného rozvoje celé společnosti.

Nejpalčivějším problémem tak zůstává otázka radioaktivních odpadů. Kvůli velmi dlouhé době skladování a možnosti úniku radioaktivity do životního prostředí má jaderná energetika stále mnoho odpůrců. Rozšíření transmutačních technologií by pomohlo tento problém zmírnit, úplného uzavření palivového cyklu se dočkáme díky rychlým reaktorům, uváděným do provozu nejspíše v druhé polovině tohoto století. Je to sice ještě kus cesty, ale jaderná energetika zcela jistě neřekla své poslední slovo.

Seznam použitých zdrojů

1. HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. *Fyzika*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1868-0.
2. KLECZEK, Josip. *Velká encyklopedie vesmíru*. 1. vyd. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-0906-X.
3. BEČVÁŘ, Josef, et al. *Jaderné elektrárny*. 2. vyd. Praha: SNTL – ALFA, 1981.
4. NEUMANN, Jan. *Začátky jaderné energetiky v Československu*. 1. vyd. Řež: Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s., 2005. ISBN 80-239-4380-4.
5. BUBENÍK, Josef, DLOUHÝ, Vladimír, HRDLIČKA František, et al. *Zpráva Nezávislé odborné komise pro posouzení energetických potřeb České republiky v dlouhodobém časovém horizontu* [online]. 9/2008 [citováno 2009-01-25]. Dostupné z: <http://www.vlada.cz/assets/ppov/nezavisla-energeticka-komise/aktuality/Pracovni-verze-k-oponenture.pdf>
6. Skupina ČEZ. *JE v České republice*. [online]. 2009, [citováno 2009-01-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/energie-a-zivotni-prostredi/jaderna-energetika/informace-o-jaderne-energetice-/je-v-cr.html>>.
7. KOUKLÍK, Ivo. *Přítomnost a budoucnost jaderné energetiky*. [CD-ROM]. 2007 [citováno 2009-01-25].
8. SE, a. s. *História*. [online]. 2004, [citováno 2009-01-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.seas.sk/elektrarne/atomove-elektrarne/atomove-elektrarne-bohunice/historia-ebo/>>.
9. Skupina ČEZ. *Historie a současnost elektrárny Temelín*. [online]. 2009, [citováno 2009-01-25]. Dostupné z WWW: <http://www.cez.cz/cs/energie-a-zivotni-prostredi/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/historie-a-soucasnost.html>
10. Odborná pracovní skupina VKZBP. *Zpráva o bezpečnosti a hrozbách v energetice ČR 2007*. [CD-ROM]. 2006, [citováno 2009-01-25].
11. Škoda JS, a. s. *Výrobky a služby*. [online]. 2007, [citováno 2009-01-25]. Dostupné z WWW: http://www.skoda-js.cz/Vyrobyky_a_sluzby/Investicni_inzenyring/Rekonstrukce_provozovanych_bloku_VVER_cz.html
12. TITKA, Martin. *Generation III of nuclear reactors*. [online]. 2008, [citováno 2009-01-25]. Dostupné z WWW: www.snus.sk/nusim2008/Nusim%202008/Titka_NUSIM.pdf
13. STEM s. r. o. *Středisko empirických výzkumů*. [online]. 2007, [citováno 2009-01-25]. Dostupné z WWW: Dostupné z: <http://www.stem.cz/clanek/1238>

14. Skupina ČEZ. *Technologie*. [online]. 2009, [citováno 2009-01-25]. Dostupné z WWW: <http://www.cez.cz/cs/energie-a-zivotni-prostredi/dostavba-elektrarny-temelin/technologie.html>
15. ATOMSTROYEXPORT. *Current projects*. [online]. 2006, [citováno 2009-01-25]. Dostupné z WWW: <http://www.atomstroyexport.com/projects/current/project14/>
16. Teollisuuden Voima Oyj. *OL3 Project*. [online]. 2007, [citováno 2009-01-25]. Dostupné z WWW: <http://www.tvo.fi/www/page/2305/>
17. Skupina ČEZ. *Základní informace*. [online]. 2009, [citováno 2009-01-25]. Dostupné z WWW: <http://www.cez.cz/cs/energie-a-zivotni-prostredi/dostavba-elektrarny-temelin/zakladni-informace.html>
18. MARTÍNKOVÁ, Michaela. *Transmutační technologie ADTT*. [online]. 2001, [citováno 2009-01-25]. Dostupné z WWW: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2001-2002/Zima01/procs/adtt.pdf>

