

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

TERMODYNAMIKA PARNÍHO CYKLU JADERNÝCH ELEKTRÁREN

THERMODYNAMICS OF THE STEAM CYCLE OF NUCLEAR POWER PLANTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ KOZÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF ŠTĚTINA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Kozák

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Termodynamika parního cyklu jaderných elektráren

v anglickém jazyce:

Thermodynamics of the steam cycle of nuclear power plants

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor ideálních parních oběhů. Rankinův cyklus vhodný pro jaderné tepelné elektrárny. Různé typy koncepce jaderných elektráren. Zvyšování termické účinnosti ideálního cyklu u tepelných jaderných elektráren. Bezpečnost jaderných elektráren. Perspektivy rozvoje.

Cíle bakalářské práce:

Základní termodynamický rozbor parních cyklů a zejména Rankinova cyklu vhodného pro jaderné elektrárny. Popis možností zvyšování termické účinnosti. Rozbor jednotlivých koncepcí jaderných elektráren. Sestavení jednoduchého skriptu na výpočet a vykreslení ideálního Rankinova parního cyklu (Matlab/Excel).

Seznam odborné literatury:

- [1] Massaoud M., Engineering Thermofluids, Springer 2005
- [2] Mahaffey James, Nuclear Power, The History of Nuclear Power, Facts On File, 2011
- [3] Borgnakke Claus, Sonntag Richard, Fundamentals of Thermodynamics, 2009
- [4] Murray Raymond, Nuclear Energy, Butterworth Heinemann 2000

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Práce je zaměřena ve své první části na odvození vztahů pro popis tepelných oběhů, následně na rozbor ideálního Carnotova a zejména parního Rankin-Clausiova oběhu. U Rankin-Clausiova oběhu jsou zmíněny způsoby zvyšování termodynamické účinnosti se zaměřením na jeho použití v jaderných elektrárnách k výrobě elektrické energie. Druhá část práce popisuje jednotlivé typy jaderných reaktorů, jejich konstrukci, způsob chlazení a výrobu páry. V závěru práce jsou zmíněny vyvíjené reaktory IV. generace.

ABSTRACT

In the first part, the bachelor thesis is focused on derivation of relations that describe thermal cycles. Then, there is an analysis of the ideal Carnot cycle and the Rankine cycle. The ways of increasing the thermodynamic efficiency of Rankine cycle are mentioned, especially the ones that are focused on generating of electricity in nuclear power plants. The second part describes different types of nuclear reactors, their design, the cooling methods and the steam production. The development of the generation IV. nuclear reactors is mentioned at the end of the bachelor thesis.

KLÍČOVÁ SLOVA

tepelný oběh, Rankin-Clausiov oběh, termodynamická účinnost, jaderná elektrárna, jaderný reaktor

KEYWORDS

thermal cycle, Rankin cycle, thermodynamic efficiency, nuclear power plant, nuclear reactor

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOZÁK, Tomáš. *Termodynamika parního cyklu jaderných elektráren*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 52 s., 1 přílohy. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Termodynamika parního cyklu jaderných elektráren vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

10. května 2013

podpis

Tomáš Kozák

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracovávání této bakalářské práce.

OBSAH

	ÚVOD	11
1	ÚVOD DO TEPELNÝCH OBĚHŮ	12
1.1	CARNOTŮV OBĚH.....	14
1.2	VODNÍ PÁRA	16
1.2.1	<i>p-v diagram vody a vodní páry</i>	17
1.2.2	<i>T-s diagram vody a vodní páry</i>	18
2	IDEÁLNÍ RANKIN-CLAUSIŮV PARNÍ OBĚH	19
2.1	SKUTEČNÝ RANKIN-CLAUSIŮV OBĚH.....	21
2.2	ZVÝŠENÍ TERMICKÉ ÚČINNOSTI RANKIN-CLAUSIOVA OBĚHU	21
2.2.1	<i>Snížení tlaku v kondenzátoru</i>	22
2.2.2	<i>Změna tlaku a teploty páry</i>	23
2.3	CARNOTIZACE OBĚHU.....	24
2.3.1	<i>Regenerace tepla</i>	25
2.3.2	<i>Přihřívání páry</i>	26
3	JADERNÉ ELEKTRÁRNY	27
3.1	TEPELNÉ A PROVOZNÍ SCHÉMA JADERNÝCH ELEKTRÁREN	27
3.2	STRUČNÉ ROZDĚLENÍ ENERGETICKÝCH JADERNÝCH REAKTORŮ	28
3.2.1	<i>Tepelné reaktory</i>	28
3.2.2	<i>Rychlé reaktory</i>	29
3.2.3	<i>Přehled dnes používaných energetických reaktorů</i>	30
4	TLAKOVODNÍ REAKTORY MODEROVANÉ A CHLAZENÉ LEHKOU VODOU (PWR A VVER).....	30
4.1	KONSTRUKCE REAKTORU	31
4.2	PRIMÁRNÍ A SEKUNDÁRNÍ OKRUH TLAKOVODNÍHO REAKTORU	32
5	VARNÉ REAKTORY MODEROVANÉ A CHLAZENÉ LEHKOU VODOU (BWR).....	33
5.1	VÝROBA PÁRY VE VARNÉM REAKTORU	34
6	TLAKOVODNÍ REAKTORY CHLAZENÉ A MODEROVANÉ TĚŽKOU VODOU (HWPR).....	34
7	PLYNEM CHLAZENÉ GRAFITEM MODEROVANÉ REAKTORY (GCR)	35
8	LEHKOU VODOU CHLAZENÉ A GRAFITEM MODEROVANÉ REAKTORY (LWGR).....	36
9	RYCHLÉ MNOŽIVÉ REAKTORY (FBR).....	37

10	NASTUPUJÍCÍ GENERACE ENERGETICKÝCH REAKTORŮ	38
11	REAKTORY 4. GENERACE.....	40
11.1	VYSOKOTEPLTNÍ REAKTOR (VHTR)	40
11.2	REAKTOR CHLAZENÝ TEKUTÝMI SOLEMI (MSR).....	40
11.3	RYCHLÝ SODÍKEM CHLAZENÝ REAKTOR (FSR)	41
11.4	RYCHLÝ OLOVEM CHLAZENÝ REAKTOR (LFR).....	41
11.5	PLYNEM CHLAZENÝ RYCHLÝ REAKTOR (GFR)	41
11.6	REAKTOR CHLAZENÝ NADKRITICKOU VODOU (SCWR).....	41
12	POPIS PROGRAMU NA VYKRESLENÍ A VÝPOČET RANKIN-CLAUSIOVA OBĚHU	42
13	ZÁVĚR	44
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	45
	SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A SYMBOLŮ.....	47
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	48
	SEZNAM PŘÍLOH.....	49
	PŘÍLOHA 1 – ZDROJOVÝ KÓD PROGRAMU NA VYKRESLENÍ A VÝPOČET RANKIN-CLAUSIOVA OBĚHU	50

ÚVOD

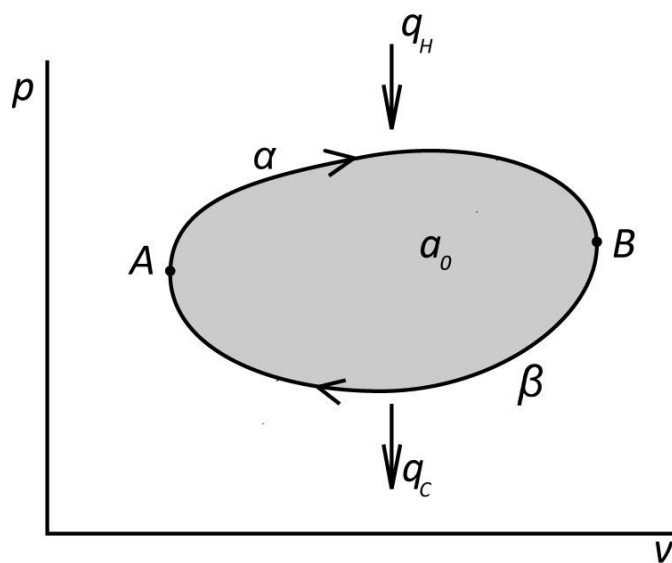
Za objevem jaderného štěpení těžkých atomových jader stojí německý radiochemik Otto Hahn a Dr. Lise Meitnerová se svými spolupracovníky. Koncem roku 1938 provedli pokus, při kterém vzorky uranu vystavili neutronovému záření. Následně při analýze jejich složení zaznamenali přítomnost radioaktivního nuklidu baria s přibližně poloviční atomovou hmotností uranu. Nedlouho potom pojmenovali jev, při kterém zasažením jádra atomu uranu neutronem dojde k jeho rozdělení, jaderné štěpení. Položili tím základy pro uskutečnění jaderné řetězové štěpné reakce, při které dochází k uvolnění ohromného množství vazebné energie atomového jádra. Nikdo z nich v té době netušil, že k využití jejich objevu ve prospěch lidstva povede cesta, na jejímž konci budou dvě svržené atomové bomby a statisíce mrtvých.

2. prosince 1942 byl v rámci projektu Manhattan poprvé proveden úspěšný pokus o řízenou štěpnou řetězovou reakci. Ta proběhla v utajeném jaderném reaktoru Chicago pile-1 postaveném týmem vědců v čele s fyzikem italského původu Enrico Fermim. Reaktor byl z důvodu utajení sestaven v prostorách pod tribunou stadionu Chicagské univerzity. Fermiho reaktor se skládal z grafitových briket, mezi které byly umístěny válcové bloky oxidu uraničitého. Intenzitu reakce řídily kadmiové tyče, které se vysouvaly z reaktoru. Krátce po provedení prvních testů byl rozebrán a převezen do laboratoří v Argone poblíž Chicaga. Zde posloužil jako základ pro stavbu větší verze reaktoru označované jako B-Reactor. Ten spolu s dalšími dvěma postavenými reaktory zajišťoval výrobu plutonia pro v pořadí druhou atomovou pumu svrženou na Japonsko, která nesla pojmenování „Fat Man“.

V poválečném období došlo k prudkému zpomalení doposud bouřlivého vývoje v jaderném odvětví. Většina z vědců pracujících na projektu Manhattan se po jeho ukončení vrátila zpět ke svému civilnímu zaměstnání. Za zlomový lze dnes považovat projekt amerického námořnictva - stavbu ponorky na jaderný pohon. Fermiho konstrukci nebylo kvůli rozměrům reaktoru možné použít. Pro pohon Nautilu, jak se ponorka měla jmenovat, musel být vyvinut nový kompaktní reaktor. Stal se jím reaktor s tlakovou nádobou, chlazený a moderovaný obyčejnou vodou, dnes nejpoužívanější typ reaktoru (PWR). S ním poprvé Nautilus vyrazil na moře 17. června 1954. Prvenství ve výrobě elektrické energie si ale připsal zcela jiný typ reaktoru. Experimental Breeder Reactor One, rychlý reaktor spalující plutonium, vyrobil 20. prosince 1951 první elektrickou energii získanou z „jádra“. Pozadu s vývojem svých reaktorů nezůstaly ani jiné země. Věčný rival Spojených států, Sovětský svaz, spustil ve městě Obninsk první civilní jadernou elektrárnu na světě AM-1, poprvé byla připojena k síti 26. června 1954. Konstrukce jejího grafitem moderovaného a vodu chlazeného reaktoru byla předlohou reaktorů BRMK, na kterých byla založena sovětská jaderná energetika. Jejich výstavbu ukončila až černobylská havárie. Velká Británie postavila svoji energetiku na úspěšných plynem chlazených typech reaktorů, Kanada uspěla se svými reaktory CANDU. Svůj podíl na vývoji jaderné energetiky lze připsat i tehdejšímu Československu. Na sklonku roku 1972 byla u obce Jaslovské Bohunice uvedena do provozu jaderná elektrárna s experimentálním typem reaktoru s označením A-1. Jednalo se o reaktor, který byl chlazen oxidem uhličitým a moderovaný těžkou vodou. Spaloval přírodní uran a svým maximálním výkonem 127 MWe, zásoboval československou rozvodnou síť až do roku 1977, kdy musel být po havárii odstaven.[7, 16]

1 ÚVOD DO TEPELNÝCH OBĚHŮ

Pomocí tepelného oběhu realizujeme přeměnu tepelné energie v energii mechanickou. Tepelným oběhem rozumíme soubor několika za sebou jdoucích termodynamických dějů, po jejichž vykonání se pracovní látka vrátí zpět do původního stavu. Rozlišujeme oběhy přímé a nepřímé. Přímé oběhy jsou oběhy tepelných pracovních strojů, kde je část přivedeného tepla přeměněna na mechanickou energii. Oběhy nepřímé jsou oběhy tepelných poháněných strojů, těm ke své činnosti musíme energii dodat. V diagramech, které zobrazují tepelný oběh, probíhají oběhy přímé ve směru hodinových ručiček a oběhy nepřímé proti.



Obr. 1.1 Obecný přímý tepelný oběh v p-v diagramu

Příklad obecného tepelného oběhu zobrazuje obr. 1.1. Pro tento tepelný oběh nyní přistoupíme k vyjádření prvního zákona termodynamiky pro cykly, který popisuje práci vykonanou cyklem. Při jeho odvození budeme vycházet z rovnice (1.1), která popisuje měrnou objemovou práci. Rovnice budou dále pro zjednodušení udávány v měrných veličinách, tedy, vztažených na 1 kg pracovní látky.

$$dq = du + p \cdot dv = du + da \quad [\text{J/kg}] \quad (1.1)$$

Z té integrací získáme rovnici.

$$\oint dq = \oint du + \oint p \cdot dv = \oint du + \oint da \quad [\text{J/kg}] \quad (1.2)$$

Křivkový integrál zde vyjadřuje integraci po uzavřené křivce oběhu. V důsledku toho, že vnitřní energie pracovní látky je stavovou veličinou, lze napsat.

$$\oint du = 0 \quad [\text{J/kg}] \quad (1.3)$$

Nyní můžeme integraci na levé straně rozdělit na dvě části. Na úsek A- α -B, na tomto úseku probíhá přívod tepla pracovní látky, a na úsek B- β -A, kde je teplo z látky odváděno.

$$\int_{\alpha} dq = q_H \quad [\text{J/kg}] \quad (1.4)$$

$$\int_{\beta} dq = q_C \quad [\text{J/kg}] \quad (1.5)$$

$$\oint da = a_0 \quad [\text{J/kg}] \quad (1.6)$$

Z výše uvedených rovnic sestavíme rovnici pro měrnou práci vykonanou tepelným oběhem.

$$a_0 = q_H + q_C \quad [\text{J/kg}] \quad (1.7)$$

Pro zohlednění toho, že odvedené teplo u přímého oběhu je záporné, zavedeme běžně používanou znaménkovou konvenci.

