

**Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Energetický ústav
Odbor tepelných a jaderných energetických zařízení**

Ing. Jan Fiedler, Dr.

TERCIÁRNÍ OKRUHY TRANSMUTAČNÍHO ZAŘÍZENÍ

TEZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2001

© 2001 Jan Fiedler
ISBN 80-214-1911-3
ISSN 1213-418X

Obsah

1. Úvod	5
2. Možnosti nakládání s vyhořelým jaderným palivem	6
2.1 Otevřený palivový cyklus	6
2.2 Přepřacování vyhořelého jaderného paliva separačními metodami	6
2.3 Metalurgické metody separace a transmutační technologie	6
3. Koncepce transmutačního zařízení	7
4. Primární okruh	7
5. Sekundární okruh	8
6. Terciární okruh	9
7. Oběh parní kondenzační elektrárny jako TOT	10
8. Oběh plynové turbíny jako TOT	13
9. Závěr	16
10. Seznam použité literatury	17
11. Abstract	18

Představení autora



Jan Fiedler se narodil 27. 6. 1956 ve Velkém Meziříčí. V letech 1971–1975 studoval na Střední průmyslové škole strojnické ve Žďáře nad Sázavou. Studium zakončil maturitní zkouškou s vyznamenáním. V letech 1975–1980 studoval Fakultu strojní Vysokého učení technického v Brně, obor tepelně energetická zařízení, specializaci tepelné turbíny. Studium zakončil s vyznamenáním obhajobou diplomové práce „Plnicí turbodmychadlo“.

V roce 1980 nastoupil do První brněnské strojírně v Brně do konstrukce turbin, kde pracoval jako vývojový pracovník v oddělení vývoje parních turbin do roku 1990. Podílel se na vývojových a konstrukčních úkolech zejména v těchto oblastech: unifikace částí parních turbin, olejové hospodářství pro turbosoustrojí, měření prototypů parních turbin ve výrobním závodě a u zákazníků a odstraňování poruch a havárií parních turbin. Byl konstruktérem prototypů parních turbin typu R6 a T30.

Od roku 1991 dosud pracuje jako odborný asistent v odboru tepelných a jaderných energetických zařízení Energetického ústavu FSI VUT v Brně. V roce 1996 obhájil doktorskou disertační práci na téma „Teorie a konstrukce magnetické hřídelové ucpávky s práškovým těsněním“.

V pedagogické oblasti se zabývá zejména tepelnými turbinami, projektováním tepelných centrál a obnovitelnými zdroji energie. Přednáší předměty „Zdroje a přeměna energie“, „Projektování a ekonomika“ a „Energetické stroje“. Vede řadu cvičení v oborovém studiu a pravidelně 4–6 diplomových prací ročně.

V oblasti vědecké činnosti byl řešitelem jednoho grantu (FRVUT) a spoluřešitelem dvou zahraničních grantů (EUREKA) a čtyř domácích grantů (GAČR).

V oblasti spolupráce s průmyslem a veřejnou správou je autorem nebo spoluautorem 36 oponentovaných expertních zpráv, 7 článků v časopisech, 7 příspěvků na konferencích, jednoho autorského osvědčení a jednoho učebního textu – skripta.

Mezi jeho osobní zájmy patří atletika, běh na lyžích a plastické modelářství.

1. Úvod

Neustálý tlak na zvyšování spotřeby primárních energetických zdrojů vede přes všechny snahy společnosti o úspory k postupnému vyčerpávání všech neobnovitelných zdrojů. Před technickou veřejností stojí otázka hledání nových zdrojů energií nebo nových technologií pro využití známých surovin.

Významnou energetickou technologií v globálním měřítku je jaderná energetika. V současnosti pracuje ve světě více než 400 civilních energetických jaderných reaktorů. V budoucnu se může stát jedním z důležitých energetických zdrojů právě z dnešního pohledu problematický odpad, produkovaný současnými jadernými elektrárnami – vyhořelé jaderné palivo. Přestože štěpné produkty a minoritní aktinidy tvoří pouze velmi malou část vyhořelého jaderného paliva, musí být palivo pokládáno za vysoce radioaktivní materiál se všemi důsledky, které z toho plynou. Jednou z možností, jak se technicky vypořádat s tímto problémem je zásadní změna pohledu na vyhořelé jaderné palivo: Vyhořelé jaderné palivo nepovažovat nadále za odpad, ale za zdroj energie. To umožňují separační a transmutační procesy.

Transmutace je technologie, která zabezpečuje jaderné reakce minoritních aktinidů a štěpných produktů z vyhořelého jaderného paliva, přičemž odpadem budou pouze krátkodobé nebo stabilní izotopy, které nečiní technicky a bezpečnostně nezvládnutelné problémy z hlediska uskladnění. Současně dochází při transmutaci k uvolňování tepelné energie, kterou lze transformovat na elektrickou energii.

Problematikou možností transformace tepelné energie, odváděné z reaktoru-transmutatoru, na elektrickou energii se zabývá tato habilitační práce. Vznikla z důvodů potřeby detailnějších studií procesů vzájemného působení primární (jaderné) části transmutační technologie na sekundární (nebo terciární) nejaderný okruh z hlediska použití tepelných cyklů a tepelných strojů. Obvykle bývá poměrně detailně diskutována transmutační technologie pouze z hlediska jaderné fyziky a chemie, tedy zvláště primární části. Vlastní vyvedení výkonu z bloku bývá popsáno obecně nebo schématicky. Je totiž problémem klasické tepelné energetiky, ovšem s řadou podstatných zvláštností s ohledem na jadernou bezpečnost. Projektový návrh tepelného schématu elektrárny je podřízen definovaným vlastnostem teplotních látek, odvádějících tepelný výkon z jaderné technologie. Podmínky, za kterých se přenos tepla uskutečňuje, v některých případech spolu s požadavky jaderné bezpečnosti, výrazně ovlivňují a případně zcela limitují technologická schémata nejaderného okruhu a výběr vhodného tepelného stroje.

V práci jsou analyzovány možnosti návrhu tepelných schémat a vhodných tepelných strojů pro podmínky terciárních okruhů transmutačních zařízení včetně diskuse nosičů tepla, je provedena optimalizace parametrů funkčních celků a uvedeno technické řešení zařízení. Je kladen důraz na možnost použití prakticky ověřených tepelných strojů (jsou-li k dispozici) a jejich zapojení, zvláště z hlediska spolehlivosti provozu, jaderné bezpečnosti a přiměřenosti investičních nákladů. Závěrem jsou vždy uvedena doporučení vhodných oblastí použití jednotlivých terciárních okruhů včetně vyhodnocení dosahovaných tepelných účinností.