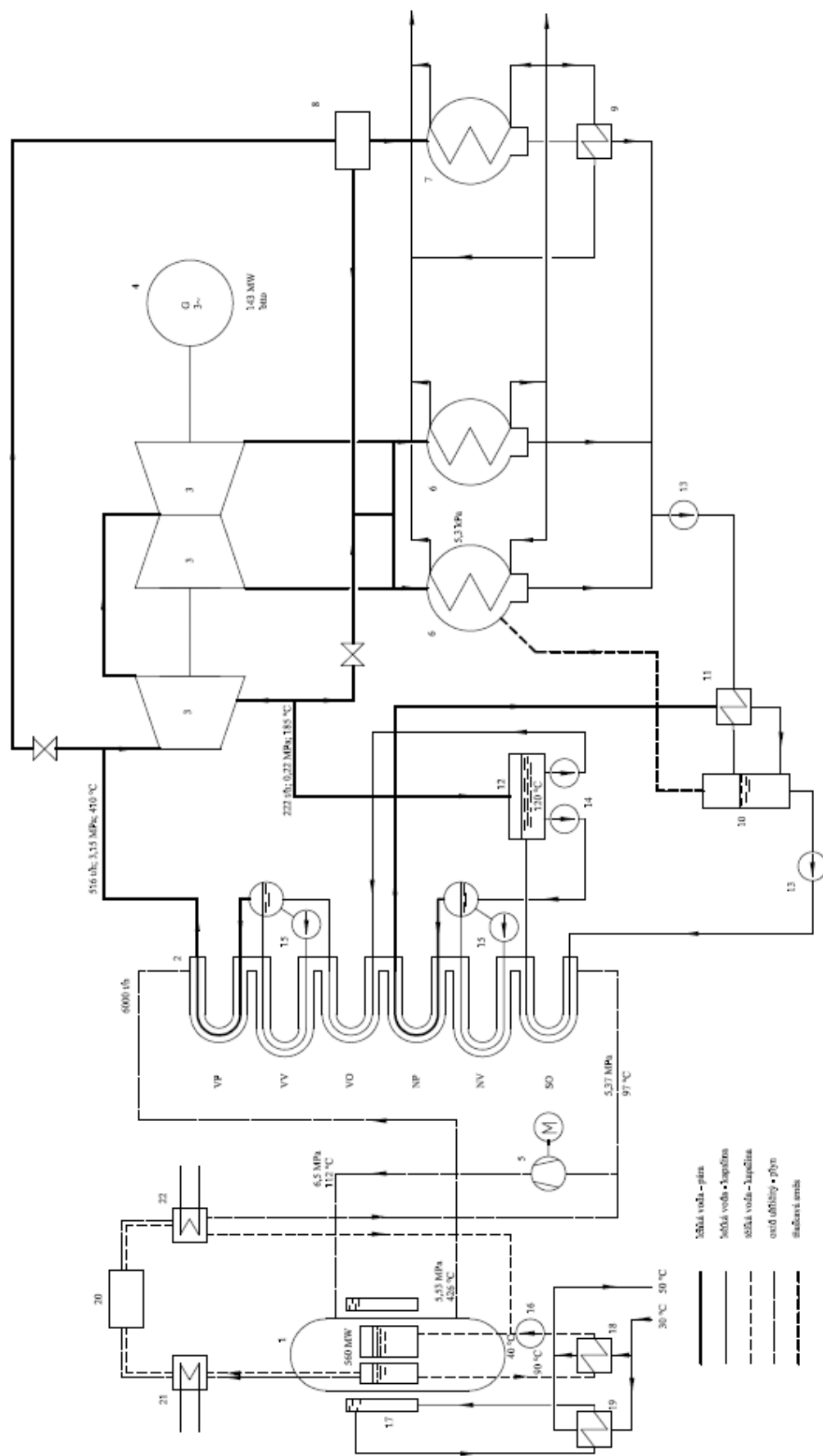
PŘÍLOHY

Příloha 1 – JE A1.

Tabulka č. 2. Parametry jaderné elektrárny A1 v Jaslovských Bohunicích.