$dq > 0$ – teplo pracovní látky přivádíme

$dq < 0$ – teplo z pracovní látky odvádíme

$da > 0$ – získaná práce

$da < 0$ – práce spotřebovaná

Úpravou rovnice (1.7) získáme rovnici pro měrnou práci vykonanou přímým tepelným oběhem.

$$a_0 = q_H - |q_C| \quad [\text{J/kg}] \quad (1.8)$$

Stěžejní vlastností tepelného oběhu je jeho schopnost přeměnit tepelnou energii v mechanickou práci. Podle druhého zákona termodynamiky můžeme přivedené teplo přeměnit na mechanickou energii pouze z části. Zbylé teplo musí být z cyklu odvedeno. Kvalitu přeměny popisuje termická účinnost a stejně jako u ostatních strojů je dána poměrem dodané energie a získané práce. Při hodnocení termické účinnosti oběhu musíme rozlišit oběhy přímé a nepřímé. U přímých oběhů hodnotíme poměr získané práce k dodanému teplu, naopak u nepřímého oběhu nás zajímá poměr opačný, poměr získaného (odvedeného) tepla vůči dodané práci. Tím hodnotíme účinnost nepřímého oběhu, pro chladicí zařízení zavádíme pojem chladicí faktor (ε_{ch}), pro tepelná čerpadla topný faktor (ε_{top}). Vzhledem k zaměření této studie se omezíme na popis účinnosti

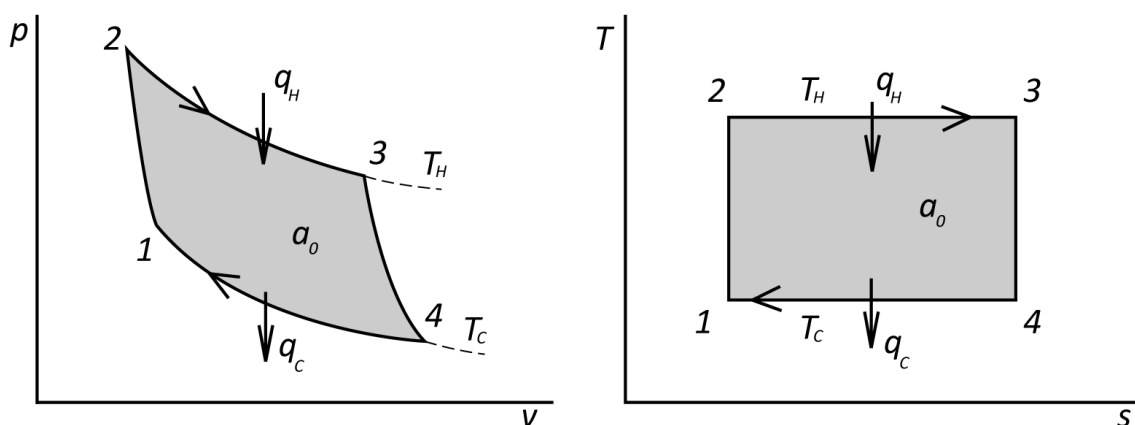
přímého oběhu. Dosazení rovnice (1.8) za měrnou práci oběhu (a_0) a následnou úpravou získáme obecný vztah pro termickou účinnost přímého oběhu.

$$\eta_t = \frac{a_0}{q_H} = \frac{q_H - |q_C|}{q_H} = 1 - \frac{|q_C|}{q_H} \quad [-] \quad (1.9)$$

V kapitole 1 bylo čerpáno z literatury [1, 2]

1.1 Carnotův oběh

Carnotův oběh je termodynamicky nejdokonalejší a zároveň nejjednodušším oběhem. Jedná se o teoretický oběh, který probíhá mezi dvěma zásobníky tepla o stálých ale navzájem různých teplotách T_H a T_C . Je složen ze dvou izotermických a dvou izoentropických dějů. Při realizaci oběhu musí dojít ke splnění několika podmínek. Izotermická expanze při teplotě T_H a komprese za teploty T_C musí probíhat velice pomalu za dokonalého sdílení tepla, při kterém je teplota pracovní látky v celém objemu stále stejná s teplotou zásobníku. Přechod mezi teplotou T_H a teplotou T_C zajišťuje rychlá adiabatická expanze a komprese, při které nesmí dojít ke sdílení tepla mezi pracovní látkou a okolím.



Obr. 1.2 Carnotův přímý oběh v p-v a T-s diagramu

Teplo pracovní látky při Carnotově oběhu přivádíme a odvádíme za konstantní teploty, pro měrné přivedené teplo platí.

$$dq = (c_v \cdot dT + p \cdot dv) = p \cdot dv = da \quad [\text{J/Kg}] \quad (1.10)$$

$$q_H = a_{23} = \int_2^3 p \cdot dv = \int_2^3 r \cdot T_H \cdot \frac{dv}{v} = r \cdot T_H \cdot \ln \frac{v_3}{v_2} \quad [\text{J/Kg}] \quad (1.11)$$

Analogicky pro měrné odvedené teplo lze napsat vztah.

$$q_C = a_{41} = \int_4^1 p \cdot dv = \int_4^1 r \cdot T_C \cdot \frac{dv}{v} = r \cdot T_C \cdot \ln \frac{v_1}{v_4} \quad [\text{J/Kg}] \quad (1.12)$$

Měrnou práci přímého Carnotova oběhu získáme dosazením do rovnice (1.8) pro měrnou práci obecného tepelného oběhu. Absolutní hodnotu q_C získáme z rovnice (1.13).

$$|q_C| = r \cdot T_C \cdot \ln \frac{v_4}{v_1} \quad [\text{J/Kg}] \quad (1.13)$$

$$a_0 = q_H - |q_C| = r \cdot T_H \cdot \ln \frac{v_3}{v_2} - r \cdot T_C \cdot \ln \frac{v_4}{v_1} \quad [\text{J/Kg}] \quad (1.14)$$

Při výpočtu termické účinnosti Carnotova oběhu použijeme rovnici pro účinnost obecného tepelného oběhu, rovnice (1.9), do té dosadíme za q_H a q_C , následně upravíme.

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_C|}{q_H} = 1 - \frac{r \cdot T_C \cdot \ln \frac{v_4}{v_1}}{r \cdot T_H \cdot \ln \frac{v_3}{v_2}} \quad [-] \quad (1.15)$$

Jelikož adiabatická komprese i expanze probíhá mezi stejnými teplotami T_H a T_C , tak platí.

$$\frac{T_C}{T_H} = \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa-1} \quad \frac{T_C}{T_H} = \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} \quad \frac{v_4}{v_1} = \frac{v_3}{v_2} \quad (1.16)$$

Následnou úpravou rovnice (1.14) získáme rovnici termické účinnosti Carnotova oběhu.

$$\eta_t = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad [-] \quad (1.17)$$

Doposud jsme při popisu tepelného oběhu zmínili pouze první zákon termodynamiky pro cykly, který je analogií zákona o zachování energie. Skutečné tepelné oběhy jsou složeny z nevratných dějů, které odpovídají přírodním zákonům. Nevratným dějem může být například vznik tepla třením, nebo přenos tepla při konečném rozdílu teplot. Skutečný tepelný oběh, složený z nevratných dějů, popisuje druhý zákon termodynamiky pro cykly. Reálný oběh, proto aby byl proveditelný, musí

splňovat oba zákony. Ze druhého zákona termodynamiky pro cykly byl odvozen i druhý zákon termodynamiky pro děje. K jeho matematickému popisu byla zavedena veličina entropie. Díky ní můžeme nevratné děje počítat i předpovídat jejich vývoj. Popisem a odvozením druhého zákona termodynamiky pro děje a entropií se nebudeme dále zabývat. Omezíme se pouze na popis využití entropie ke konstrukci T-s diagramu. Definici měrné entropie popisuje rovnice (1.18).

$$ds = \frac{dq}{T} \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (1.18)$$

Osamostatněním dq získáme rovnici diferenciálu tepla (1.18). Určitý integrál této rovnice poté odpovídá teplu sdílenému mezi látkou a okolím mezi dvěma stavy termodynamického děje a reprezentuje ho v T-s diagramu plocha pod křivku děje.

$$dq = T \cdot ds \quad [\text{J}/\text{kg}] \quad (1.19)$$

To je také jedním z důvodů, proč se T-s diagram často používá. Díky tomu lze z T-s diagramu Carnotova oběhu a rovnice pro termickou účinnost obecného děje snadno zjistit, že jeho termická účinnost je maximální, které lze při daném rozsahu teplot docílit. Termická účinnost závisí pouze na teplotách T_H a T_C . Proto se Carnotův oběh používá při srovnávání s jinými oběhy k posouzení jejich účinnosti. Při konstrukci zařízení se snažíme, aby se jeho termická účinnost co nejvíce blížila účinnosti Carnotova oběhu. Tento proces se nazývá carnotizace.

V kapitole 1.1 bylo čerpáno z literatury [1, 2]

1.2 Vodní pára

Různé tepelné oběhy se liší nejen jednotlivými termodynamickými ději, z kterých se skládají, ale zejména i pracovní látkou, která je vhodná k jejich realizaci. Z hlediska přístupu k výpočtu jednotlivých stavů a změn v tepelném oběhu je lze rozdělit na dva typy. První typ oběhů pracuje s reálnými plyny, případně se směsí reálných plynů a paliva. U těchto oběhů můžeme zanedbat případné kapalně příměsi paliva a provést výpočet stavů s pomocí stavové rovnice, která platí pro ideální plyny. V případě druhého typu oběhů, kde dochází k fázové přeměně látky mezi kapalnou a plynnou fází (párou), již stavovou rovnici použít nelze. K získání potřebných hodnot lze využít tabulek, případně grafů. Do této skupiny oběhů patří Rankin-Clausiusův oběh využívající vodní páry k pohonu turbíny a oběhy chladicích zařízení. Ty využívají k chlazení výparného tepla chladiva, které se za nízkého tlaku odpařuje ve výparníku chladicího zařízení.

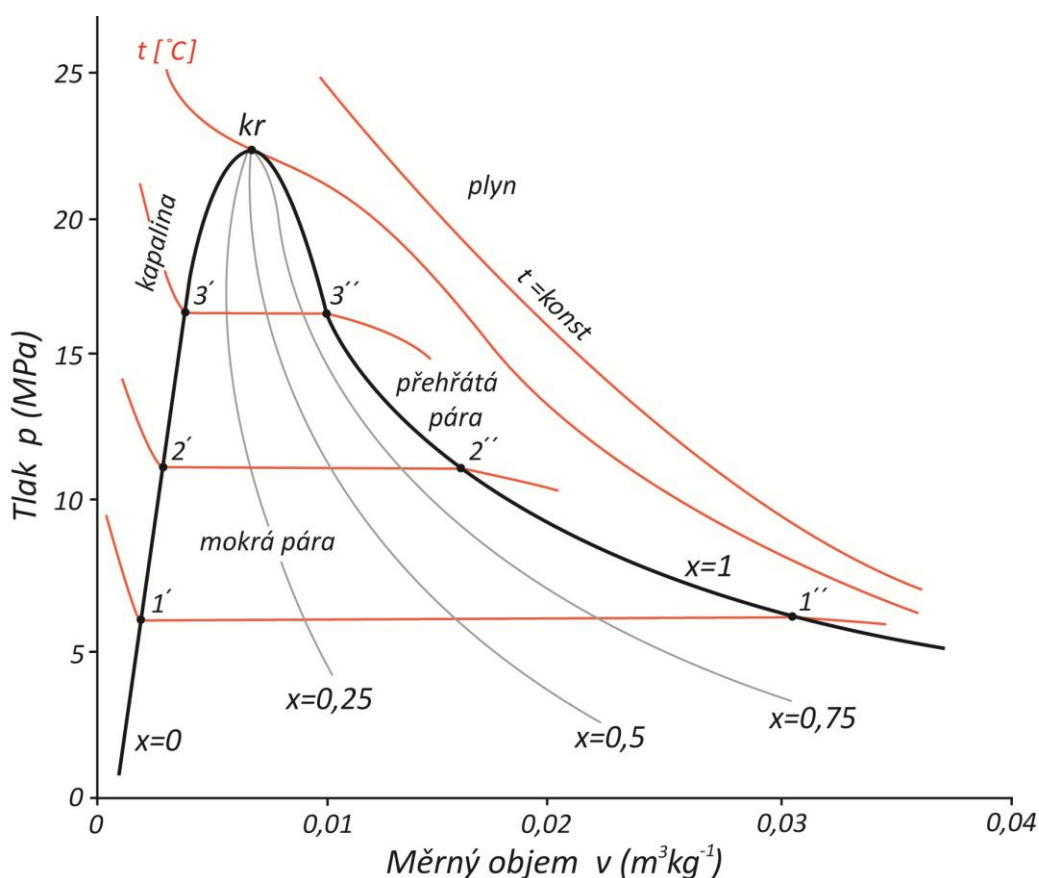
Potřebné parametry kapaliny či páry pro výpočet parních oběhů lze získat i analytickou metodou, ta však vede na řešení složitých rovnic. Proto se pro technickou praxi raději volí odečet parametrů z tabulek, případně z grafů. Vzhledem k zaměření studie se omezíme pouze na popis p-v a T-s diagramů vody a vodní páry.

1.2.1 p-v diagram vody a vodní páry

V p-v diagramu vodní páry se zobrazují fáze vody a přechody mezi nimi v závislosti na tlaku a měrném objemu. Diagram lze rozdělit na tři části - na oblast vody, mokré páry a oblast páry přehřáté. Samotná oblast mokré páry má dvě fáze (syтую kapalinu a syтую páru) a je ohraničena dolní a horní mezní křivkou. Dolní mezní křivka představuje počátek vypařování a nachází se na ní syтая kapalina s poměrnou suchostí $x=0$. Poměrnou suchostí určujeme stav mokré páry a vyjadřujeme podíl syté páry v páře mokré. Poměrnou suchost vypočítáme podle rovnice (1.20).

$$x = \frac{m''}{m} = \frac{m''}{m' + m''} \quad [-] \quad (1.20)$$

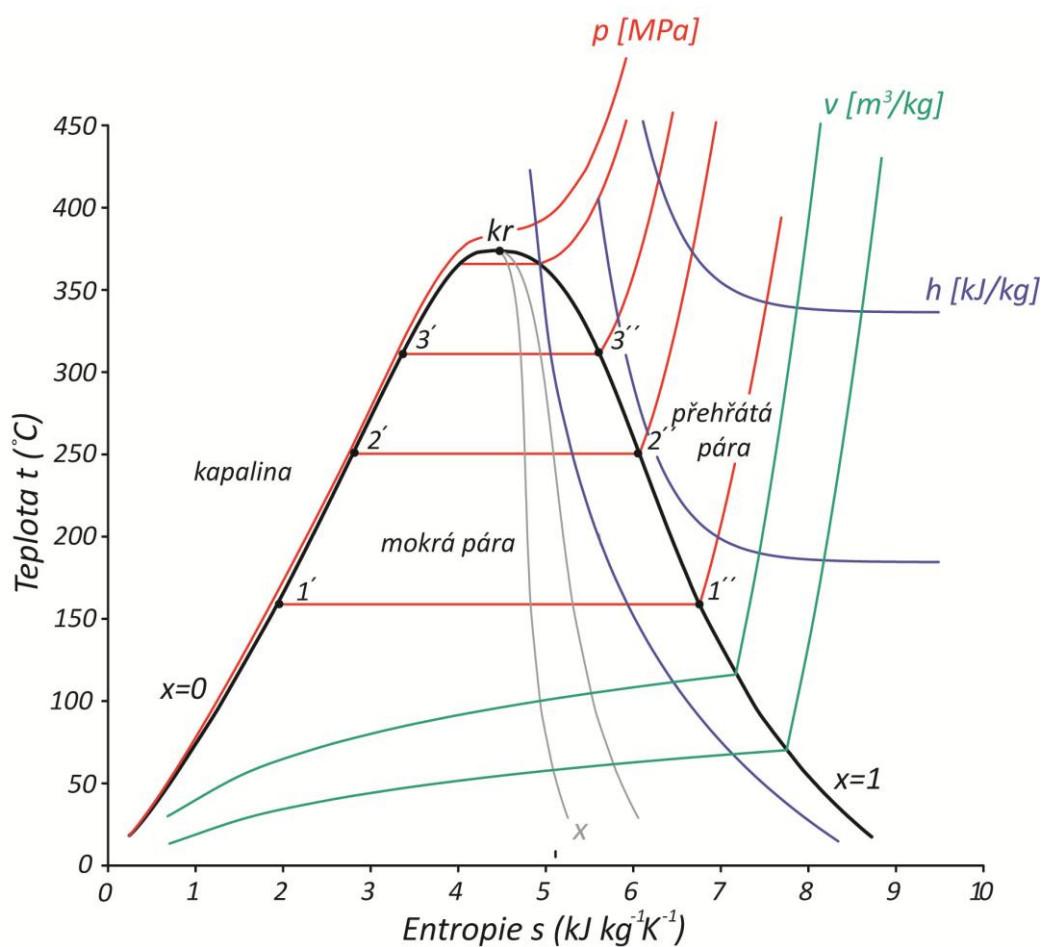
Indexy ' a '' označují obecně stav, případně bod ležící na mezních křivkách. Horní mezní křivka ohraničuje konec vypařování a nachází se na ní pouze syтая pára o suchosti $x=1$. Při pohledu na křivky konstantní teploty znázorněné v diagramu zjistíme, že s vyšším tlakem dochází ke zvýšení teploty varu, která je v oblasti syté páry konstantní. Zároveň s vyšší teplotou varu (tlakem) mírně vzrůstá měrný objem syté kapaliny a klesá měrný objem syté páry. Tento objemový rozdíl se zmenšuje až do kritického tlaku - bod kr , při kterém nenastává var a kapalina volně přechází na přehřátou páru. Kritický bod vody je určen přibližně tlakem $p=22,045$ MPa a teplotou $T=374,23^\circ\text{C}$. [1]