2. Možnosti nakládání s vyhořelým jaderným palivem

S vyhořelým jaderným palivem lze nakládat v podstatě třemi způsoby.

2.1 Otevřený palivový cyklus (*once through cycle*)

Vyhořelé jaderné palivo se nijak dále nezpracovává, považuje se za konečný odpad, který musí být uložen dlouhodobě v hlubinných úložištích. V tomto konečném odpadu se kromě jaderné suroviny (^{238}U) a štěpitelných materiálů (^{235}U , ^{239}Pu) také ukládají některé radionuklidy s dlouhými poločasy rozpadu (^{129}I , ^{107}Pd , ^{135}Cs , ^{99}Tc , ...), které byly vytvořeny jadernými reakcemi v jaderném reaktoru. V úložišti musí být tyto radionuklidy zabezpečeny vůči okolí spolehlivými několikasupňovými bariérami, řešenými na úrovni nejlepšího současného poznání a inženýrských přístupů na dobu cca 10^5 až 10^6 let. Takovéto řešení v reálných podmínkách však pro tak dlouhou dobu funkce nelze spolehlivě technicky prověřit. Řešení bude v každém případě vyžadovat vysoké náklady na výzkum, realizaci a spolehlivý a důvěryhodný bezpečný provoz hlubinného úložiště s takovými požadovanými vlastnostmi, které budou akceptovatelné pro veřejnost.

2.2 Přepracování vyhořelého jaderného paliva separačními metodami (*částečně uzavřený palivový cyklus*)

Vyhořelé jaderné palivo se považuje dále za zdroj energie a za zdroj některých izotopů, využitelných společností. Cyklus je charakterizován separací uranu a plutonia od ostatních produktů jaderných reakcí (sem patří např. aktinidy) a výrobou nového směsného paliva, označovaného MOX (mixed oxide Pu, U), do jaderných reaktorů. Odseparované produkty nejsou dále jaderně zpracovávány a musí být uloženy jako vysoce radioaktivní odpad. Přepracování v každém případě představuje velmi složitý, technologicky náročný proces. Srovnají-li se náklady na získávání čerstvého paliva z uranových rud a náklady na přepracování vyhořelého jaderného paliva v současné době, budou pravděpodobně shodné. Proti přepracování jaderného paliva pomocí nyní používaných vodně-chemických technologií mluví dále požadavek zamezení nekontrolovatelného šíření jaderných materiálů (např. plutonia), které se získávají při přepracování a které mohou být zneužity za určité situace pro výrobu jaderných zbraní. Proto je např. v USA přepracování jaderného vyhořelého paliva současnými komerčními technologiemi zákonem zakázáno.

2.3 Metalurgické metody (*nevodné*) separace a transmutační technologie

Z pohledu současných znalostí fyzikálních zákonitostí a také z pohledu společenské přijatelnosti je jediným rozumným způsobem nakládání s jaderným vyhořelým palivem využití metod bezvodé separace a transmutace se získáváním energie. Je to také způsob, jak minimalizovat problémy s dlouhodobými (tedy s dlouhým poločasem rozpadu) a vysoce aktivními radionuklidy, vytvořenými jadernými reakcemi v jaderném reaktoru a přitom současně získávat „čistou energii“. To vše při podstatně menších objemech a nižší úrovni aktivity zbylých radioaktivních odpadů než v obou předchozích případech. Některým problémům získávání elektrické energie z procesů transmutace vyhořelého jaderného paliva se věnuje předložená habilitační práce.

3. Koncepce transmutačního zařízení

Transmutační zařízení – reaktor pro transmutaci jaderného paliva – lze navrhnout buď jako tzv. kritický reaktor, nebo s externím zdrojem volných neutronů, obvykle lineárním urychlovačem tzv. podkritický reaktor. Technologie urychlovačem řízeného systému pro transmutaci vyhořelého jaderného paliva – Accelerator Driven Transmutation Technologies bývá označována jako ADTT.

Z hlediska technologií nutných k vyvedení tepelného výkonu z transmutačních zařízení (sekundární, popřípadě terciární okruh) není rozhodující, zda je reaktor-transmutor proveden jako kritický nebo podkritický systém. Urychlovač má ovšem značný vliv na vlastní spotřebu bloku, může výrazně snížit celkovou účinnost navrhovaného zařízení a ovlivnit výběr tepelného stroje. Proto bude v této práci dále sledována koncepce terciárního okruhu především pro transmutační zařízení na bázi ADTT.

Pro získávání elektrické energie z libovolného reaktoru pro transmutaci vyhořelého jaderného paliva je vždy zapotřebí tepelný motor zapojený v tepelném oběhu. Důvodem je nutnost transformace tepelné energie, získané štěpením a transmutací aktinidů a štěpných produktů v transmutoru (reaktoru), na mechanickou (elektrickou) energii dle 1. a 2. zákona termodynamiky. Transmutační zařízení typu ADTT bývá většinou navrženo jako tříokruhové. Primární okruh slouží pro odvod tepla, vzniklého fyzikálními procesy v reaktoru. Sekundární okruh (meziokruh, vložený okruh) je uvažován s ohledem na jadernou bezpečnost zařízení, fyzicky odděluje vysoce radioaktivní primární okruh a ostatní technologii. Terciární okruh slouží k vlastní transformaci tepelné energie na mechanickou práci pomocí tepelného stroje. Výběrem vhodného tepelného stroje a návrhem příslušného cyklu se zabývá předložená habilitační práce.

4. Primární okruh

Pro návrh energetického systému je nutné definovat základní omezení a kritéria, které mohou mít vliv na realizaci transmutační jednotky. Zejména stanovit nejdůležitější charakteristiky primárního okruhu transmutoru ve vztahu k sekundárnímu okruhu: tepelný výkon, teploty, tlak, rychlost proudění, složení palivové soli, odhad termofyzikálních charakteristik primárního okruhu, a v neposlední řadě jaderné charakteristiky: aktivita popř. radiační ovlivnění sekundárního okruhu.

Ve vztahu k těmto charakteristikám je možné se zabývat vhodnými energetickými cykly a nosiči tepla. V primárním okruhu existují různé typy aktivních zón transmutorů. Jednou z perspektivních variant systémů, které jsou schopny pracovat s plutoniem a minoritními aktinidy (MA) a v přijatelném časovém horizontu je transmutací eliminovat na méně aktivní a z časového hlediska krátkodobé štěpné produkty, jsou transmutory s aktivní zónou s tekutým palivem. V tekuté palivové soli je daný aktinid popř. rizikový a dlouhodobý štěpný produkt rozpuštěn. Nejvýhodnější palivovou solí je vzhledem ke svým fyzikálním a chemickým vlastnostem podle současných poznatků palivová sůl na bázi roztavených fluoridů.