Všeobecné údaje	
typ reaktoru	heterogenní na přírodní uran, moderovaný D ₂ O, chlazený CO ₂ , označení GCHWR
tepelný výkon reaktoru	560 MW (bez tepla do moderátoru)
elektrický výkon elektrárny	143 MW brutto, cca 103 MW netto
celková účinnost elektrárny	25,5 % brutto, 18,5 % netto
Palivový článěk	
jaderné palivo	přírodní kovový nelegovaný uran
rozměry palivového elementu	průměr 6,3 mm; délka 3910 mm
obal palivového elementu	slitina Mg-Be; tloušťka 0,5 mm; 12 podélných žeber výšky 0,7 mm
vnější průměr centrálního, resp. periferního palivového článku	14 mm, resp. 102 mm
počet palivových elementů v centrálním, resp. periferním palivovém článku	75, resp. 63 (bez termometrických elementů)
max. teplota obalu	500 °C
tepelné zatížení paliva	25 kW.kg ⁻¹
Aktivní zóna	
rozměry	průměr 3560 mm, výška 3910 mm
tloušťka radiálního reflektoru	420 mm
rozteč čtvercové mřížky	260 mm
počet palivových kanálů	148, z toho 44 centrálních a 104 periferních
vsázka jaderného paliva	22 400 kg
průměrné vyhoření paliva	242 GJ.kg ⁻¹ (2800 MWd.t ⁻¹)
moderátor, reflektor	těžká voda, D ₂ O
množství moderátoru v aktivní zóně a celkem	33 t; 72 t
max. a střední teplota moderátoru	90 °C; 65 °C
tepelné zatížení aktivní zóny	14 kW.dm ⁻³
celkové měrné množství moderátoru	0,50 kg.kW _e ⁻¹
Řízení reaktoru	
typ	kadmiové absorpční tyče
počet	4 regulační tyče, 32 kompenzačních tyčí, 4 havarijní tyče
Tlaková nádoba reaktoru	
rozměry	střední průměr 4950 mm; výška 20120 mm; tloušťka stěny válcové části 150 mm
hmotnost	705 t (včetně víka a šroubů)
Chladivo primárního okruhu	
druh chladiva	plynný oxid uhličitý (CO ₂)
parametry na vstupu do reaktoru	112 °C; 6,5 MPa
parametry na výstupu z reaktoru	426 °C; 5,53 MPa
průtočné množství reaktorem	6000 t.h ⁻¹
počet nezávislých chladicích smyček primárního okruhu	6
Chladivo sekundárního okruhu	
druh chladiva	lehká voda a její pára (H ₂ O)
parametry vysokotlaké páry	410 °C; 3,15 MPa; 520 t.h ⁻¹
parametry nízkotlaké páry	185 °C; 0,22 MPa; 216 t.h ⁻¹
tlak v kondenzátoru	5,3 kPa
počet nezávislých chladicích smyček sekundárního okruhu	3

(zdroje: tabulka – 3, str. 559; schéma na následující straně – 3, str. 390)



Tepelné schéma jaderné elektrárny A1 v Jaslovských Bohunícih

- 1 - reaktor; 2 - parní generátor; VP - vysokotlaký výparník; VV - vysokotlaký ohřívač; VO - vysokotlaký výparník; NP - nízkotlaký výparník; SO - společný ohřívač;
- 3 - parní turbína; 4 - elektrický ohřívač; 5 - oběhové dmychadlo; 6 - kondenzátor; 7 - pomocný kondenzátor; 8 - kondenzátor; 9 - chladič páry; 10 - chladič kondenzátu;
- 11 - vakuový odplynovač; 12 - ohřívač kondenzátu; 13 - kondenzát; 14 - kondenzát; 15 - napáječky; 16 - oběhová čerpadla; 17 - oběhové čerpadlo moderátoru;
- 18 - vodní biologická ochrana; 19 - chladič moderátoru; 20 - zařízení pro spalování třaskavé směsi; 21 - chladič; 22 - kondenzátor

Příloha 2 – EDU a ETE.

Tabulka č. 3. Parametry JE Dukovany a Temelín.

Parametr	JE Dukovany	JE Temelín
počet bloků	4	2
reaktor	tlakovodní VVER 440	tlakovodní VVER 1000
tepelný výkon jednoho bloku	1375 MW	3000 MW
vyváděný elektrický výkon bloku	440 MW	1000 MW
vnější průměr tlakové nádoby	3560 mm	4500 mm
výška tlakové nádoby	11800 mm	10900 mm
výška i s horním blokem	23960 mm	nezjištěno
hmotnost tlakové nádoby	215000 kg	322000 kg
vsázka paliva v jednom bloku	42000 kg	92000 kg
maximální vyhoření paliva	209 m ³	337 m ³
počet chladicích smyček jednoho bloku	6	4
objem chladicí vody	209 m ³	337 m ³
průtok chladiva reaktorem	10,8 m ³ .s ⁻¹	23,6 m ³ .s ⁻¹
pracovní tlak	12,25 MPa	15,7 MPa
teplota chladiva na vstupu	267 °C	290 °C
teplota chladiva na výstupu	297 °C	320 °C
výkon jednoho parogenerátoru	452 t.hod ⁻¹	1470 t.hod ⁻¹
max. tlak páry	4,6 MPa	6,3 MPa
max. teplota páry	259 °C	279 °C
počet turbín na blok	2	1
výkon turbíny	220 MW	1000 MW
otáčky turbíny	3000 min ⁻¹	3000 min ⁻¹
výkon generátoru	220 MW	1000 MW
výstupní napětí generátoru	15,75 kV	24 kV
počet chladicích věží na blok	2	2
výška chladicí věže	125 m	154,8 m
průtok chladicí věží	10,5 m ³ .s ⁻¹	17,2 m ³ .s ⁻¹
maximální odpar z chladicí věže	0,15 m ³ .s ⁻¹	0,4 m ³ .s ⁻¹

(zdroj: Česká zemědělská univerzita v Praze)