Obr. 1.3 p-v diagram vodní páry

1.2.2 T-s diagram vody a vodní páry

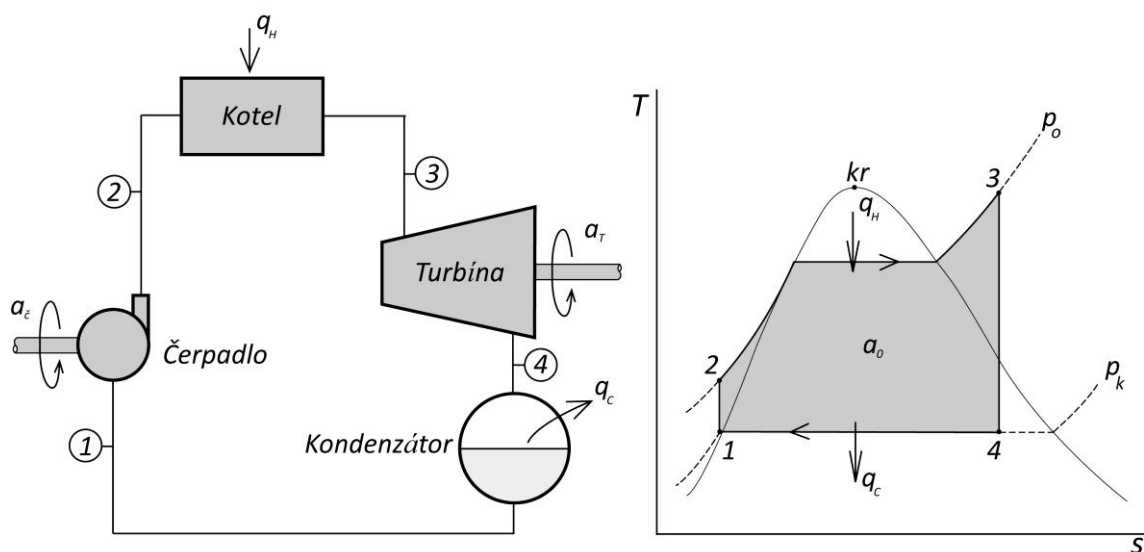
Pro výpočet parního oběhu je nejvhodnější použít T-s diagram vodní páry, z kterého lze přímo odečíst přivedené a odvedené teplo, případně odečíst entalpii páry na vstupu a výstupu z turbíny. Rovněž T-s diagram je rozdělen křivkou syté kapaliny $x=0$ a syté páry $x=1$ na tři oblasti - kapalinu, mokrou páru, přehřátou páru. Při izobarickém ohřevu vody lze z grafu přímo odečíst potřebné měrné výparné teplo pro přeměnu vody na páru dané teplotou a rozdílem entropií na průsečíku izobary s křivkami nasycení. S tlakem výparné teplo klesá a při tlaku kritickém a vyšším je nulové, voda přechází přímo na přehřátou páru.[1]



Obr. 1.4 T-s diagram vodní páry

2 IDEÁLNÍ RANKIN-CLAUSIOV PARNÍ OBĚH

Jedná se o parastrojní oběh, který mění energii akumulovanou v páře na mechanickou práci. Samotný oběh se skládá ze čtyř termodynamických dějů. Jejich průběh je zanesen v T-s diagramu vody a vodní páry na obr. 2.1. Při popisu oběhu budeme vycházet ze stavu 1, ve kterém se nachází sytá kapalina. Následuje adiabatická komprese - děj 1-2, kdy je sytá kapalina čerpadlem stlačena na tlak, při kterém probíhá její ohřev. V kotli (parogenerátoru, reaktoru) je za konstantního tlaku ze stavu 2 ohřata na sytou, případně přehřátou páru. Ta se nachází ve stavu 3. Takto získaná pára dále adiabaticky expanduje přes turbínu, kde se část její vnitřní energie přemění v práci. Sytá, případně mokrá pára ve stavu 4 vstupuje do kondenzátoru, kde zkondenzuje na sytou kapalinu, která se zpět čerpá do kotle k dalšímu ohřevu.



Obr. 2.1 Schéma zařízení pro uskutečnění Rankin-Clausiova oběhu a jeho zobrazení v T-s diagramu vody a vodní páry

Pro přibližné stanovení parametrů pracovní látky ideálního Rankin-Clausiova oběhu lze použít T-s diagram vody a vodní páry nebo jejich tabulky, ve kterých lze snadno pro každý z bodů oběhu odečíst hodnoty termodynamických veličin.

Nejprve přistoupíme ke stanovení přivedeného a odvedeného tepla. V T-s diagramu odpovídá oblast pod křivkou termodynamického děje teplu přivedenému (odebranému) pracovní látce při jeho realizaci. Teplu q_H přivedenému do oběhu proto odpovídá plocha pod křivkou přechodu mezi stavy 2 a 3. Odvedenému teplu q_C náleží plocha pod křivkou přechodu mezi stavy 4 a 1. Rozdíl přivedeného a odvedeného tepla odpovídá ploše ohraničené oběhem a také práci, kterou oběh vykonal. Ohřev i kondenzace probíhá za konstantního tlaku, proto můžeme přivedené a odvedené teplo jednoduše stanovit z rozdílu entalpií pracovní látky na začátku a konci děje. Pro přivedené teplo sestavíme rovnici (2.1), a pro teplo z pracovní látky odvedené rovnici (2.2). Tepelná bilance je pro jednoduchost uvedena pro průtočnou hmotnost 1 kg vodní páry.

$$q_H = h_3 - h_2 \quad [\text{J/kg}] \quad (2.1)$$

$$q_C = h_1 - h_4 \quad [\text{J/kg}] \quad (2.2)$$

Práci vykonanou oběhem stanovíme dosazením do zobecněné rovnice (1.8) pro práci přímého tepelného oběhu, měrné teplo q_H je vždy záporné, proto lze výslednou rovnici pro práci cyklu takto upravit.

$$a_0 = q_H - |q_C| = h_3 - h_2 + (h_1 - h_4) \quad [\text{J/kg}] \quad (2.3)$$

Dále nás zajímá práce vykonaná turbínou a_T a práce potřebná pro pohon čerpadla a_C . Ta je pro adiabatický děj podle druhé formy prvního zákona termodynamiky rovna rozdílu entalpií pracovní látky před a po adiabatickém ději. Tento rozdíl entalpií se u turbíny také někdy označuje jako tepelný spád turbíny.

$$a_T = h_3 - h_4 \quad [\text{J/kg}] \quad (2.4)$$

$$a_C = h_1 - h_2 \quad [\text{J/kg}] \quad (2.5)$$

Odečtením práce spotřebované čerpadlem od práce vykonané turbínou získáme rovněž vztah pro práci vykonanou cyklem. V některých případech lze zanedbat i práci spotřebovanou čerpadlem, která je výrazně menší než užitečná práce turbíny a uvažovat práci vykonanou turbínou za práci cyklu.

$$a_0 = a_T - |a_C| \quad [\text{J/kg}] \quad (2.6)$$

Pro termickou účinnost oběhu poté platí vztah.

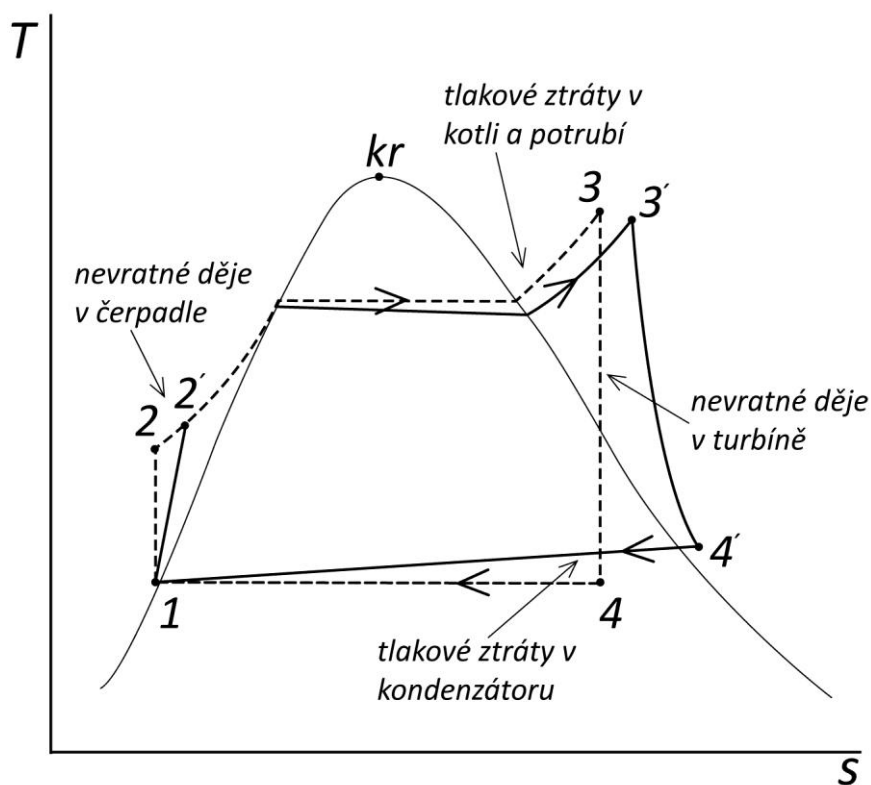
$$\eta_T = \frac{a_0}{q_H} = \frac{q_H - |q_C|}{q_H} = \frac{h_3 - h_2 + (h_1 - h_4)}{h_3 - h_2} \quad [-] \quad (2.7)$$

Účinnost Rankin-Clausiova oběhu je opět závislá zejména na teplotách, při kterých probíhá přívod a odvod tepla pracovní látky. To znamená, že pro docílení maximální termické účinnosti by měl být tento rozdíl co nejvyšší. V praxi je samozřejmě omezen teplotou okolí (chladicí vody), konstrukčními a materiálovými faktory, které omezují tlak a teplotu páry.

V kapitole 2 bylo čerpáno z literatury [1, 2]

2.1 Skutečný Rankin-Clausiov oběh

Mluvíme-li o ideálním tepelném oběhu, zanedbáváme ztráty, které vznikají na jednotlivých částech zařízení. Tyto ztráty mají přímý vliv na pokles termické účinnosti skutečného oběhu, a proto je při konstrukci zařízení musíme zohlednit. Nižší účinnost skutečného Rankin-Clausiova oběhu způsobují zejména ztráty dvojího druhu, tlakové a tepelné ztráty v kotli a v kondenzátoru a nevratné děje v turbíně a čerpadle. Samotné porovnání skutečného oběhu s oběhem ideálním je na obr. 2.2.



Obr. 2.2 Porovnání ideálního a skutečného Rankin-Clausiova oběhu

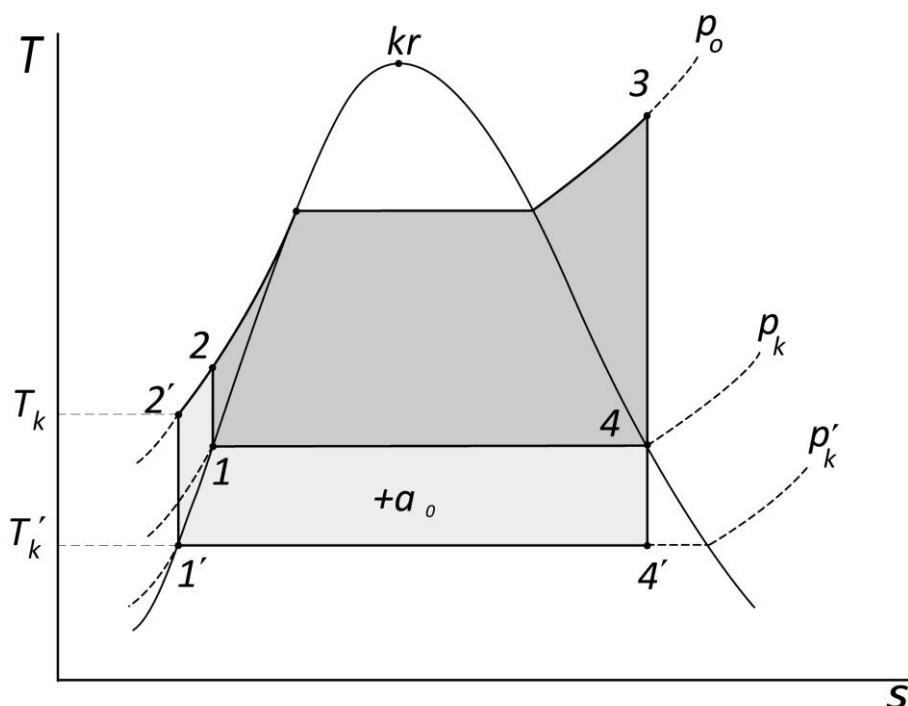
Nejvýraznější pokles termické účinnosti oběhu způsobují nevratné děje, které vznikají při průchodu páry turbínou. V případě ideálního oběhu předpokládáme, že expanze v turbíně je izoentropická a odpovídá jí i příslušný tepelný spád (rozdíl entalpií páry na vstupu a výstupu z turbíny). Průchodem páry turbínou ale dochází k expanzním ztrátám, jejich důsledkem se expanzní křivka odklání ve směru vzrůstající entropie. Entalpie páry odcházející z turbíny je vyšší než v případě ideální izoentropické expanze. Proto tím klesne skutečný tepelný spád, to znamená i výkon turbíny. Rovněž s nárůstem entropie vzroste množství tepla, které musí být odvedeno v kondenzátoru. Ztráty podobné ztrátám v turbíně vznikají i v čerpadle, kde rovněž vlivem nárůstu entropie při kompresi kapaliny vzroste práce potřebná pro jeho pohon. Mezi další neméně významné ztráty patří tlakové ztráty způsobené třením a únikem tepla do okolí při tom, jak pracovní látka protéká potrubím, kotlem (parogenerátorem) a kondenzátorem.[9]

2.2 Zvýšení termické účinnosti Rankin-Clausiova oběhu

Při pohledu na T-s diagram Rankin-Clausiova oběhu, případně na rovnici (2.7) pro jeho termickou účinnost, zjistíme, že lepší termické účinnosti oběhu lze docílit vhodnou změnou v poměru ploch odpovídajících přivedenému a odvedenému teplu. Účinnost oběhu lze tedy zvýšit snížením tlaku v kondenzátoru (nižší kondenzační teplota), vyšší teplotou páry na vstupu do turbíny, nebo vyšším tlakem páry. Veškeré tyto změny, které vedou ke zlepšení termické účinnosti oběhu, doprovázejí různé, i nežádoucí jevy, a ty je nutné při volbě parametrů oběhu zohlednit.