Pro získání vstupních údajů, sloužících k návrhu koncepce terciárního okruhu, byl zvolen primární okruh s podkritickým reaktorem-transmutorem koncepce ADTT s tekutým palivem na bázi fluoridové palivové soli.

5. Sekundární okruh

Sekundární okruh transmutoru (SOT) je soubor zařízení, v němž se uskutečňuje pomocí mezivýměníku přenos tepla z palivové fluoridové soli v primárním okruhu transmutoru (POT) do nosiče tepla v SOT. Tento okruh je nutný také z hlediska jaderné bezpečnosti, protože na primární straně neexistují dvě bezpečnostní bariéry známé a používané u reaktorů PWR a BWR: matrice paliva v pevné fázi a pokrytí paliva obalem. Tyto dvě bezpečnostní bariéry a navíc i bezpečnostní bariéru tvořenou hranicí primárního okruhu musí v případě transmutoru s roztavenou palivovou solí plnit mezivýměník tepla. Z toho plyne požadavek, aby tlak teplonosné látky v SOT byl za všech provozních režimů vyšší, než tlak palivové fluoridové soli v POT.

S ohledem na jadernou bezpečnost a dostatečný odvod tepla je proto nutné zvolit pro sekundární okruh transmutoru (SOT) vhodné médium. Nejenom, že SOT tvoří další bariéru mezi vysoce radioaktivním primárním (POT) a terciálním okruhem, ale kryje POT proti vniknutí tlakové vody popř. páry nebo použitého plynu z terciárního okruhu. To by mohlo nejen způsobit oxidaci a precipitaci Pu a MA, ale i porušit POT z důvodu vysokého tlaku vody (páry) a tím podstatně narušit jadernou bezpečnost celé technologie.

Z předchozích požadavků vyplývá, že v případě primárního okruhu s cirkulujícím palivem na bázi roztavené fluoridové soli s rozpuštěnými fluoridy paliva mohou být vhodným řešením teplonosné látky v sekundárním okruhu například:

Nosič tepla v sekundárním okruhu – eutektická slitina Bi+Pb, (Pb+Sn)

- Vysoké nároky na konstrukci mezivýměníku spojené s protichůdnými materiálovými požadavky palivové fluoridové soli a tekuté slitiny Bi+Pb.
- Relativně nižší energetická náročnost sekundárního okruhu – nižší teplota tavení slitiny Bi+Pb oproti fluoridovým solím.
- Experimentální provozní zkušenosti (reaktor pro ponorky).
- Vyšší nároky na konstrukci čerpadel
- Nedostatek Bi ve světě – drahý nosič tepla – současná cena 12 000Kč/kg. Možnost záměny za podstatně rozšířenější a levnější Sn.
- Neprůhlednost média oproti plynům a nesnadné monitorování nitra transmutoru (platí obecně nejen pro všechny kovy, ale i pro soli).

Nosič tepla v sekundárním okruhu – fluoridová sůl NaF + NaBF₄, (KHF₂)

- Projekční náročnost zařízení terciárního okruhu (volba nadkritických parametrů na vstupu do parního generátoru).
- Zkušenosti z MSRE v ORNL v letech 1964–69
- Předpoklad nebouřlivé reakce při kontaktu sekundární strany s palivovou fluoridovou solí. Větší riziko je spojené hlavně s přítomností nečistot.
- Relativně lepší termodynamické vlastnosti než kovy.
- Nebezpečí rozpadu tetrafluoroboritanu sodného při odtlakování systému.

6. Terciární okruh

Uvažované transmutační zařízení pro využití vyhořelého jaderného paliva s výrobou elektrické energie technologií ADTT předpokládá podle kapitoly č. 3. tříokruhové uspořádání. Nosič tepla v sekundárním okruhu (SOT) významně ovlivňuje typ, provedení, účinnost a investiční náročnost terciárního okruhu. Výběrem vhodné látky pro SOT se zabývala předchozí kapitola č. 5.

Z řady důvodů přicházejí v současnosti v SOT pro praktické využití jako teplotonosné látky pouze buď roztavené fluoridové soli různého složení a různých fyzikálních vlastností, nebo tekuté kovy s nízkou teplotou tavení zvláště Pb nebo eutektické slitiny Pb-Bi, případně Pb-Sn. Z těchto omezujících předpokladů vychází návrh tepelného cyklu terciárního okruhu transmutatoru (TOT).

Obecně lze použít jako TOT všechny známé oběhy tepelných strojů sloužící pro transformaci tepelné energie na mechanickou práci (elektrickou energii). Podmínky 1. a 2. zákona termodynamiky jsou splněny při použití výměníku mezi SOT a TOT (zdroj tepla) a výměníku pro odvod tepla ze soustavy (obvykle teplota okolí). Vzhledem ke způsobu přenosu tepla ze SOT do TOT pomocí povrchového výměníku je možno z dalších úvah vyloučit oběhy tepelných strojů s vnitřním spalováním, tj. Dieselův a Ottův cyklus.

Velmi vhodné jsou naopak oběhy tepelných strojů s parní nebo plynovou turbinou, tj. Rankine-Clausiiův s úplnou kondenzací páry a Braytonův cyklus s nepřímým přívodem tepla, tj. s výměníkem místo spalovací komory. Oběhy jsou pro navrhovaná zařízení TOT dostupné a vzhledem k uvažovaným výkonovým hladinám (minimálně desítky MW_e) jaderné elektrárny s transmutací vyhořelého jaderného paliva prakticky použitelné. Kromě toho jsou oběhy včetně tepelných motorů (parních a plynových turbin) v energetice a to i jaderné prakticky realizované, odzkoušené v tisících instalacích desítkami roků provozu při nejrůznějších parametrech zařízení a technicky zvládnuté s vysokou mírou spolehlivosti. Navíc funkčně spolehlivý a provozně odzkoušený TOT nutně zvyšuje spolehlivost celého technologického celku ADTT a to i s ohledem na požadavky jaderné bezpečnosti.

Jediným, zcela nově vyvíjeným důležitým aparátem pro TOT, je výměník tepla nebo parní generátor mezi SOT/TOT. Tento výměník není v současnosti komerčně dostupný, pro jeho konstrukci bude nutný speciální a nákladný výzkum nejen z hlediska řešení prostupu tepla a výběru vhodných konstrukčních materiálů, ale zvláště z hlediska jeho spolehlivosti a jaderné bezpečnosti. Pro návrh všech variant TOT byl výměník sledován pouze z pohledu přenosu tepla mezi okruhy, detailnější studium problematiky parního generátoru/výměníku přesahuje zaměření této práce.

Vliv vlastností nosiče tepla v sekundárním okruhu na TOT

Koncepci návrhu jednotlivých zařízení, použitých v TOT, ovlivňují některé fyzikální vlastnosti nosiče tepla proudícího v sekundárním okruhu specifikované v kapitole č. 5. Rozhodující pro návrh TOT jsou zvláště:

- teplota tavení – tuhnutí (zamrzání nosiče tepla): t_T
- teplota fázové přeměny: t_F
- minimální teplota pracovního média terciárního okruhu na vstupu do výměníku: t_{MIN}

Jako pracovní médium v TOT byla uvažována ve shodě s kapitolou č. 6 vodní pára nebo plyn (vzduch). Protože ve výměníku mezi sekundárním a terciárním okruhem (SOT/TOT) dochází k přestupu tepla z roztavené fluoridové soli nebo tekutého kovu (slitiny) do vody (vodní páry), případně vzduchu, musí platit:

- a) Podmínka $t_{MIN} > t_T$ – ve všech provozních stavech. Jinak dojde k „zamrznání“ nosiče tepla SOT ve výměníku s fatálními důsledky pro transport tepla z primárního okruhu. Problém bylo nutno vždy posuzovat i z hlediska jaderné bezpečnosti. V praxi bylo nutno připočítat určitou rezervu $+ \Delta t$. Vzhledem k tepelným ztrátám výměníku a nevýpočtovým provozním stavům lze uvažovat: $+ \Delta t = \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$, potom pro vybraná média je t_{MIN} .

nosič tepla SOT	t_T [$^\circ\text{C}$]	t_{MIN} [$^\circ\text{C}$]
Pb-Bi – eutektická	125	165
Pb-Sn – eutektická	190	230
Pb	327	370
NaF-NaBF ₄	384	424
KHF ₂	220	260

- b) Maximální pracovní teplota v sekundárním okruhu $t_{MAX} \ll t_F$. Tehdy bude zaručena stabilita fyzikálních a transportních vlastností a chemická stabilita nosiče tepla obecně.
- c) Z hlediska jaderné bezpečnosti jsou na nosič tepla v sekundárním okruhu kladeny zejména tyto požadavky:
- nízká exotermická reakce s kyslíkem nebo vzduchem při případné netěsnosti do atmosféry.
 - malá nebo žádná chemická reakce s vodou nebo vodní parou při případné netěsnosti v parním generátoru.

Nejvyšší teplota pracovní látky v TOT (přehřáté páry nebo stlačeného vzduchu) není omezena podmínkou ad b), ale použitými konstrukčními materiály ve výměníku, potrubí a vstupní části parní nebo plynové turbíny.

Byly analyzovány tyto tepelné oběhy, vyhovující výše uvedeným okrajovým podmínkám:

7. Oběh parní kondenzační elektrárny jako TOT

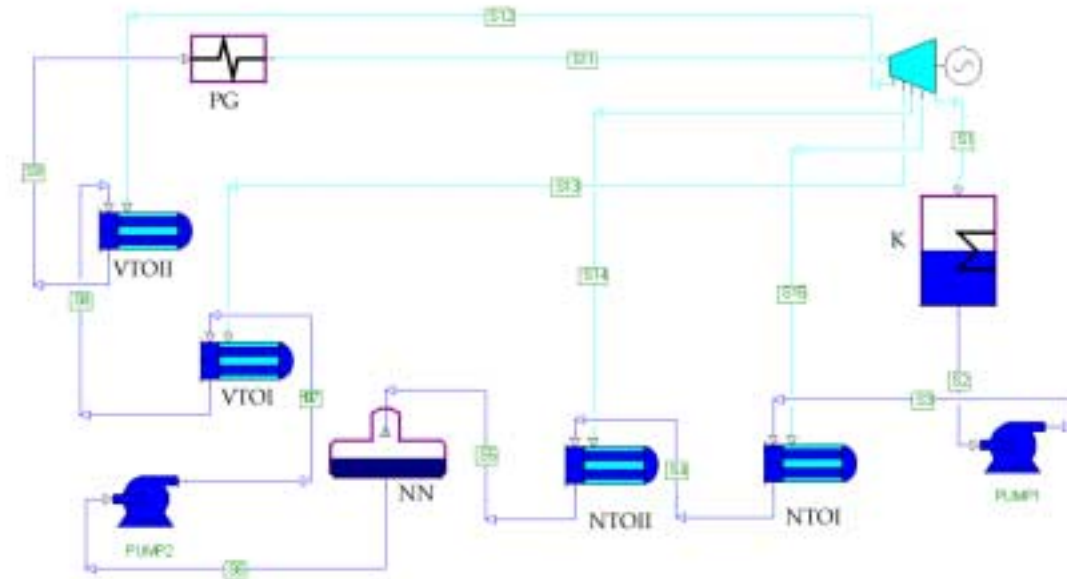
Tepelný oběh byl proveden jako Rankine-Clausiusův cyklus (R-C) s úplnou kondenzací páry. Použitou pracovní látkou je voda – vodní pára. Vzhledem k dodržení podmínky $t_{MIN} > t_T$ bylo nutno pro některé nosiče tepla v SOT uvažovat s nadkritickou teplotou napájecí vody (t_{NV}) na vstupu do parního generátoru (výměníku SOT/TOT), protože $t_{krit} = 374 \text{ }^\circ\text{C}$. Tím bylo dáno rozdělení tepelných schémat parní kondenzační elektrárny na dvě projektově odlišné skupiny:

- tepelné schéma s podkritickou teplotou napájecí vody. Platí pro Pb-Bi, Pb-Sn a KHF₂ v SOT.
- tepelné schéma s nadkritickou teplotou napájecí vody. Platí pro Pb a NaF-NaBF₄ v SOT.

V obou případech byla projektově navržena odpovídající tepelná schémata a specifikovány jednotlivé aparáty včetně optimalizace jejich parametrů. Z hlediska výkonu bloku byly navrženy vždy dvě velikosti – demonstrační jednotka o výkonu desítek MW a komerční energetický blok o výkonu stovek MW. Celkem bylo navrženo a propočítáno 6 tepelných schémat. Výstupy řešení byly uvedeny v habilitační práci.