2.2.1 Snížení tlaku v kondenzátoru

První z možností jak zlepšit termickou účinnost Rankin-Clausiova oběhu je snížit tlak v kondenzátoru. Nižšímu kondenzačnímu tlaku rovněž odpovídá nižší teplota, při které dochází ke kondenzaci páry. Tím klesne množství tepla odvedeného z oběhu, tak jak je znázorněno na obr. 2.3. Naproti tomu mírně vzroste spotřeba čerpadla, ale tento vliv na termickou účinnost oběhu lze zanedbat. Nižšího kondenzačního tlaku lze docílit třemi způsoby - zvětšením teplosměnné plochy kondenzátoru, nižší teplotou chladicí vody nebo jejím větším průtokem.



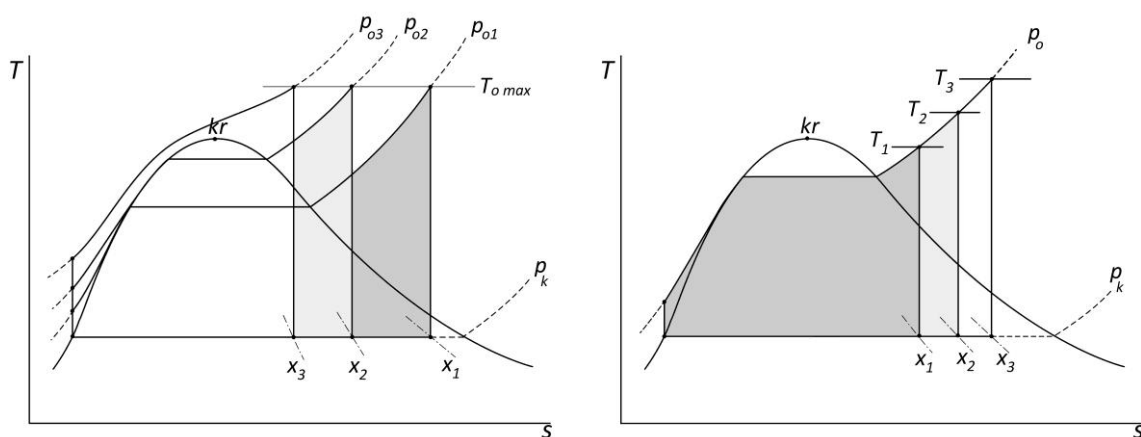
Obr. 2.3 Vliv zlepšení vakua v kondenzátoru na termickou účinnost

Problémy doprovázející snižování kondenzačního tlaku jsou následující. Se snižováním tlaku v kondenzátoru roste výkon nízkotlakého stupně turbíny, tento nárůst výkonu ale není stále úměrný kondenzačnímu tlaku. Od určité hodnoty protitlaku dochází k dodatečné expanzi páry za lopatkami posledního stupně turbíny a následně poklesu jejího výkonu. S hodnotou kondenzačního tlaku jsou spojeny i další problémy, které není možné při jeho volbě opomenout. Na kondenzačním tlaku závisí kvality páry a její měrný objem na výstupu z turbíny. Pára má při nízkém tlaku velký měrný objem, který musí protéct přes nízkotlakou část turbíny. To může způsobit při volbě příliš

nízkého kondenzačního tlaku neúměrné zvětšení její nízkotlaké části. Kdy v případě, že má dojít ke zpracování většího průtoku páry, musí být zvoleno vícetělesové uspořádání. Kromě toho způsobuje nižší kondenzační tlak snížení kvality páry v nízkotlakém stupni turbíny. Pára se zvýšenou vlhkostí způsobuje větší ztráty při proudění a urychluje erozi oběžných lopatek. Všechny výše zmíněné faktory musíme při volbě kondenzačního tlaku zvážit. I díky tomu je rozmezí používaných tlaků v kondenzátoru velké. Běžně se můžeme setkat s tlaky v kondenzátorech od 2,5 kPa do 9 kPa. Uvádí se, že volba tlaku v kondenzátoru závisí zejména na ceně paliva, které se spaluje. S rostoucími náklady na palivo je kladen důraz na vyšší termickou účinnost oběhu, a tudíž i na nižší provozní tlak kondenzátoru. Z tohoto pohledu lze považovat jaderné palivo za levné. To je také jedním z důvodů, proč se běžný tlak v kondenzátoru jaderných elektráren pohybuje v rozmezí 8-9 kPa. [2]

2.2.2 Změna tlaku a teploty páry

Dalšího navýšení termické účinnosti Rankin-Clausiova oběhu lze dosáhnout přivedením „většího množství tepla“ do oběhu (teplo přivádíme při vyšší teplotě, čímž zvyšujeme střední teplotu, při které do oběhu přivádíme teplo). Toho lze docílit navýšením tlaku, nebo teploty páry, popřípadě kombinací těchto dvou podmínek. Vliv změny tlaku páry na Rankin-Clausiova oběhu je znázorněn na obr. 2.4. Zvyšování tlaku zde probíhá za konstantní teploty páry, která bývá zpravidla omezena použitými konstrukčními materiály. Jak je z T-s diagramu patrné, změna tlaku ovlivní jak množství odvedeného tepla v kondenzátoru, tak i kvalitu páry na výstupu z turbíny.



Obr. 2.4 Vliv změny tlaku a teploty vstupní páry na termickou účinnost oběhu

Omezení, se kterými se lze při zvyšování tlaku páry setkat, je několik. První může být spojeno s měrným objemem páry, který s rostoucím tlakem páry klesá. Nízký měrný objem páry může způsobit problémy při konstrukci malých turbín. V malém vysokotlakém stupni turbíny musejí být použity velmi krátké oběžné lopatky, u kterých dochází k nárůstu ztrát způsobených vnitřní a vnější netěsnostmi. Další problém je spojen opět s vlhkostí páry při expanzi v turbíně, ta rovněž s tlakem páry vzrůstá. Příliš vysoká vlhkost páry způsobuje erozi oběžných lopatek turbíny a pokles účinnosti jejího nízkotlakého stupně. Za mezní hodnotu pro vlhkost páry na výstupu z turbíny se udává hodnota vlhkosti páry 12 až 14%. Při překročení této hodnoty musí dojít zároveň ke zvýšení její teploty, nebo musí být kvalita páry zajištěna jiným způsobem, nejčastěji

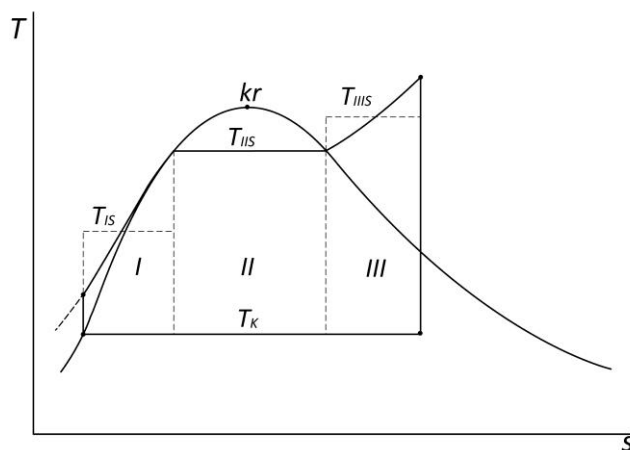
znovupřehřevem páry, nebo odstraněním přebytkové vlhkosti po jejím průchodu vysokotlakým stupněm turbíny.[2]

Vyšší teplota přehřáté páry má pouze pozitivní vliv na termickou účinnost oběhu. Při vyšší teplotě páry se do oběhu přivede více tepla, také se zvětší entalpický spád turbíny. Zároveň dojde ke zlepšení kvality páry po expanzi, poklesu její vlhkosti. Vliv teploty na termickou účinnost a kvalitu výstupní páry je na obr. 2.4. Samotná účinnost oběhu v závislosti na teplotě přehřáté páry neustále roste. Teplotu páry omezuje převážně použitý materiál přehříváku páry, parovodu a vstupní části turbíny. S použitím feriticko-perlitických ocelí se může maximální teplota páry pohybovat kolem 535 °C. Pro vyšší teploty je třeba použít vysoce legovaných austenitických materiálů, u kterých je ale nárůst teploty vykoupen řadou dalších nevýhod, mezi které patří - vysoká cena, horší tepelná vodivost materiálu a především značná délková roztažnost. Kvůli těmto nedostatkům austenitických materiálů se maximální používaná teplota páry u fosilních bloků ustálila okolo hodnoty 550 °C.[2]

Z výše uvedených skutečností vyplývá, že nelze libovolně volit tlak a teplotu vstupní páry. Volba parametrů vstupní páry vždy závisí na přípustné vlhkosti páry po expanzi a tlaku v kondenzátoru. Zmíněné problémy, se kterými se při návrhu parostrojního oběhu můžeme setkat, platí spíše pro návrh fosilních bloků. U jaderných elektráren je tlak a teplota páry omezena použitým typem reaktoru a jeho chladivem. Konstrukce většiny energetických reaktorů neumožňuje přehřev páry, vyrábějí pouze páru sytou o teplotě pohybující se kolem 280-290°C.

2.3 Carnotizace oběhu

Rankin-Clausiov oběh lze rozdělit na tři oblasti. Oblast, kde probíhá ohřev stlačené vody na sytou kapalinu (I), oblast ohřevu syté kapaliny na sytou páru (II) a oblast přehřevu páry (III). Tohoto rozdělení použijeme pro to, abychom zjistili vliv jednotlivých částí oběhu na jeho celkovou termodynamickou účinnost. Dále budeme postupovat tak, že každou oblast nahradíme Carnotovými oběhy. Každý Carnotův oběh bude pracovat mezi společnou teplotou T_k a střední teplotou, při které se v dané oblasti přivádí teplo (T_s). Touto úpravou jsme přibližně nahradili Rankin-Clausiov oběh třemi Carnotovými oběhy. [2]



Obr. 2.5 Nahrazení Rankin-Clausiova oběhu trojicí Carnotových oběhů

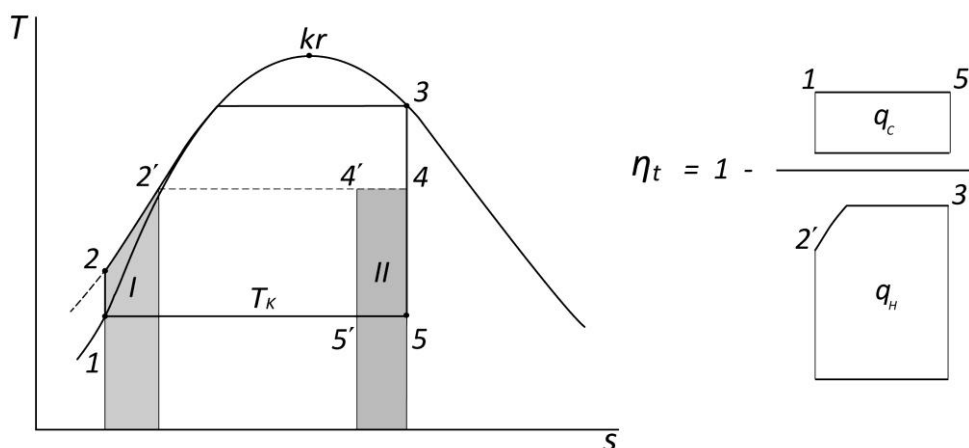
Účinnost Carnotova oběhu závisí pouze na teplotách, mezi kterými pracuje - viz. rov. 1.17 pro účinnost Carnotova oběhu. Proto lze snadno určit, že pro účinnosti dílčích Carnotových oběhů bude platit.

$$\eta_{tI} < \eta_{tII} < \eta_{tIII} \quad (2.8)$$

Zjistili jsme, že nejnižší účinnost má Carnotův oběh, který nahrazuje oblast I, naopak nejvyšší má oběh nahrazující oblast III. Toho dále využijeme v dalších dvou kapitolách, ve kterých se budeme snažit zlepšit účinnost Rankin-Clausiova oběhu a přiblížit jeho účinnost více účinnosti ideálního Carnotova cyklu.[2]

2.3.1 Regenerace tepla

Regenerací tepla se snažíme zmenšit, v ideálním případě odstranit, oblast I, ve které přivádíme teplo pracovní látce při nejnižší teplotě, a tím snížit vliv této oblasti na celkovou termickou účinnost oběhu. Regeneraci tepla provádíme řízeným odběrem páry nejčastěji po expanzi ve vysokotlaké části turbíny. Po expanzi páry ve vysokotlaké části turbíny je část páry odebrána a přivedena do ohříváku (regeneračního výměníku), kde pára předává teplo napájecí vodě ještě před jejím ohřevem reaktorovým teplem. Regenerační pára v ohříváku kondenzuje a vzniklý kondenzát je sveden do kondenzátoru.