Pro ilustraci výsledků bylo vybráno tepelné schéma pro jednu z navrhovaných variant řešení:

DEMO jednotka s podkritickou teplotou napájecí vody



Obr. 1: Tepelné schéma DEMO bloku – svorkový výkon turbíny 20 MW

Pro DEMO blok dle obr. 1 bylo podrobně navrženo tepelné schéma pro tyto parametry:
vstupní pára: $p_o/t_o = 10 \text{ MPa}/540 \text{ }^\circ\text{C}$

svorkový výkon turbíny: $P_{SV} = 20 \text{ MW}$

teplota napájecí vody: $t_{NV} = 230 \text{ }^\circ\text{C}$

tlak v kondenzátoru: $p_K = 4 \text{ kPa}$

vnitřní termodynamická

účinnost turbíny: $\eta_{TDI} = 0,86$

teplota odplynění: $t_{NN} = 130 \text{ }^\circ\text{C}$

Aparát	Voda		Pára			Voda		Pára	
	vstup t [°C]	výstup t [°C]	vstup t [°C]	výstup t [°C]	M [kg/s]	vstup i [kJ/kg]	výstup i [kJ/kg]	vstup i [kJ/kg]	výstup i [kJ/kg]
PG	230	–	–	540	19,74	992	–	–	3 475
VTO II	180	230	410	244	1,58	768	992	2 802	1 058
VTO I	130	180	290	191	1,77	554	768	2 785	814
NN	120	130	145	130	0,06	503	546	2 720	546
NTO II	75	120	145	130	1,32	312	503	2 720	546
NTO I	29	75	92	90	1,38	125	312	2 283	377
K	–	29	30	–	13,8	–	121	2 224	–

Celková tepelná účinnost navrženého TOT DEMO – bloku o výkonu 20 MW včetně vlastní spotřeby terciárního okruhu: $\eta_{TC} = 38,4 \%$.

Vyhodnocení:

ad a) Tepelné schéma s podkritickou teplotou napájecí vody

TOT provedený jako R-C cyklus s přehřátou vodní parou je ve všech uvažovaných případech velmi dobře realizovatelný, jeho celková tepelná účinnost dosahuje přijatelné hodnoty. Při návrhu tepelného schématu je nutno respektovat zvláště tyto podmínky:

- Minimální tlak páry na vstupu do turbíny $p_{o \min}$ je dán teplotou napájecí vody t_{NV} do PG – této teplotě odpovídá tlak syté kapaliny, zvýšený o tlakové ztráty výměníku.

Ve všech případech navržených tepelných schémat byl použit tlak ostré páry p_o výrazně vyšší než $p_{o \min}$ s ohledem na podmínku přijatelné tepelné účinnosti. Lze volit tlak podkritický nebo nadkritický.

- Teplota přehřáté páry na vstupu do turbíny je vázaný parametr vzhledem k dosažení přijatelné vlhkosti páry na konci expanze v turbíně. Na rozdíl od ad b) umožňují nosiče tepla v SOT nízké stavy páry na vstupu do turbíny v TOT. Této skutečnosti lze využít zvláště tam, kde účinnost výroby elektrické energie nebude rozhodující: výzkumné a demonstrační projekty.
- Přihřívání páry není nezbytně nutné (vzhledem k možnosti použití nízkého tlaku páry) pro dosažení přijatelné vlhkosti na konci expanze páry v turbíně. Pokud bude přihřívání použito pro zvýšení tepelné účinnosti oběhu, lze optimalizovat velikost přihřívacího tlaku stejně jako u fosilních bloků pracujících s vysokými stavy páry na vstupu do turbíny. Dvojí přihřívání páry není opodstatněné a zvyšuje složitost tepelného schématu TOT.
- Dosažení potřebné teploty napájecí vody t_{NV} je z hlediska výše uvedených požadavků a optimalizace tepelné účinnosti bloku možné vždy pouze s použitím regeneračních ohříváků vyhříváných parou z neregulovaných odběrů turbíny. Teplota napájecí vody přitom přímo ovlivňuje teplotu sytosti a tím i tlak páry v posledním VT regeneračním ohříváku. Při návrhu tepelného schématu bylo nutno kontrolovat, zda konstrukce turbíny reálně umožní provést neregulovaný odběr páry o tomto tlaku, tj. zda odpovídá rozdělení tepelných spádů při expanzi na regulační stupeň a stupňovou část turbíny. Není ovšem potřeba dohřívání napájecí vody ostrou parou se všemi negativními důsledky jako v ad b).
- Průtok páry na výstupu z parního generátoru je stejný jako průtok na vstupu do turbíny. Totéž se týká průtoku páry při použití přihřívání v parním generátoru. Není ale potřeba provádět odběr páry před turbínou pro poslední ohřívák napájecí vody.

Zásadním výsledkem bylo potvrzení možnosti sestavit celý terciární okruh ze standardních a provozně vyzkoušených zařízení (mimo PG). Potřebné hodnoty tlaků a teplot vody a vodní páry ve terciárním okruhu jsou obdobné jako u běžně provozovaných tepelně energetických zařízení na fosilní paliva. Stejně jako u klasických bloků se tyto hodnoty mohou pohybovat v širokém rozmezí podle účelu zařízení a požadavků provozovatele.

Možnost využít jednotlivých unifikovaných zařízení – parní turbína, kondenzace, napájecí nádrž s odplyněním, nízko a vysokotlaká regenerace, regulace a automatizace bloku – poskytuje významnou výhodu snížení investičních nákladů na budovanou jednotku pro transmutaci vyhořelého jaderného paliva. Kromě toho provozně odzkoušená dílčí zařízení zvyšují spolehlivost provozu a jadernou bezpečnost terciárního okruhu a tím i celého jinak technologicky velmi náročného a i v budoucnosti stále ještě experimentálního technologického celku.

ad b) Tepelné schéma s nadkritickou teplotou napájecí vody

Z provedené analýzy R-C cyklu pro TOT vyplývá: Použití nosiče tepla s vysokou teplotou tavení v SOT, kdy je nutná nadkritická teplota napájecí vody na vstupu do parního generátoru je možné, ale velmi podstatně komplikuje technologické schéma. Nelze použít pouze soustavu regeneračních ohříváků napájecí vody vytápěných z odběrů turbíny. Pro nadkritickou teplotu vody na vstupu do parního generátoru je vždy nutný dohřívák napájecí vody (DNV) vytápěný ostrou parou z parního generátoru. To podstatně zvyšuje průtok parním generátorem. Za určitých předpokladů je možno navrhnout jednodušší technologické schéma zapojení parní turbíny s redukcí tlaku páry.