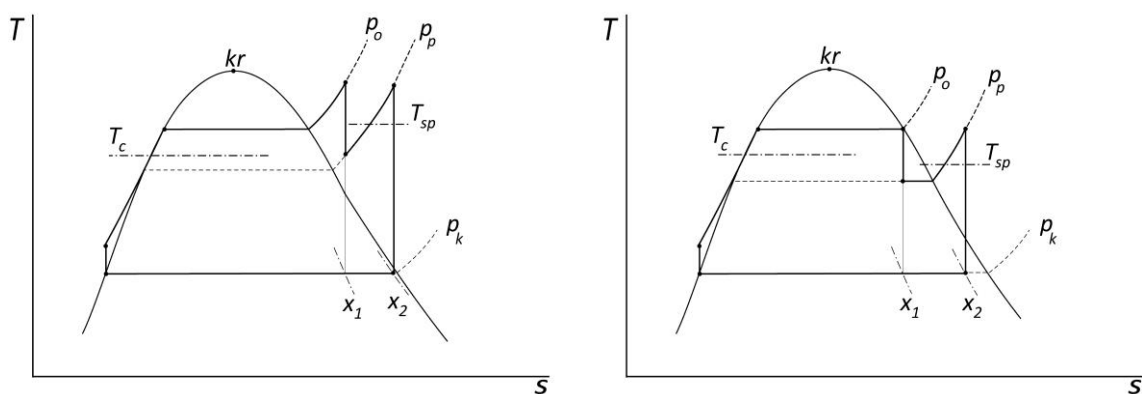
Obr. 2.6 Diagram Rankin-Clausiova oběhu s jednostupňovou regenerací tepla a grafické znázornění termické účinnosti oběhu

Na obr. 2.6 je znázorněn Rankin-Clausiovův oběh s jednostupňovou regenerací tepla. Teplo, které dodáme napájecí vodě z odběrové páry, je v T-s diagramu znázorněno plochou I. Tato plocha je velikostí shodná s plochou II. Ta odpovídá teplu odebranému páře v ohříváku při kondenzaci, přeměně ze stavu 4 (mokrý pára) na stav 1 (sytá kapalina). Diagram je konstruován pro 1 kilogram pracovní látky, proto teplo z odběrové páry odpovídá pouze část z plochy pod přechodem mezi stavy 4 a 2' (znázorněná plocha II). Tímto způsobem se dosáhlo ohřevu napájecí vody ze stavu 2 na stav 2' pouze pomocí odběrové páry, potřebné teplo se regenerovalo. Pro určení vlivu regenerace tepla na termickou účinnost oběhu je nutné si uvědomit, že nyní se teplo do oběhu přivádí pouze mezi stavy 2' a 3. Teplo se v kondenzátoru odvádí pouze mezi

stavem 5' a 1, jelikož je zmenšené o regenerované teplo odebrané odběrovou párou. Při porovnání těchto dvou oblastí lze zjistit, že poměr mezi přivedeným a odvedeným teplem vzrostl. Grafické znázornění účinnosti oběhu s regenerací je znázorněno na obr. 2.6. Výsledná termická účinnost oběhu je vyšší, zmenšením oblasti I došlo ke zvýšení střední teploty, při které se přivádí teplo do oběhu. Provedla se takzvaná carnotizace oběhu. [2]

2.3.2 Přihřívání páry

Přihříváním páry se snažíme zvětšit dílčí oblast III s nejvyšší termodynamickou účinností. Přihřívání páry se provádí převážně po její expanzi ve vysokotlaké části turbíny. Pára průchodem vysokotlakou částí turbíny expanduje na tlak p_p . Dále proudí do přihříváku, kde se za tlaku p_p přihřívá téměř na původní teplotu (podle způsobu přihřívání). Ohřátá pára se přivádí na další stupně turbíny, kde průchodem expanduje na kondenzační tlak. V převážné části jaderných elektráren pracují turbíny se sytou vstupní párou. Typ reaktoru a parametry chladiva neumožňují ve většině případů přehřev páry. Proto je na obr. 2.7 zakreslen i Rankin-Clausiov oběh se sytou párou a jedním přihřevem páry. Při nadkritických parametrech vstupní páry lze použít i dvojnásobného přihřívání při rozdílných tlacích.



Obr. 2.7 Přihřev páry u Rankin-Clausiova oběhu s přehřátou a sytou parou

Pro zlepšení termodynamické účinnosti oběhu je velmi důležitá správná volba přihřívacího tlaku. Obecně lze říci, že účinnost oběhu vzroste, pokud střední teplota přihřevu páry je vyšší než Carnotova teplota T_C (zakreslena v diagramu). Určíme ji nahrazením Rankin-Clausiova oběhu Carnotovým oběhem, který má stejnou účinnost jako oběh bez přihřevu. Náhradní Carnotův oběh poté probíhá mezi teplotou T_K (kondenzační teplota) a hledanou teplotou T_C . Při správné volbě přihřívacího tlaku u oběhu s přehřátou párou se udává, že při jednostupňovém přihřevu páry by měla teoretická termodynamická účinnost oběhu vzrůst přibližně o 6 až 8 %. V případě oběhu se sytou párou se přihřevem páry nemusí termodynamická účinnost oběhu přímo zlepšit, zejména při přihřevu vstupní nebo odběrovou párou. Střední teplota přihřevu páry může být nižší než teplota T_C . Přihřevem páry se ale odstraní problém s vlhkostí páry při expanzi. U oběhu se sytou párou, nakonec termodynamická účinnost oběhu vzroste díky vyšší účinnosti nízkotlakého stupně turbíny vlivem nižších ztrát vlhkostí. Také se omezí eroze oběžných lopatek kapičkami vody.[2]

V jaderných elektrárnách je zajištění přihřevu páry obtížné. V jednookruhovém uspořádání jaderné elektrárny, kde pracuje turbína s radioaktivní párou se přihřívání

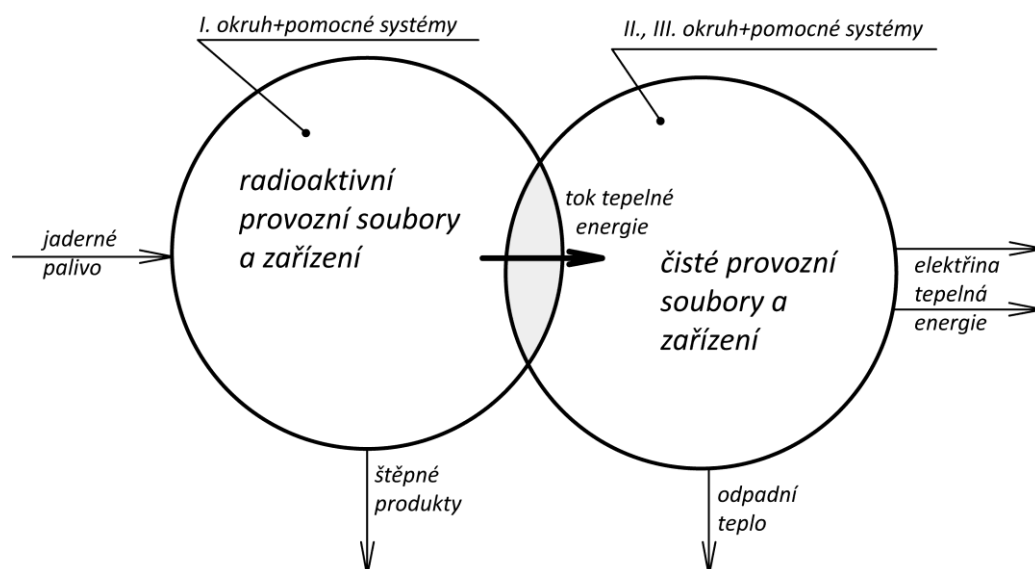
páry nepoužívá, nastává zde problém s umístěním přehříváku. Ve dvou a tříokruhovém uspořádání se přehřev páry provádí několika způsoby. U plynem a tekutým kovem chlazených reaktorů se provádí přehřev primárním chladivem ve zvláštním výměníku nebo v parogenerátoru zabudovaném přehříváku. U reaktorů typu PWR se provádí přehřívání páry zejména vstupní párou do turbíny, nebo odběrovou párou z turbíny. Při tomto způsobu přehřevu ale páru nelze přehřát na teplotu vyšší než je teplota sytosti odpovídající tlaku vstupní páry. S přehřevem páry se většinou zároveň provádí i separace přebytečné vlhkosti v separátoru. Hlavním důvodem proč je přehřev syté páry prováděn zůstává zejména nutnost zajistit suchost páry po expanzi.

3 JADERNÉ ELEKTRÁRNY

Srdcem každé jaderné elektrárny je reaktor s aktivní zónou, ve které probíhá řízená štěpná řetězová reakce. Použitím různých druhů štěpného materiálu, uspořádáním aktivní zóny, použitím jiného moderátoru nebo chladiva lze získat jaderný reaktor s odlišnými vlastnostmi a s jinými nároky na jeho provoz. Samotný způsob přeměny jaderné energie na tepelnou však zůstává zachován. Teplo v jaderné elektrárně vzniká v reaktoru, štěpením štěpného materiálu v jeho aktivní zóně. Tepelný výkon aktivní zóny je určen intenzitou štěpné řetězové reakce. Rozštěpením jádra paliva neutronem vznikají produkty štěpení (fragmenty jádra, neutrony, záření β a γ) o určité kinetické energii. Doběh produktů štěpení v jaderném palivu je velmi malý, to znamená, že svoji kinetickou energii předávají převážně zbylým atomům paliva v okolí místa štěpení, případně moderátoru a konstrukčním materiálům reaktoru. Rychlost tepelného pohybu těchto atomů se zvýší. Štěpení probíhá v celém objemu paliva, palivo se zahřívá a jaderná energie v něm vázaná se mění na energii tepelnou. Tepelný výkon aktivní zóny není teoreticky limitován neutronovým tokem, ale tepelným výkonem, který jsme schopni z aktivní zóny reaktoru odvést. Z hlediska termodynamiky nás proto bude nadále spíše zajímat provedení reaktoru, uspořádání a chlazení jeho aktivní zóny, druh a parametry chladiva, případně celková koncepce jaderné elektrárny.[3]

3.1 Tepelné a provozní schéma jaderných elektráren

Zejména z důvodu možného úniku radioaktivity, nebo kvůli specifické konstrukci reaktoru, nelze přímo teplo vyvíjené v aktivní zóně použít k výrobě páry nebo ohřevu plynu a pohonu parní případně plynové turbíny. Je nutné konstrukčně oddělit zařízení a provozní celky, které mohou být přímo ve styku s radioaktivitou nebo jí mohou být zasaženy, a zařízení, která se do styku s radioaktivitou dostat nesmí. Proto je uspořádání jaderných elektráren vesměs víceokruhové, uzavřený primární okruh s radioaktivním chladivem většinou pouze odvádí teplo z reaktoru a předává ho dalším tepelným okruhům. Jaderné elektrárny lze rozdělit do tří skupin – jednookruhové, dvouokruhové a tříokruhové jaderné elektrárny. Na typu reaktoru poté závisí počet tepelných okruhů, které zajišťují jeho chlazení a výrobu elektrické energie. Ta je realizována zejména přímým Rankin-Clausiovým oběhem, lze se ale setkat i s použitím Braytonova oběhu u reaktorů chlazených plynem.[6]



Obr. 3.1 Provozní schéma jaderné elektrárny

Jednookruhové uspořádání jaderné elektrárny je značně podobné koncepci fosilní elektrárny. Pára se zde vyrábí ve varném reaktoru a je přímo vedena na turbínu. Přes jednoduchost uspořádání zde vzniká problém se zajištěním biologické ochrany částí tepelného oběhu (turbíny, parovodů, kondenzátoru). Je obtížnější zabránit úniku radioaktivity a provádět případnou údržbu nebo opravu zařízení. Za výhody jednookruhového uspořádání lze považovat to, že tlak páry vyrobené v reaktoru odpovídá tlaku páry na vstupu do turbíny. Dále odpadá sdílení tepla mezi primárním a sekundárním okruhem v parogenerátoru.

Dvouokruhové uspořádání jaderné elektrárny odpovídá snaze více omezit možný únik radioaktivity a umožňuje použít i jiná chladiva reaktoru než pouze vodu. Primární okruh zajišťuje chlazení reaktoru a teplo pro výrobu páry předává sekundárnímu okruhu v parogenerátoru. V něm vyrobená pára již není radioaktivní a je vedena na turbínu, kondenzátor a další části běžného parostrojního oběhu.

Tříokruhové uspořádání elektrárny se používá převážně v případech, kdy je nutné zamezit styku vody nebo vodní páry s chladivem primárního okruhu. Používá se například u rychlých reaktorů chlazených tekutým sodíkem. V případě styku sodíku s vodou dochází k silné exotermické reakci, která by mohla poškodit reaktor. Proto na primární sodíkový okruh chladící reaktor navazuje další sodíkový okruh, který chrání reaktor před selháním parogenerátorů.

3.2 Stručné rozdělení energetických jaderných reaktorů

Z hlediska kinetické energie neutronů, které štěpí jaderné palivo, lze jaderné reaktory rozdělit na - reaktory tepelné, ve kterých probíhá štěpení materiálu tepelnými neutrony a na rychlé reaktory, kde štěpení zajišťují neutrony o vysoké kinetické energii (rychlé neutrony).

3.2.1 Tepelné reaktory

Samotná konstrukce reaktoru i podmínky, za kterých bude řetězová reakce probíhat, závisí do značné míry na použitém jaderném palivu. Většina dnes

provozovaných reaktorů pracuje s palivem, které není možné štěpit rychlými neutrony. Jedná se o reaktory využívající paliva na bázi přírodního uranu nebo mírně obohaceného uranu. Neutrony, vzniklé rozštěpením jádra, mají vysokou kinetickou energii na to, aby mohly způsobit další štěpení. Proto musí být zpomaleny na kinetickou energii přibližně 0,025 eV, která odpovídá zhruba tepelné energii atomů prostředí, ve kterém se pohybují. Zpomalení neutronů se provádí pružnými srážkami se speciální látkou, takzvaným moderátorem. Moderační účinek látky je tím větší, čím lehčí jsou atomová jádra dané látky. Z tohoto důvodu je nejlepším moderátorem voda (jádra vodíku), těžká voda nebo grafit. Reaktory, ve kterých probíhá štěpení převážně tepelnými neutrony, proto nazýváme tepelné reaktory. Samotný tepelný reaktor se skládá z aktivní zóny, kde probíhá štěpení. Aktivní zóna obsahuje palivo ve formě oddělených palivových tyčí, mezi kterými je moderátor. K řízení štěpné reakce slouží absorpční tyče, ty se dle potřeby zasouvají do reaktoru a omezují neutronový tok. Aktivní zónu obklopuje reflektor, který zlepšuje výtěžnost štěpné reakce tím, že neutrony uniklé z aktivní zóny odráží zpět. Podle konstrukce reaktoru lze tepelné reaktory dělit na reaktory s tlakovou nádobou, nebo na reaktory s tlakovými kanály. [3, 6]

3.2.2 Rychlé reaktory

Převážná část štěpení zde probíhá rychlými neutrony o kinetické energii kolem 10^5 eV, které nejsou zpomaleny moderátorem. Reaktory tohoto typu neobsahují moderátor. K uskutečnění štěpení rychlými neutrony musí reaktor pracovat s vysoce obohaceným uranem nebo se směsí uranu a plutonia, ve kterém zvýšený podíl izotopu U235 štěpitelném všemi neutrony zaručí běh a udržení řetězové reakce. Samotné provedení aktivní zóny je podobné aktivní zóně tepelných reaktorů. Měrné tepelné zatížení aktivní zóny je ale vyšší. Také chladivo nesmí mít moderační účinky. Z těchto důvodů se dnes ke chlazení rychlých reaktorů používá tekutých kovů, zejména sodíku. Nevýhodou sodíku je jeho již zmíněná velká chemická afinita ke kyslíku, vodě, případně vodní páře. [3, 6]

3.2.3 Přehled dnes používaných energetických reaktorů

Z velkého počtu různých konstrukčních variant a typů reaktorů se masově rozšířilo pouze několik z nich. K 31. 12. 2012 bylo podle statistik WNA (World Nuclear Association) v provozu 435 jaderných reaktorů. Přehled jednotlivých typů a jejich zastoupení je uveden v tabulce 3.1.

Typ reaktoru	Počet	Instalovaný výkon [GWe]	Palivo	Chladiivo	Moderátor
<i>Tlakovodní reaktory chlazené a moderované lehkou vodou (PWR a VVER)</i>	271	270,4	Obohacený UO_2	Voda	Voda
<i>Varné reaktory chlazené a moderované lehkou vodou (BWR)</i>	84	81,2	Obohacený UO_2	Voda	Voda
<i>Tlakovodní reaktory chlazené a moderované těžkou vodou (PHWR)</i>	48	27,1	Přírodní UO_2	Těžká voda	Těžká voda
<i>Plynem chlazené a grafitem moderované reaktory (GCR)</i>	17	9,6	Obohacený UO_2	CO_2	Grafit
<i>Lehkou vodou chlazené a grafitem moderované reaktory (RBMK)</i>	16	10,4	Obohacený UO_2	Voda	Grafit
<i>Rychlé množivé reaktory (FBR)</i>	1	0,6	Směs UO_2 a PuO_2	Tekutý sodík	Bez moderátoru

Tab. 3.1 Přehled dnes provozovaných energetických jaderných reaktorů [12]

Většina dnes provozovaných reaktorů uvedených v tabulce jsou reaktory převážně druhé generace. Ty jsou vesměs pouze vylepšenými energetickými reaktory první generace, za kterou se označují prototypové jednotky, na kterých se ověřovala možnost jaderné výroby elektrické energie.

Dnes stavěné reaktory spadají do generace III, nebo generace III+, stále se však jedná pouze o ověřené reaktory druhé generace, u kterých byly zlepšeny jejich užité a zvláště bezpečnostní vlastnosti. Jejich vývoj se omezil na postupné zdokonalování lehkovodních reaktorů PWR a BWR. S vývojem dalších se již nepočítá, jedinou výjimkou je úspěšný těžkovodní typ reaktoru CANDU, který je nadále vyvíjen a s výstavbou třetí generace těchto reaktorů se počítá v Kanadě, zemi původu, a exportních zemích Indii, Argentíně a Jižní Koreji.

Revoluční změny a uvedení nových typů reaktorů má nastat s příchodem jejich IV. generace. První reaktory této generace by měly být připraveny na uvedení do provozu mezi lety 2020 až 2030, kdy bude většina z dnes provozovaných reaktorů dosluhovat. Mělo by se jednat převážně o rychlé reaktory, které jsou schopné produkovat štěpný materiál v množivé zóně, chlazené látkami, které lze provozovat za

vysokých teplot (tekuté kovy, plyny, roztavené soli). Podrobnější popis reaktorů 4. generace uvedeme v kapitole 11.

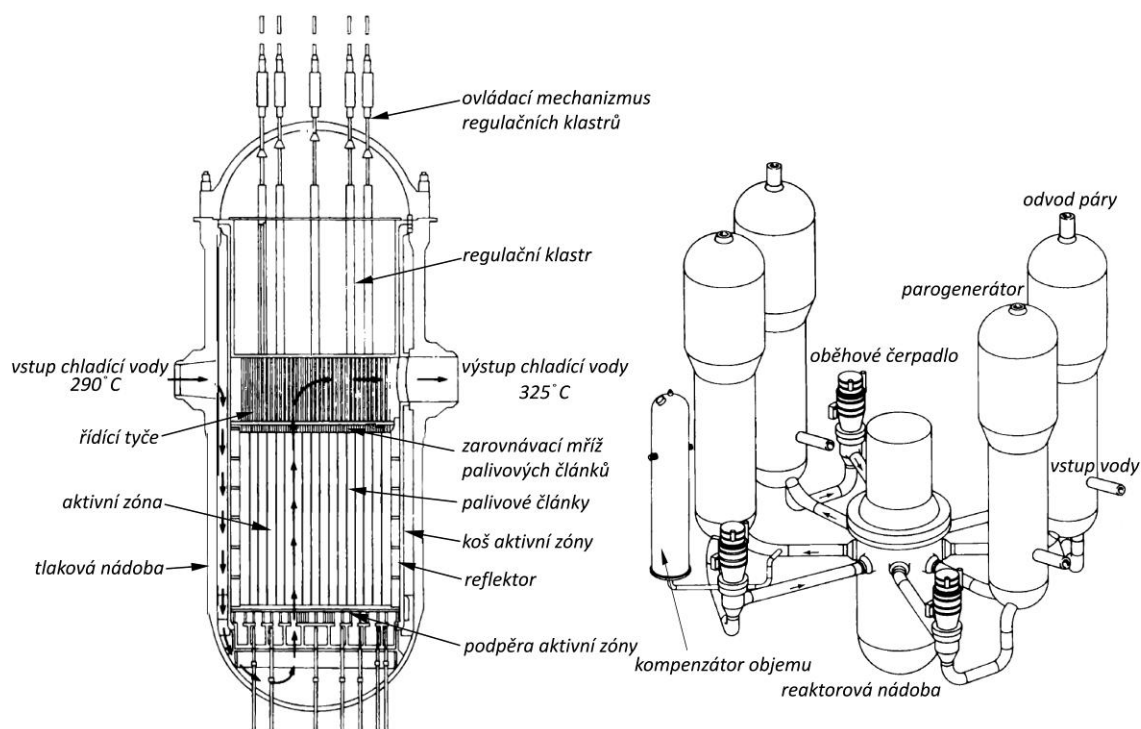
Další část této studie bude zaměřena na popis výše uvedených typů reaktorů 2. generace.

4 TLAKOVODNÍ REAKTORY MODEROVANÉ A CHLAZENÉ LEHKOU VODOU (PWR A VVER)

Jedná se o nejrozšířenější typ energetického reaktoru, který ke chlazení i moderaci využívá obyčejnou vodu. Označení PWR se používá pro západní koncepci tlakovodního reaktoru. Na jeho vývoji se podílely západní země, zejména USA, kde byla v roce 1957 uvedena do provozu první prototypová jaderná elektrárna s tímto reaktorem. Ten byl původně vyvíjen jako pohon jaderné ponorky. První komerční elektrárnou byla americká elektrárna YanKee o výkonu 134 MWe spuštěná v roce 1961. Vývoj východního provedení reaktoru probíhal odděleně v Sovětském svazu pod označením VVER. Konstrukčně se koncepce PWR od VVER příliš neliší. Reaktory VVER pod označením VVER-440 o výkonu 440 MWe od západní koncepce odlišovala konstrukce palivových článků, primárního okruhu a regulačních prvků. S příchodem druhé generace reaktorů VVER-1000 o výkonu 1000 MWe došlo ke sblížení konstrukcí. Podstatným rozdílem zůstalo hlavně odlišné uspořádání palivových tyčí a použití horizontálních parogenerátorů místo vertikálních, používaných u západního provedení. Reaktory typu VVER pracují také v našich jediných dvou jaderných elektrárnách. Typ VVER-440 se nachází v jaderné elektrárně Dukovany a typ VVER-1000 v jaderné elektrárně Temelín. [6, 5]

4.1 Konstrukce reaktoru

Tělo reaktoru tvoří tlaková nádoba, která musí za provozu odolat vnitřnímu přetlaku, vysoké teplotě a intenzivnímu záření. Je vyrobená ze svařených kovaných prstenců, dna a snímatelného víka. Víkem reaktoru jsou vedeny nátrubky řídicích tyčí. Prstenec s hrdly pro připojení potrubí chladicích okruhů je umístěn zhruba jeden metr nad aktivní zónou reaktoru, při poškození potrubí a úniku chladicí vody by tak aktivní zóna reaktoru zůstala stále zatopena. Tlaková nádoba je obvykle vyrobena z nízkolegované uhlíkové oceli, a proto je na vnitřní stěny navařena nerezová vystýlka. Aktivní zóna je umístěna v koši aktivní zóny, který je zavěšen v místě příruby víka tlakové nádoby, a je centrována radiálními podpěrami. Mezi aktivní zónou a stěnou nádoby je umístěno stínění, které zamezuje jejímu radiačnímu poškození. Vnitřní zařízení tlakové nádoby, pohony systému řízení, regulace a ochrany reaktoru jsou z důvodů kontroly vnitřního povrchu vyjímatelné.



Obr. 4.1 Schéma tlakovodního reaktoru a uspořádání smyček primárního okruhu

U tlakovodních reaktorů je chladivem i moderátorem obyčejná voda, ta je sice nejlepším moderátorem neutronů, ale zároveň je i dosti pohlcuje (silný absorbátor). Proto musí být palivové elementy umístěny co nejbližší u sebe. Aktivní zónu reaktoru tvoří soubor těsně kruhově uspořádaných palivových kazet složených z několika set palivových tyčí. U západního provedení je palivová kazeta čtvercová a palivové tyče jsou uspořádány ve čtvercové mříži. Palivové kazety reaktorů VVER jsou šestihranné s palivovými tyčemi v trojúhelníkové mříži. Při daném rozmístění je průřez aktivní zónou tvořen těsnou mříží palivových tyčí o rozteči 12-13 mm. Vzhledem k rozteči palivových tyčí nelze u tlakovodních reaktorů umístit absorbátory pro řízení reaktivity mezi palivové kazety. Proto je v každé palivové kazetě přibližně 20 palivových tyčí nahrazeno vodíci trubkami. Ty vytváří spolu s nosnými, vodíci a distančními mřížkami nosný skelet palivové kazety. Do nich se zavádějí absorbční tyče. Ty jsou připojeny ke společnému náboji, který je zavěšen na pohyblivé tyči, a tvoří jeden regulační soubor neboli klastr. Regulace reaktoru se provádí změnou polohy vybraných klastrů, zasunutím nebo vysunutím z palivové kazety. Samotná palivová tyč má průměr okolo 10 mm a délku 3-4 m. Tvoří ji tenkostěnná trubka ze slitiny zirkonu (Zircaloy), ve které se nacházejí palivové tablety. Trubku zakončují tvarované koncovky pro vložení do nosných mříží palivové kazety. K zamezení pohybu palivových tablet v tyči slouží ve vrchní části trubky umístěná pružina, která je stlačuje a zároveň vytváří prostor pro hromadění plynných štěpných produktů. Vnitřní prostor palivové tyče je vyplněn héliem o přetlaku 300 až 700 kPa kvůli lepšímu sdílení tepla mezi palivovými tabletami a stěnou trubky a menší deformaci trubky vnějším tlakem. Vzhledem k většímu zachytu neutronů v moderátoru musí být palivo obohaceno. Používají se tablety o průměru 8 mm a výšce 8-10 mm ze sloučeniny UO_2 . Obohacení uranu je 3,5-4% podle toho, v jaké části palivové tyče se tableta nachází. [5]

4.2 Primární a sekundární okruh tlakovodního reaktoru

Uspořádání jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem je dvouokruhové. Primární okruh může být radioaktivní, odvádí teplo z reaktoru a předává ho sekundárnímu okruhu v parogenerátoru. V něm se vyrábí pára pracovního sekundárního okruhu, která pohání turbínu.

Chladicí voda o teplotě přibližně 290 °C se přivádí do reaktoru vstupními hrdly, proudí mezikružím mezi aktivní zónou a stěnou reaktoru směrem dolů, kde se proud vody obrací. Tok chladicí vody je veden skrze aktivní zónu směrem vzhůru a ochlazuje palivové tyče. Chladicí voda se přitom zahřívá na mez sytosti, které při tlaku kolem 16 MPa odpovídá teplota přibližně 325 °C. Vystupuje z reaktoru výstupními hrdly a je vedena do parogenerátoru. Zde předává odvedené teplo sekundárnímu okruhu, ochlazuje se a přes cirkulační čerpadlo proudí zpět do reaktoru. Ke chlazení reaktoru slouží několik takovýchto smyček. Západní reaktory mívají dvě, tři nebo čtyři smyčky s vertikálními parogenerátory. Reaktory VVER-1000 mají čtyři smyčky nebo v případě VVER-440 smyček šest, každá s horizontálním parogenerátorem. Nedílnou součástí primárního okruhu je také kompenzátor objemu, ten vytváří potřebný tlak vody v okruhu a udržuje ho v závislosti na její teplotě.[3, 8]

Sekundární okruh tvoří parní část parogenerátoru, kde se vyrábí neradioaktivní pára, parní turbína, kondenzátor a čerpadlo. Parametry vyrobené páry určuje výstupní teplota chladiwa z reaktoru. U tlakovodních reaktorů se výstupní teplota vody pohybuje kolem 325 °C. Pro danou teplotu je možné vyrobit v parogenerátoru sytou páru o tlaku kolem 5 MPa, nebo páru mírně přehřátou o 50 až 60 °C, ale pouze o tlaku 4,5 MPa. Z důvodů vyšší termické účinnosti, která je lepší u oběhu s vyšším tlakem páry, se vyrábí v parogenerátoru pára sytá o parametrech přibližně 5 MPa/290 °C. S použitím syté páry o středním tlaku pro pohon turbíny nastává problém zejména s vysokou vlhkostí páry po expanzi, který byl již vícekrát zmíněn v předešlých kapitolách. Proto se pára po průchodu vysokotlakou částí turbíny upravuje. Zejména z důvodů nízkých parametrů vstupní páry není účinnost termodynamického cyklu příliš vysoká a pohybuje se kolem 32 až 33 %. Pokud se jedná o jmenovité výkony reaktorů, ty od doby jejich uvedení postupně rostly a ustálily se na hodnotách kolem 1000-1300 MWe. [3, 8]

5 VARNÉ REAKTORY MODEROVANÉ A CHLAZENÉ LEHKOU VODU (BWR)

Konstrukce varného reaktoru je značně podobná konstrukci tlakovodní. Moderátorem a chladičem aktivní zóny zůstává obyčejná voda, která se ale v aktivní zóně vypařuje a vyrobená pára je z reaktoru vedena přímo na turbínu. Jedná se tedy o jednokruhové uspořádání bez použití parogenerátoru. Rozdílné je uspořádání tlakové nádoby reaktoru a rozvržení paliva. Z důvodu nižší moderace a absorpce neutronů vodní párou, je možné řidčeji rozmístit palivové tyče v aktivní zóně a absorbátory umístit mezi ně. Palivové kazety jsou čtvercové se čtvercovou mříží palivových tyčí, konstrukčně podobných těm tlakovodním. K řízení výkonu reaktoru slouží řídicí tyče křížového průřezu, které se zasouvají mezi palivové články. Jsou složeny z nerezových plechů se zapuštěnými tyčemi absorbátorů z karbidu bóru B₄C. Na rozdíl od tlakovodních reaktorů je tlaková nádoba varného reaktoru konstruována na nižší tlak.