Při použití nosiče tepla s vysokou teplotou tavení je nezbytné respektovat tyto okolnosti:

- Teplota napájecí vody musí být větší než kritická teplota a proto vstupní tlak páry do turbíny musí být nadkritický.
- Nadkritický tlak na vstupu do turbíny vyžaduje vzhledem k koncové vlhkosti páry co nejvyšší teplotu vstupní páry – pokud možno alespoň 600 °C.
- Při takové vstupní teplotě lze vystačit s jedním přehříváním při tlaku $p_1 \approx 8$ MPa. Při tomto přehřívacím tlaku lze ještě dosáhnout přijatelné vlhkosti páry na konci expanze v turbíně.
- Při nižší teplotě vstupní páry je třeba použít dvojí, případně trojí přehřívání. Poslední případ však již znamená značné zvýšení složitosti terciálního okruhu a částečně i sekundárního okruhu (PG).
- Parní generátor s přehříváním páry je technicky náročný.
- Existuje možnost použít parní turbínu pro podkritické parametry páry a bez přehřívání i při splnění podmínky nadkritické teploty napájecí vody.

Provozní podmínky v TOT, vyvolané spolehlivým vyloučením zamrznání nosiče tepla v sekundárním okruhu, vedou k volbě teploty vstupní páry $t_0 \geq 600$ °C. Tlak odpovídající vyšší vstupní teploty je reálný. Parametry oběhu odpovídají moderním blokům na fosilní paliva i z hlediska tepelné účinnosti terciálního okruhu.

8. Oběh plynové turbíny jako TOT

Použití tepelného oběhu s plynovou turbínou s přívodem tepla za konstantního tlaku (Braytonův cyklus) pro využití tepelné energie ze SOT a její následnou transformaci na elektrickou energii bylo uvažováno ve dvou základních variantách:

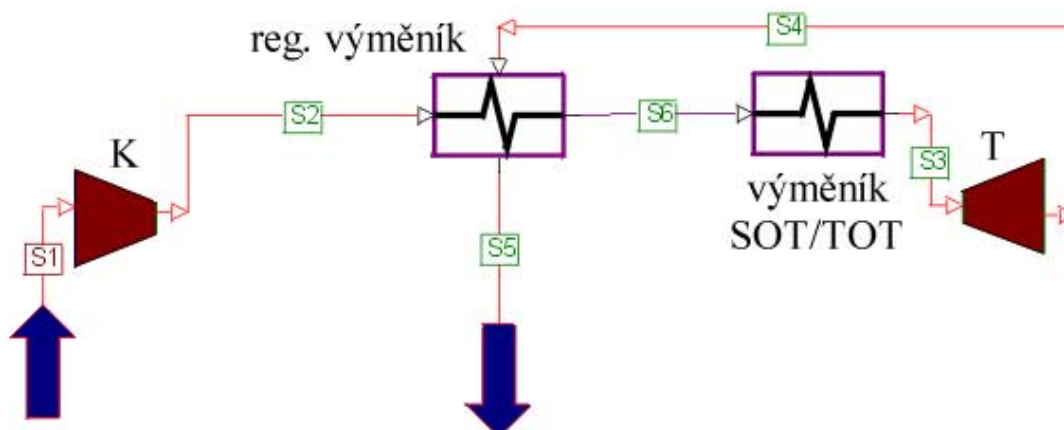
- a) Plynová turbína s otevřeným pracovním oběhem – pracovní médium vzduch.
- b) Plynová turbína s uzavřeným oběhem – pracovní médium vzduch nebo technické plyny.

Velikost výkonu plynové turbíny byla z konstrukčních důvodů omezena rozměry průtočné části axiálního turbokompresoru. Pohybovala se v desítkách až stovkách MW pro jednotlivá tepelná schémata.

Vzhledem k dodržení podmínky $t_{\text{MIN}} > t_{\text{T}}$ bylo nutno pro některé nosiče tepla v SOT použít regeneraci tepla před výměníkem SOT/TOT. Regenerace tepla současně přispívá k zvýšení tepelné účinnosti cyklu. Pro navrhované uzavřené oběhy byla regenerace tepla uvažována vždy. Celkem bylo navrženo a propočítáno 10 tepelných schémat v různých konfiguracích. Výstupy řešení byly uvedeny v habilitační práci.

Opět bylo pro ilustraci výsledků vybráno tepelné schéma pro jednu z navrhovaných variant řešení:

Otevřený oběh plynové turbíny s regenerací tepla



Obr. 2: Tepelné schéma plynové turbíny v TOT – otevřený oběh s regenerací tepla

Tepelný oběh plynové turbíny s regenerací tepla byl navržen pro parametry:

vstup do kompresoru:	vzduch – ISO (15 °C, 0,1013 MPa)
termodynamická účinnost kompresoru:	$\eta_i^K = 0,88$
termodynamická účinnost turbíny:	$\eta_i^T = 0,90$
teplota vzduchu před turbínou:	$t_3 = 600 \text{ °C}$
stupeň regenerace tepla:	$\eta_{\text{reg}} = 0,85$
hmotnostní průtok vzduchu:	$m_{\text{vz}} = 750 \text{ kg/s}$, $V_1 = 612,1 \text{ m}^3/\text{s}$

Výsledky jsou v závislosti na poměrném stlačení v kompresoru π uvedeny v tabulce:

$\pi(-)$	$\eta_{ti}(-)$	$t_5 \text{ (°C)}$	$t_6 \text{ (°C)}$	$P_{SV} \text{ (MW)}$
1	0	–	–	0
1,25	0,21452	113,82	474,41	20,7
1,5	0,29557	124,07	445,40	35,1
1,75	0,33358	133,62	422,24	45,6
2	0,35273	142,55	403,17	53,4
2,5	0,36593	158,92	373,26	63,8
3	0,36456	173,65	350,57	69,9
4	0,34679	199,48	317,81	75,2
5	0,32280	221,81	294,84	75,7

kde: η_{ti} – vnitřní termická účinnost oběhu
 t_5 – teplota vzduchu na výstupu z oběhu do atmosféry
 t_6 – teplota vzduchu před výměníkem SOT/TOT
 P_{SV} – výkon turbíny na svorkách generátoru

Pozn: teplota t_6 odpovídá t_{MIN} a je vázána podmínkou $t_{\text{MIN}} > t_T$ podle kapitoly č. 6.