Ve vrchní části tlakové nádoby nad aktivní zónou jsou umístěny separační aparáty na odstranění přebytečné vlhkosti z páry. Z tohoto důvodu se vstupy pro řízení reaktoru umístily na jeho dno.[4, 5]

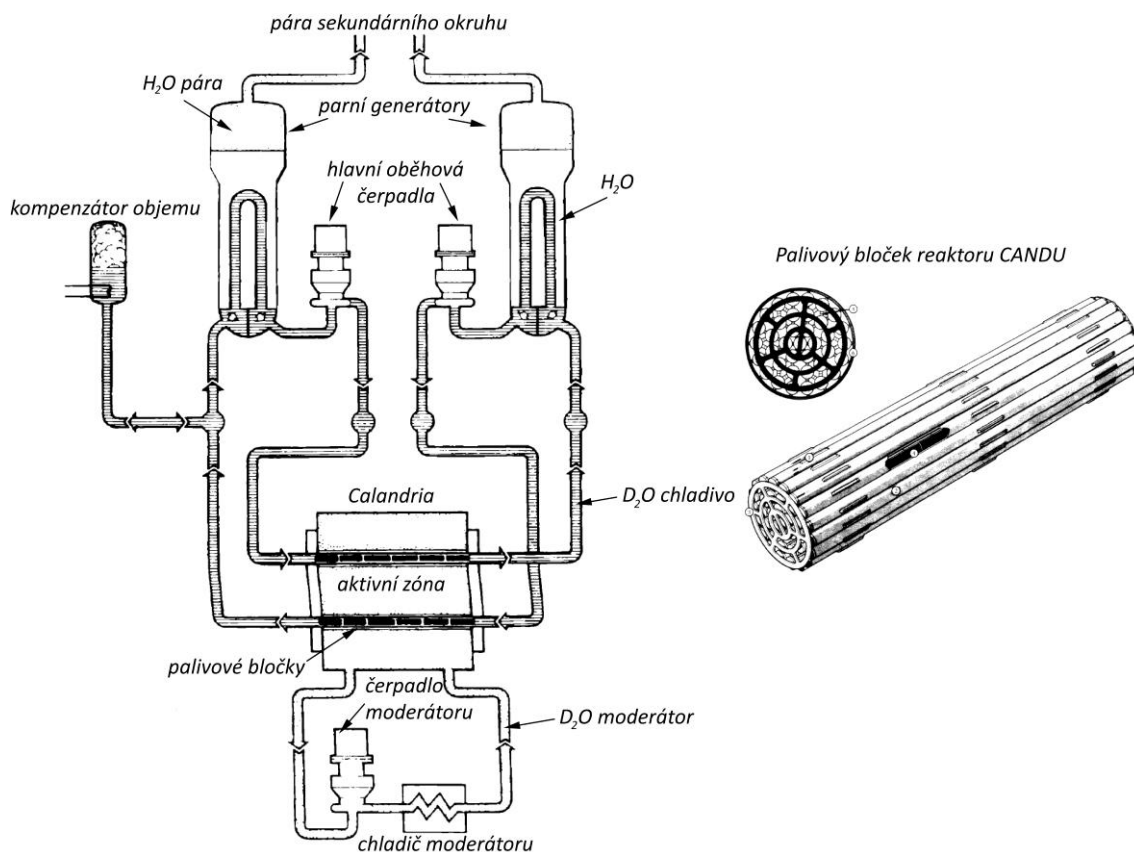
5.1 Výroba páry ve varném reaktoru

Chladicí voda vstupuje do reaktoru vstupními hrdly. U starších provedení reaktoru byla nucená cirkulace vody zajištěna vnějšími oběhovými čerpadly. S vývojem jeho konstrukce se přešlo k umístění oběhových čerpadel pouze uvnitř tlakové nádoby. Ty se nachází mezi košem aktivní zóny a stěnou tlakové nádoby. Zlepšení cirkulace také přispělo ke zvýšení jednotkového výkonu reaktoru až nad 1000 MWe. Chladicí voda je po vstupu do reaktoru smíchána se separovanou vodou a zabudovanými čerpadly je hnána do spodní části reaktoru. Proudí nahoru skrze aktivní zónu, kde moderuje neutrony a odvádí teplo z palivových tyčí a regulačních článků. V prostoru aktivní zóny se chladicí voda vaří a vzniklá pára se shromažďuje nad aktivní zónou. Proudí nejdříve přes parní separátor, kde se zbavuje části přebytečné vlhkosti, její vlhkost se sníží přibližně na 5 %. Potom vstupuje do sušiče páry, kde se zbaví i zbylé vlhkosti. Výstupní pára z reaktoru má vlhkost přibližně 0,1 %, tlak 6,5-7 MPa a teplotu 290 °C. Je dále vedena na turbínu, kde koná práci. Pára vyrobená ve varném reaktoru má podobné parametry jako pára sekundárního oběhu tlakovodních reaktorů, jedná se také o sytou páru a s ní spojené problémy s vlhkostí páry při expanzi. Účinnost oběhu se pohybuje kolem 33-34 %.[3, 8]

6 TLAKOVODNÍ REAKTORY CHLAZENÉ A MODEROVANÉ TĚŽKOU VODOU (HWPR)

V minulosti se objevilo mnoho konstrukčních řešení těžkovodních reaktorů, které byli vyvíjeny zejména za účelem využití přírodního neobohaceného uranu. Ve velké konkurenci se dokázal prosadit pouze kanadský typ kanálového těžkovodního reaktoru pod označením CANDU. Jeho název je zkratkou Canadian Deuterium Uranium. Vývoj reaktoru CANDU probíhal v Kanadě, posléze byl vyvážen zejména do rozvojových zemí.

Reaktor CANDU je moderován i chlazen těžkou vodou (D_2O), z důvodu lepších moderačních účinků je těžkovodní okruh moderátoru konstrukčně oddělen od okruhu chladicího. Aktivní zónu reaktoru tvoří ocelová tenkostěnná válcová nádoba nazývaná Calandria, která je vyplněna těžkovodním moderátorem. Nádobou procházejí horizontální tlakovodní kanály ze slitiny zirkonu s dvojitou stěnou vyplněnou dusíkem. Dusík tepelně izoluje horké chladivo palivových článků od moderátoru. V tlakových kanálech jsou uloženy krátké palivové články, nazývané také bločky. Palivový článek je složen z 28 konstrukčně spojených palivových tyčí. Palivová tyč je vyrobena z tenkostěnné zirkonové trubky o vnějším průměru 13mm vyplněné palivovými tabletami. Těžká voda umožňuje díky svým příznivým moderačním vlastnostem spalovat v reaktoru přírodní neobohacený uran. Používají se keramické palivové tablety. Konstrukce reaktoru umožňuje kontinuální výměnu paliva za provozu, a to pomocí dvou speciálních zavážecích strojů na čelech nádoby reaktoru. Regulace reaktoru se provádí změnou koncentrace kyseliny borité v těžké vodě a absorpčními tyčemi.[5]



Obr. 6.1 Schéma uspořádání a chlazení reaktoru CANDU a palivový bloček

Jedná se opět o dvouokruhové uspořádání jaderné elektrárny. Chlazení aktivní zóny reaktoru zajišťují dvě nebo čtyři oddělené smyčky. Každá smyčka má svůj horizontální parogenerátor a oběhové čerpadlo. Tlak vody v primárním okruhu se pohybuje kolem 10 MPa, teplota vody před vstupem do tlakových kanálů je zhruba 250 °C. Po průchodu reaktorem se ohřívá na 300 °C a vede se do parogenerátorů. Vlastní chladicí okruh má i těžkovodní moderátor, který se musí udržovat na stálé teplotě 60 °C. Parametry páry vyrobené v parogenerátoru jsou špatné z důvodu dosti nízké teploty chladiwa primárního okruhu. Tlak páry je přibližně 4,6 MPa a teplota 260 °C, tomu také odpovídá termická účinnost oběhu, která se v případě reaktorů CANDU blíží 31,5 %. Hlavním nedostatek těžkovodního typu reaktoru zůstává nutnost zajistit dostatek těžké vody pro jeho uvedení a následné udržení v provozu.[3, 8]

7 PLYNEM CHLAZENÉ GRAFITEM MODEROVANÉ REAKTORY (GCR)

S vývojem reaktorů chlazených plynem se započalo již v padesátých a šedesátých letech minulého století, zejména ve Velké Británii a ve Francii. Do stádia komerčního využití dospěl vývoj pouze ve Velké Británii, kde byl vyvinut plynem chlazený reaktor pod označením MAGNOX. Jedná se o reaktor chlazený CO₂, moderovaný grafitem a spalující přírodní uran. Typickým znakem tohoto reaktoru je aktivní zóna složená z bloků grafitu, palivo ve formě tyčí je umístěno v kanálech procházejících aktivní zónou. Chladicí plyn je vháněn dmychadly do kanálů a chladí palivové články. Za

nevýhody reaktoru lze označit - velké rozměry aktivní zóny, nízký jednotkový výkon, velký podíl čerpací práce a napjatou neutronovou bilanci. Snaha o zlepšení zejména výstupních parametrů chladiva vyústila v uvedení druhé generace plynem chlazených reaktorů AGR.

Výhody reaktorů AGR se opírají o konstrukční vylepšení palivových článků a zlepšení celkového uspořádání reaktoru. S požadavky kladenými na vyšší teplotu chladiva se přešlo na keramické palivové tablety, které jsou uzavřeny v nerezové ocelové tenkostěnné trubce se žebry o průměru 15 mm. Vzhledem k vyšší absorpci neutronů v obalové trubce muselo dojít k přechodu na mírně obohacené palivo s obohacením 2,3 %. Samotný palivový článek (bloček) se skládá z 36 konstrukčně spojených palivových tyčí zasunutých v dvouplášťové grafitové trubce. V aktivní zóně je několik takovýchto bločků umístěných nad sebou. Aktivní zóna je uložena na nosné ocelové mříži, obklopena je reflektorem a tepelným stíněním. Reaktory tohoto typu jsou takzvaného integrálního provedení. Celý primární okruh je umístěn v nádobě z předepjatého betonu, v mezikruhovém prostoru mezi aktivní zónou a betonovou obálkou jsou umístěny parogenerátory, dmychadlo a další zařízení primárního okruhu. Regulační tyče a kanály pro výměnu paliva vystupují z horní části aktivní zóny a procházejí betonovou obálkou.[5]

Oběh chladicího plynu zajišťuje dmychadlo umístěné ve spodní části reaktoru, nasává plyn ze společné části pod parogenerátory a vhání ho do rozváděcí komory pod aktivní zónou. Část chladicího plynu proudí palivovými kanály a odebírá teplo palivovým bločkům, část chladí stínění reaktoru. Nad každým palivovým kanálem je umístěna clona, která souží k regulaci proudu chladiva v palivovém kanálu. Ohřátý oxid uhličitý o tlaku 4,3 MPa a teplotě 650 °C vystupuje z palivových kanálů a proudí přes postranní parogenerátory, kde vyrábí páru. Ochlazený je opět nasáván dmychadlem. Vzhledem k vysoké teplotě chladicího plynu může být v sekundárním parním okruhu vyrobena přehřátá pára o vysokých parametrech. Tlak páry až 16 MPa a teplota 540 °C odpovídají parametrům parního oběhu fosilních elektráren, vysoká je také termická účinnost oběhu, která se pohybuje kolem 40 %.[3, 8]

8 LEHKOU VODOU CHLAZENÉ A GRAFITEM MODEROVANÉ REAKTORY (LWGR)

Vývoj grafitem moderovaných a vodou chlazených reaktorů probíhal převážně v bývalém SSSR. Jedná se o varnou koncepci reaktoru s tlakovými kanály. A jejím hlavním představitelem je řada reaktorů pod označením RBMK. Aktivní zóna těchto reaktorů je složena z grafitových bloků se svislými otvory pro tlakové kanály a absorpční tyče. Celá aktivní zóna stojí na svařené konstrukci a je uzavřena v ocelové nádobě vyplněné směsí dusíku a hélia, nádoba slouží k biologické ochraně a směsice plynů chladí grafitový moderátor. Grafitovými bloky prochází technologické kanály s délkou až 22 m. Ta část kanálu, procházející aktivní zónou, je vyrobena ze slitiny zirkonu, zbývající část je z nerezové oceli. Každý technologický kanál je připojen k separátoru páry a rozváděcí komoře napájecí vody. Jsou v něm nad sebou zavěšeny dva palivové články s palivovými tyčemi ze slitiny zirkonu. Reaktor je chlazen vodou a aktivní zóna obsahuje velké množství konstrukčního materiálu, proto musí být palivo obohaceno. Do palivových tyčí se vkládají tablety UO_2 s obohacením uranu 1,8-2 %.

Systém chlazení reaktoru je jednookruhový, primární okruh tvoří zpravidla dvě smyčky, každá obsahuje bubnový separátor páry a několik oběhových čerpadel. Voda je vháněna do jednotlivých technologických kanálů, v kterých proudí ze zdola nahoru, ochlazuje palivové články, ohřívá se na mez sytosti a vaří se. Dál proudí tlakovým kanálem do bubnového separátoru, kde se zbavuje přebytečné vlhkosti. Ze separátoru je sytá pára vedena na turbínu. Vstupní parametry páry se v případě reaktorů RBMK pohybují okolo tlaku 7 MPa a teploty 285 °C. S tímto typem reaktoru byla realizována i myšlenka jaderného přehřívání páry. Za tímto účelem byly na jaderné elektrárně v Bělojarsku postaveny dva prototypové reaktory, ve kterých byla část technologických kanálů upravena a sloužila k přehřívání páry. V nich bylo možné vyrábět přehřátou páru o tlaku 10,2 MPa a teplotě 520 °C. Takto vysoké parametry páry umožnily použít běžných turbín užívaných ve fosilních blocích. K výhodám kanálového provedení reaktoru patří bezesporu možnost výměny paliva zavážecím strojem za plného výkonu. Odpadá také nákladná výroba a složitá doprava tlakové nádoby. Tyto přednosti ale kompenzuje značně složitý systém rozvodu chladiva pod i nad reaktorem.[5, 8]

S ohledem na výše uvedené parametry primárního okruhu i samotné konstrukční řešení se daný typ reaktoru jeví jako zdařilý. Zejména velké rozměry aktivní zóny a kombinace dvou moderátorů, grafitu a vody, vyžadují složité řízení. Při nadměrném vývinu páry má reaktor kladný výkonový koeficient, což vedlo i ke známé černobylské havárii. Z těchto důvodů byl vývoj i výstavba reaktorů RBMK předčasně ukončen. V provozu zůstaly pouze již provozované reaktory, u kterých se provedly určité úpravy zvyšující jejich bezpečnost.

9 RYCHLÉ MNOŽIVÉ REAKTORY (FBR)

Jak již název napovídá, jedná se o reaktory, ve kterých štěpení probíhá rychlými neutrony. To znamená, že neutrony nejsou zpomalovány a reaktor pracuje bez moderátoru. Jako paliva nelze použít přírodního nebo mírně obohaceného uranu, jak bylo uvedeno v kapitole 3.2.2. V reaktoru se štěpí vysoce obohacený uran nebo směs uranu a plutonia. Zřejmě největší předností rychlých reaktorů je schopnost v množivé zóně reaktoru produkovat nový štěpný materiál, dokonce i více štěpného materiálu než je jejich spotřeba. Do budoucna by měly zajistit takzvanou rozšířenou reprodukci jaderného paliva pro zásobování nebo výstavbu nových reaktorů. Z experimentálních a prototypových rychlých reaktorů dospěl do stádia komerčního využití zatím pouze rychlý množivý reaktor chlazený tekutým sodíkem (LMFBR). Jeho prototypové jednotky velkých výkonů byly vyvinuty v Anglii - reaktor PFR, Francii - reaktory Phénix a Super Phénix a Rusku - řada reaktorů BN 350 a BN 600. Konstrukčním provedením se příliš neliší, mají společné sodíkové chlazení a tříokruhové uspořádání jaderné elektrárny. Dnes jediným provozovaným reaktorem je typ BN 600 na třetím bloku Bělojarské jaderné elektrárny v Rusku a ve výstavbě je zde čtvrtý blok s reaktorem BN 800. Z tohoto důvodu bude popis omezen pouze na ruský typ reaktoru LMFBR. [5]

Aktivní zónu rychlého reaktoru tvoří několik set šestibokých palivových článků s palivovými tyčemi uspořádanými v trojúhelníkové mříži. Svým rozvržením připomíná aktivní zónu tlakovodního reaktoru VVER. Každý palivový článek obsahuje několik stovek palivových tyčí z nerezové oceli o průměru 7 mm s tabletami se směsí vysoce obohaceného UO_2 a PuO_2 . Jedná se o směsné kyslíčnickové palivo MOX (mixed oxid

fuel). Aktivní zóna je obestavěna palivovými články množivé zóny, které se chovají jako reflektor, ty obsahují přírodní nebo ochuzený uran. V množivé zóně během provozu vzniká plutonium.[5]

Volba chladiva v případě rychlých reaktorů není snadná, na chladivo jsou kladeny požadavky na intenzivní odvod tepla z aktivní zóny a zároveň nesmí mít moderační účinky. Z těchto důvodů se používají ke chlazení rychlých reaktorů tekuté kovy, zejména sodík. Jednou z jeho výhod je i vysoký bod varu při atmosférickém tlaku 883 °C, proto také celá koncepce reaktorů a chladících smyček může být nízkotlaká. Naopak zásadní nevýhodou sodíku je jeho velká afinita ke kyslíku, která se projevuje bouřlivou chemickou reakcí se vzduchem, vodou nebo vodní párou. Rychlé reaktory mají převážně integrální uspořádání primárního okruhu, to znamená, že aktivní zóna, množivá zóna, tepelné výměníky a oběhová čerpadla primárního okruhu jsou uloženy v jedné reaktorové nádobě zaplněné sodíkem. Parametry primárního okruhu, který zajišťuje chlazení aktivní i množivé zóny reaktoru jsou - vstupní teplota sodíku přibližně 380 °C, výstupní až 550 °C. Mezi primární sodíkový a pracovní parní okruh je vložen sodíkový okruh, který je za normálních okolností neaktivní a slouží pouze k oddělení a ochraně primárního okruhu a reaktoru před důsledky selhání parních generátorů. Vysoká teplota sodíku, na kterou je v reaktoru zahříván, umožňuje výrobu páry o parametrech shodných s parametry fosilních bloků. Další výhodou také je to, že mohou být použity stejné turbíny jako ve fosilních elektrárnách. S tlakem páry 16 až 18 MPa a teplotou přes 500 °C se termodynamická účinnost oběhu pohybuje kolem 40%.[3, 8]

V současné době se rychlé reaktory stále ještě nevypořádaly s technickými problémy, jejichž řešení je podstatně obtížnější než u tepelných reaktorů. Hlavní problémy rychlých reaktorů jsou - odlišná kinetika a dynamika reaktoru, tvrdé neutronové spektrum, vyšší dávky ozáření paliva a konstrukčních materiálů nebo vyšší teploty reaktoru a sodíkové chlazení. I přes tyto problémy bude zájem o vývoj a výstavbu nových rychlých množivých reaktorů vzrůstat, jelikož otevírají cestu k využití veškerých zásob uranu.