Vyhodnocení

ad a) Plynová turbina s otevřeným pracovním oběhem

- Otevřený oběh plynové turbiny pro některé nosiče tepla v SOT a stlačení v kompresoru vůbec nepotřebuje regenerační výměník pro ohřev vzduchu před vstupem do výměníku mezi SOT a TOT. Postačuje ohřev vzniklý stlačením vzduchu v kompresoru. Výhodou je značné zjednodušení technologického schématu.
- Pro některé nosiče tepla v SOT s vyšší teplotou tavení (zamrzání) je nutno pro dodržení podmínky $t_{\text{MIN}} > t_{\text{T}}$ instalovat regenerační výměník za kompresorem.
- Použití regenerace tepla snižuje optimální stlačení v kompresoru pro dosažení maxima tepelné účinnosti.
- Celková tepelná účinnost TOT bez regenerace je poměrně nízká, což je dáno hlavně omezením teploty T_3 . Pro vysoké stupně regenerace (0,9) tepelná účinnost výrazně vzrůstá, až na hodnoty cca 45%.
- Jedná se o technologicky nejjednodušší tepelné schéma TOT, které je v praxi použitelné. Neobsahuje vodní hospodářství, kondenzaci, regenerační ohříváky a další aparáty potřebné pro provoz zařízení parního oběhu. Takto uspořádaný TOT lze doporučit jako nejvhodnější zařízení pro demonstrační jednotku jaderné elektrárny typu ADTT v rozsahu elektrických výkonů v řádu desítek MW.
- Výhodou otevřeného oběhu je jednak poměrně nízká teplota před kompresorem T_1 (dáno teplotou okolí), která společně s teplotou před turbinou T_3 určuje nejdůležitější návrhový parametr – poměr nejvyšší a nejnižší teploty v pracovním cyklu $\tau = \frac{T_3}{T_1}$,
jednak úsek odvádění tepla z cyklu je realizován rovněž okolní atmosférou a odpadá tudíž další výměník (investiční náklady a tlaková ztráta).
- Výhodou otevřeného oběhu je značná podobnost pracovních podmínek kompresoru a turbiny podmínkám u běžných plynových turbin s přiváděním tepla ve spalovací komoře. Poznatky z dlouholetého a finančně náročného vývoje plynových turbin na fosilní paliva lze využít při konstrukci dílčích celků (kompresor, turbina) pro tepelný motor TOT.
- Nevýhodou jsou velké dispoziční rozměry výměníku SOT/TOT a nutnost jeho komplexního vývoje. Aparát není komerčně dostupný.

ad b) Plynová turbina s uzavřeným oběhem – se vzduchem nebo CO₂

- Použití pro TOT jaderné elektrárny je reálné. Dosažitelné účinnosti jsou přijatelné a rovněž jednotkové výkony jsou s dnešní úrovní znalostí, nebo v nejbližší době dosažitelnou úrovní znalostí a techniky, dostatečné.
- Nejvhodnější pracovní látkou je vzduch, protože při daných úrovních teplot nevyvolává žádné vážnější problémy z hlediska použitých materiálů, jeho vlastnosti jsou ve všech potřebných směrech velmi dobře známé a nevyžaduje žádná náročnější opatření z hlediska těsnění.
- Další zvýšení jednotkového výkonu v porovnání se vzduchem lze dosáhnout použitím CO₂ nebo jiných technických plynů (měrná hmotnost, c_p , κ atp.).
- Přijatelné účinnosti jsou dosažitelné pouze pro poměrně vysoký stupeň regenerace tepla.
- Nevýhodou uzavřeného oběhu je další výměník pro odvádění tepla nevyužitého v regeneraci, do okolí. Výměník je konstrukčně nenáročný. Naopak podstatnou výhodou je další návrhová dimenze: zvýšením tlaku lze zvětšovat jednotkový výkon a snižovat rozměry všech zařízení (turbosoustrojí i výměníků).

9. Závěr

Cílem práce bylo stanovení nejvhodnějších typů a parametrů tepelných oběhů jaderných elektráren pro transmutační zpracování vyhořelého jaderného paliva. Bylo nutno komplexně posoudit oběhy z hlediska vzájemného působení pracovní látky v okruhu tepelného stroje a teplotnosné látky pro transport tepla z jaderné části elektrárny, popřípadě z vloženého meziokruhu (SOT). Proto byla část práce věnována i vlastnostem a výběru vhodného nosiče tepla v sekundárním okruhu. Výběr vlastního tepelného schématu a tepelného stroje byl analyzován z hlediska dosažené tepelné účinnosti, elektrického výkonu, technologické náročnosti zařízení, spolehlivosti provozu a přijatelnosti měrných investičních nákladů na TOT.

Celá práce, tedy výběr strojů, oběhů a pracovních látek, byla od samého počátku zaměřena na konkrétní ověřená a technicky realizovatelná řešení. Teoreticky jsou známy různé typy tepelných motorů s externím přívodem tepla (Stirling), nebo jejich různé kombinace (PPC), ale pro technické řešení TOT ve výkonovém rozsahu minimálně desítky MW je jedinou možností použití parní nebo plynové turbíny samostatně. Stejně tak i použití teoreticky výhodných a zdůvodnitelných pracovních látek v oběhu tepelného stroje (Hg, NH₃, Kalinův cyklus, He) je vyloučeno z provozně-bezpečnostních nebo ekonomických hledisek. Energetika, zvláště jaderná, byla a stále je velmi konzervativní obor, ve kterém technická řešení podléhají postupnému vývoji a kdy spolehlivost a bezpečnost je vždy „až na prvním místě“. Z těchto kořenů vyrůstala filosofie řešení celé habilitační práce.

Práce byla zaměřena především na TOT s technologií ADTT. Vzhledem k neustálému vývoji urychlovačů (lineárních i cyklotronů) roste jejich účinnost a je obtížné stanovit konkrétní příkon pro danou velikost reaktorem produkovaného tepelného výkonu. Proto není velikost vlastní spotřeby primárního okruhu zahrnuta do celkové účinnosti TOT. Dalším důvodem je možnost použití navrhovaných TOT také pro technologie s kritickým reaktorem-transmutorem, kdy lze očekávat vlastní spotřebu primárního okruhu výrazně nižší. V tomto případě též odpadají problémy se zajištěním funkční dlouhodobé provozní spolehlivosti urychlovače s dopady na řešení TOT.

Projektově byla tepelná schémata dopracována pro konkrétní, optimalizované parametry jednotlivých aparátů a byly specifikovány požadavky na tepelné turbíny. Byl kladen důraz na výběr parních turbin podle typových řad komerčně dostupných strojů (pokud existují) včetně jejich parametrů páry. Vzhledem k faktu, že sériově vyráběné plynové turbíny nelze pro TOT přímo použít, byly specifikovány alespoň dílčí uzly (axiální kompresor, části turbíny) podle dostupných strojů.

Návrh PG nebo výměníku SOT/TOT přesahuje rozsah práce, byly pouze vytipovány problémové oblasti z pohledu přenosu tepla mezi okruhy. Optimalizační výpočty oběhů byly provedeny pomocí programu GATE-CYCLE. Dosahovaná tepelná účinnost je úměrná složitosti navrženého tepelného schématu – to platí pro parní i plynové turbíny.

Po zkušenostech s návrhy elektráren na fosilní paliva je možno prokázat, že oběhy s plynovou turbínou mají přibližně poloviční měrné investiční náklady, než oběhy s parní turbínou. Nejsou zahrnuty náklady na PG nebo výměník SOT/TOT, který v této práci nebyl analyzován. Mohou sice výrazně ovlivnit celkové investiční náklady na oba druhy tepelných okruhů, ale pro nedostatek ověřených podkladů nebyly uváděny.

10. Seznam použité literatury

- [1] Borišanskij, V., A.: Židkometaličeskije teplonositeli., Atomizdat, Moskva 1976
- [2] Bowman, C., D.: Accelerator-Driven Systems for Nuclear Waste Transmutation, Annual Rew. – Nuclear Part 1998
- [3] Fiedler, J.: The Transmutor Tertiary Circuit with Steam and Gas Turbine and Safety Issues. 4th International symposium on safety and reliability systems of PWRs., Brno 2001
- [4] Fiedler, J.: Studie terciárního okruhu transmutoru s plynovou turbinou. Zpráva VUT-EU-QR-37-99
- [5] Hron, M., Mikisek, M., Marek, T.: Jaderné spalování jaderného odpadu Energetika č. 11/2000 str.373–375
- [6] Kadrnožka, J.: Tepelné elektrárny a teplárny. SNTL Praha, 1984
- [7] Kadrnožka, J.: Analýza terciárního okruhu JE typu ADTT. Zpráva VUT-EU-QR-14-00.
- [8] Kadrnožka, J.: Analýza možností použití plynových turbin s regenerací tepla v terciárním okruhu JE typu ADTT. Zpráva VUT-EU-QR-52-00
- [9] Kousal, M.: Spalovací turbíny. SNTL Praha 1980
- [10] Majer, V.: Základy jaderné chemie, SNTL Praha 1961
- [11] Matal, O., Fiedler, J.: Transmutor thermal to electric conversion efficiency. Zpráva pro ADNA Corp. Los Alamos, USA
- [12] Matal, O., Fiedler, J.: Transmutor Demo Unit and Heat into Electrical Energy Transmutation Problems. 3rd International Conference on ADTT Technology and Applications, Praha 1999
- [13] Matal, O.: Zařízení pro výrobu páry v transmutoru: ČS patent č.287303 (dat. přihl. 13.11.98)
- [14] Matal, O.: Použití slitiny Pb-Sn pro sekundární okruhy transmutoru, patent. přihláška podána leden 2000.
- [15] Matal, O., Dubšek, F., Hralecký, P.: Steam generator heated by molten salt for a transmutor system. Presented at 4th International symposium INOVACE 97, Dec. 3,1997
- [16] Nejedlý, M.: Problematika teplonositelů v ADS Zpráva VUT-EU-QR-51-00
- [17] Nejedlý, M.: Charakteristika možností likvidace jaderného odpadu transmutací. Zpráva VUT-EU-QR-06-00
- [18] Novikov, V., M.: Židkosolevyje JEU. Energoatomizdat Moskva 1990
- [19] Prusakov, V.: Concept of the Demonstration Molten Salt Unit for the Transuranium Element Transmutations, 3rd International Conference on ADTT Technology and Applications, Praha 1999
- [20] Retzlaff-Ruegger: Steam Turbines for Advanced Ultrasupercritical Power Plants in Europe (GE). Conference POWER – GEN, BUDAPEST 1996
- [21] Roční zpráva 1999 – Jaderná elektrárna Dukovany.
- [22] Skaerbaekvaerket 412 MW Plant in Denmark – firemní literatura GEC – ALSTHOM – 1998
- [23] Valenta, V.: Skoda JS Study on Project Preparation of Basic and Demonstration ATW System Unit. 3rd International Conference on ADTT Technology and Applications, Praha 1999

11. Abstract

Constant pressure on increase of the primary energy sources consumption leads despite all energy saving efforts of the society to progressive deplete of all not renewable sources. Ahead of technical public arises a question of looking for new energy sources or new technologies for utilisation of known raw materials.

In the global criterion represents nuclear engineering an important power producing technology. At present operate in the world more than 400 civil energetic nuclear reactors. In the future might become from today 's point of view a very problematic waste, produced in present power stations, one of important energy sources – spent nuclear fuel. Although fission products and minority actinides form only a small part of spent nuclear fuel, nuclear fuel must be seen as highly radioactive material with all consequences. One of possibilities how to technically handle this problem is a principle change of view at the spent nuclear fuel: the spent nuclear fuel shouldn't be treated any longer as waste, but as source of energy. Thanks to separation and transmutation processes that make it possible.

Transmutation is a technology, that insures nuclear reactions of minority actinides and fission products from the spent nuclear fuel, whereat waste will be only short term or stable isotopes, that don't cause technically and safety not manageable problems from the viewpoint of storage. At the same time comes by transmutation to thermal energy release, which can be transformed into electrical power.

This work examines the possibility of transformation thermal energy, lead away from the reactor of the transmutor into electrical power. This work has arisen out of necessity of more detailed studies of interaction processes between primary (nuclear) part of transmutation technology and secondary (or tertiary) non-nuclear circuit from the viewpoint of use of thermal cycles and thermal engines. Transmutation technology has been usually quite detailed discussed only from the viewpoint of nuclear physics and chemistry, also mainly primary parts. Power outlet from the power unit has been described generally or schematically. It is namely problem of classic power engineering, naturally with a range of significant distinctions in relation to nuclear safety. Project plan of power unit thermal diagram is subject to defined characteristics of heat carriers, carrying thermal power out of the nuclear technology. Conditions, in which heat transfer takes place, in some cases together with requirements of nuclear safety, distinctively influence and optionally completely limit technological schemes of non-nuclear circuit and choice of the suitable thermal engine.

In the work have been analysed possibilities of thermal schematic diagram power plant projects and the suitable thermal engines for conditions of tertiary circuits of transmutation equipment inclusive discussion about heat carriers. Optimalization of parameters of functional complexes has been realised, introduced technical solution of the equipment. Emphasis has been laid on the possibility of use in praxis tested thermal engines (if available) and their connections, mainly from the viewpoint of reliability of running, nuclear safety and adequacy of investment costs. In the conclusion you can find recommendations of suitable areas for use of individual tertiary circuits inclusive evaluation of achieved thermal efficiencies.