10 NASTUPUJÍCÍ GENERACE ENERGETICKÝCH REAKTORŮ

V současnosti budované reaktory patří do generace III, nebo generace III+. Jedná se o osvědčené, ale stále pouze vylepšené typy reaktorů druhé generace. Konkrétně tlakovodní reaktory (PWR), varné reaktory (BWR) a těžkovodní reaktory typu CANDU. Přesně zařadit typ reaktor do určité generace nelze. Od předešlé druhé generace je odlišují následující přednosti. Reaktory jsou zcela standardizovanými typy s životností minimálně 60 let. Reaktory mají lepší užitné vlastnosti, jednodušší ale zároveň robustnější konstrukci. U reaktorů této generace je docíleno vyššího vyhoření paliva ve snaze prodloužit interval jeho výměny a omezit množství radioaktivního odpadu. Hlavní předností reaktorů této generace má být bezpečnost. Řešení poruchy nebo havárie reaktoru mají vyřešit pasivní bezpečnostní prvky, které pracují na přírodních fyzikálních zákonech, bez nutného lidského, elektrického nebo mechanického zásahu. U některých typů reaktorů kombinované s vylepšenými prvky aktivní ochrany.[10]

Od reaktorů této generace nelze očekávat výraznější zlepšení termické účinnosti parního oběhu. Mezních parametrů chladiva (teplota a tlak), které předurčuje koncepce a konstrukce reaktoru, bylo dosaženo už u reaktorů druhé generace. Má pouze dojít k výrobě standardizovaných reaktorů převážně vyšších jednotkových výkonů. Některé typy reaktorů jsou v provozu. Vývoj ostatních byl dokončen a nyní se provádí jejich výstavba nebo certifikace. Vybrané typy reaktorů III. generace a generace III+ jsou uvedeny níže v tab. 10.1.

<i>Generace III</i>				
<i>Označení reaktoru</i>	<i>Typ reaktoru</i>	<i>Výrobce</i>	<i>Palivo</i>	<i>Elektrický výkon</i>
ABWR (Advanced Boiling Water Reactor)	BWR	GE a Hitachi	MOX (směsné palivo)	1380 MWe
CANDU-6	HPWR	AECL (Atomic Energy of Canada Limited)	Přírodní UO ₂	750 MWe
AP600	PWR	Westinghouse	UO ₂ obohacení 2-4%	600 MWe
<i>Generace III+</i>				
EPR (European Pressurized Reactor)	PWR	AREVA	UO ₂ nebo MOX	1630-1750 MWe
AP1000	PWR	Westinghouse	UO ₂ obohacení 1,5-2 %	1080-1200 MWe
ASE-2006 (MIR-1200)	PWR	Atomstroyexport a Gidropress	UO ₂ obohacený	1198 MWe
APWR (Advanced Pressurized Water Reactor)	PWR	Westinghouse a Mitsubishi	UO ₂ obohacený	1500 MWe
ACR1000	HPWR	AECL (Atomic Energy of Canada Limited)	UO ₂ obohacení (1,5-2)%	1080MWe
ESBWR (Economist Simplified Boiling Water Reactor)	BWR	GE Hitachi Nuclear Energy	UO ₂ obohacený	1535 MWe

Tab. 10.1 Přehled vybraných reaktorů generace III a generace III+, informace v tabulce byly čerpány z [17]

S použitím reaktoru generace III+ se počítá i v plánovaném 3. a 4. bloku jaderné elektrárny Temelín. Vzhledem k dlouholetým zkušenostem české energetiky s reaktory typu PWR se bude jednat o nejvyspělejší generaci těchto reaktorů. Do výběrového řízení

na dodavatele reaktorových bloků se přihlásila trojice firem. Společnost AREVA se svým reaktorem EPR byla pro nesplnění podmínek z tendru vyřazena. Nadále se rozhoduje mezi reaktorem ASE-2006 (koncorcium MIR-1200), odvozeným od reaktoru VVER-1000, který vyvinuly ve spolupráci firmy Atomstroyexport a Gidropress a reaktorem AP 1000 společnosti Westinghouse. Vítěz tendru by se měl být znám v září 2013.[13]

11 REAKTORY 4. GENERACE

Nejprve je nutné zmínit, že za reaktory 4. generace lze označit šestici reaktorů, vybraných na základě mezinárodní iniciativy „Generation IV. International Forum“. Z velkého počtu zajímavých a pokrokových koncepcí reaktorů byly vybrány reaktory, od kterých se očekává, že budou nejlépe plnit budoucí požadavky světové energetiky. Reaktory 4. generace jsou v různých stádiích vývoje a většina z nich nedospěla ani do stádia prototypového testování. Oblastí jejich využití nemá být pouze výroba elektrické energie, ale uvažuje se s jejich nasazením při výrobě vodíku nebo jako zdroj procesního tepla. Formou mezinárodní spolupráce při vývoji by měl být alespoň nějaký typ reaktoru schopný nasazení mezi lety 2020 až 2030, kdy bude většina z dnes provozovaných reaktorů dosluhovat.

Chladičem aktivní zóny reaktorů IV. generace by měly být látky schopné provozu za vysokých teplot. Zejména tekuté kovy, plyny, ale i roztavené soli nebo nadkritická voda. Vyšší teplota chladiwa reaktoru umožní zvýšit termickou účinnost pracovního oběhu elektrárny. Výrobu elektrické energie by měl zajistit Rankin-Clausiusův oběh s přehřátou párou nebo nadkritický Rankin-Clausiusův oběh. Ty se dnes používají v běžných fosilních elektrárnách. Dále se uvažuje o jaderných elektrárnách s Braytonovým oběhem s héliem nebo nadkritickým CO_2 .

11.1 Vysokoteplotní reaktor (VHTR)

Jedná se o plynem chlazený, grafitem moderovaný reaktor, který navazuje na projekt reaktorů HGTR a AGR, s kterými by měl mít společné některé rysy. Aktivní zóna má obsahovat palivo ve formě prizmatických bloků nebo palivových koulí. Chladičem reaktoru je hélium s výstupní teplotou více než 1000 °C. Od reaktoru se očekává, že bude využíván pro výrobu elektrické energie, výrobu vodíku nebo jako zdroj tepla pro průmyslové komplexy. Výroba elektrické energie by měla probíhat v sekundárním parním oběhu nebo přímo héliovým Braytonovým oběhem.

11.2 Reaktor chlazený tekutými solemi (MSR)

Je zajímavou koncepcí reaktoru, kde palivo (štěpné a plodící materiály) je rozpuštěno v roztavené soli, která plní funkci chladiwa reaktoru. Novodobý projekt navazuje na program Molten Salt Reactor Experiment, který pracoval na vývoji reaktoru pro pohon bombardéru a na kterém se již ověřilo použití této technologie. Koncepce reaktoru je tříokruhová, a to z důvodu ochrany a zamezení možného úniku radioaktivní roztavené soli s palivem primárního okruhu. Uvažuje se o vloženém oběhu s roztavenou solí. Primární okruh je provozován na atmosférickém tlaku a výstupní teplota chladiwa se pohybuje od 565 °C do 700 °C. Původně měl výrobu elektrické energie zajistit parní oběh, ale v současnosti se spíše uvažuje o Braytonově oběhu s héliem nebo nadkritickým CO_2 .

11.3 Rychlý sodíkem chlazený reaktor (SFR)

Vývoj reaktorů navazuje na zkušenosti s prototypy rychlých sodíkem chlazených reaktorů, zejména na ruské reaktory BN a francouzský Super Phénix. Přebírá jejich konstrukci a snaží se odstranit hlavní nedostatky, které brání masovému nasazení. Zejména je nutné snížit stavební náklady a vyvinout technologii výroby oxidického paliva. I přes uvedené nedostatky zůstává SFR reaktor nejvíce vyvinutým typem reaktoru 4. generace.

11.4 Rychlý olovem chlazený reaktor (LFR)

Chladičem reaktoru je roztavené olovo nebo eutektická slitina olovo-vismut. Reaktory mají rychlé štěpné spektrum a uzavřený palivový cyklus. Výstupní teplota chladiče z reaktoru je 500 °C v případě výroby elektrické energie nebo 800 °C pro využití tepla k výrobě vodíku. Ve výzkumu je také zajímavý způsob výroby páry. Pára sekundárního okruhu by měla být vyráběna nástřikem vody přímo na primární chladič reaktoru, bez použití parogenerátoru. Výrobu elektrické energie má zajistit přímý Rankin-Clausiusův oběh s přehřátou párou nebo nadkritickou párou, případně Braytonův oběh.

11.5 Plynem chlazený rychlý reaktor (GFR)

Má být variantou rychlého reaktoru chlazeného plynem, původní návrh počítal s heliovým chlazením, nyní se jeví jako reálnější chlazení CO₂. Palivem reaktoru by měly být broky z keramického kompozitu s obsahem U a Pu. V případě heliového chlazení se počítalo s tlakem primárního okruhu 9 MPa a výstupní teplotou hélia 870 °C. Tyto parametry primárního okruhu předurčují reaktor k výrobě elektrické energie Braytonovým oběhem s vysokou účinností, případně k výrobě vodíku nebo využití tepla k průmyslovým účelům.

11.6 Reaktor chlazený nadkritickou vodou (SCWR)

Principiálně se jedná o varné provedení reaktoru, uvažuje se o provedení s tlakovou nádobou i tlakovými kanály. Aktivní zóna reaktoru může mít podle konstrukce tepelné i rychlé neutronové spektrum. Chladičem reaktoru je voda provozovaná nad kritickým bodem přibližně 22 MPa/374 °C. Na vstupu do reaktoru se předpokládá teplota chladiče okolo 280 °C. Po průchodu reaktorem se teplota zvýší na 510 °C, superkritická voda se bez varu přemění na páru. Odpadá tak nutnost zařazovat do oběhu separátory a sušiče páry. Páru o nadkritických parametrech lze přímo vést na turbínu. Pro výrobu elektrické energie se počítá s Rankin-Clausiovým oběhem s dvojnásobným přehřevem páry. Účinnost parního oběhu s nadkritickou párou se pohybuje okolo 44 %. Pro srovnání oběh se sytou párou v případě varných reaktorů má účinnost pouze 33-34 %.

V kapitole 11 bylo čerpáno z literatury [11, 14].

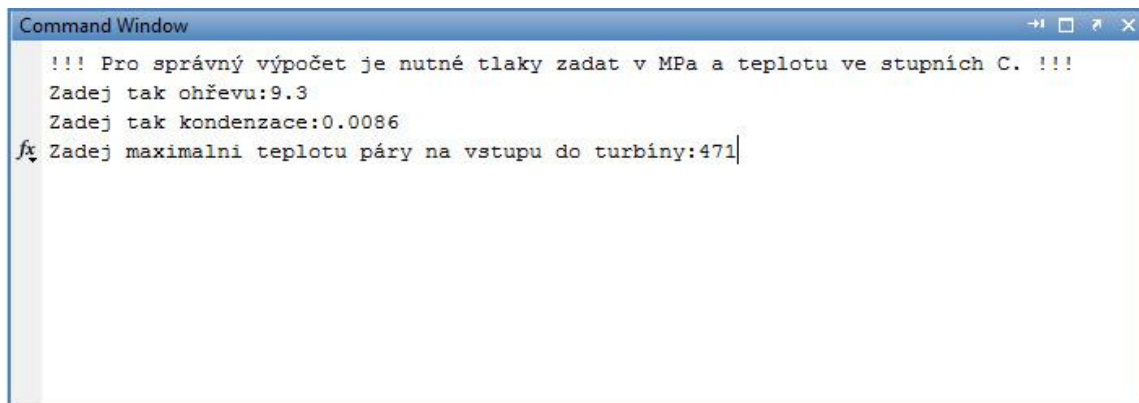
12 POPIS PROGRAMU NA VYKRESLENÍ A VÝPOČET RANKIN - CLAUSIOVA OBĚHU

Program je napsán v jazyce programu MATLAB. Kromě předdefinovaných funkcí programu, které jsou dostupné v jeho základní verzi, využívá knihovnu funkcí určenou pro výpočty prováděné s vodou a vodní párou. Konkrétně se jedná o knihovnu X Steam for MATLAB, která je volně dostupná a každý ji může k nekomerčním účelům využít.

Samotný program slouží ke snadnému výpočtu parametrů ideálního parostrojního oběhu, a k jeho vykreslení v T-s diagramu vody a vodní páry. Svému uživateli by měl zejména usnadnit práci při výpočtu (návrhu) ideálního Rankin-Clausiova oběhu.

Před startem programu je nutné nejprve v poli Current Folder programu MATLAB otevřít složku obsahující knihovnu X Steam for MATLAB (XSteam.m), kterou ke svému chodu program vyžaduje. Poté spustit program (rankin_cycle.m). Po spuštění programu je uživatel vyzván k zadání vstupních parametrů oběhu – tlak ohřevu, tlak kondenzace, teplota vstupní páry. Pro správný výpočet musí být tlak zadáván v MPa a teplota ve °C. Výstupem programu jsou hodnoty – účinnost cyklu, měrná práce cyklu, měrné přivedené teplo, měrné odvedené teplo, měrná práce turbíny, měrná práce čerpadla a diagram oběhu v T-s diagramu vody a vodní páry.

Ukázkový výpočet zobrazuje obr. 12.1, kde zadané vstupní parametry odpovídají oběhu s přehřátou párou – tlak ohřevu 9.3 MPa, tlak kondenzace 8.6 kPa, teplota vstupní páry 471 °C.



Obr. 12.1 Zadání vstupních hodnot do programu

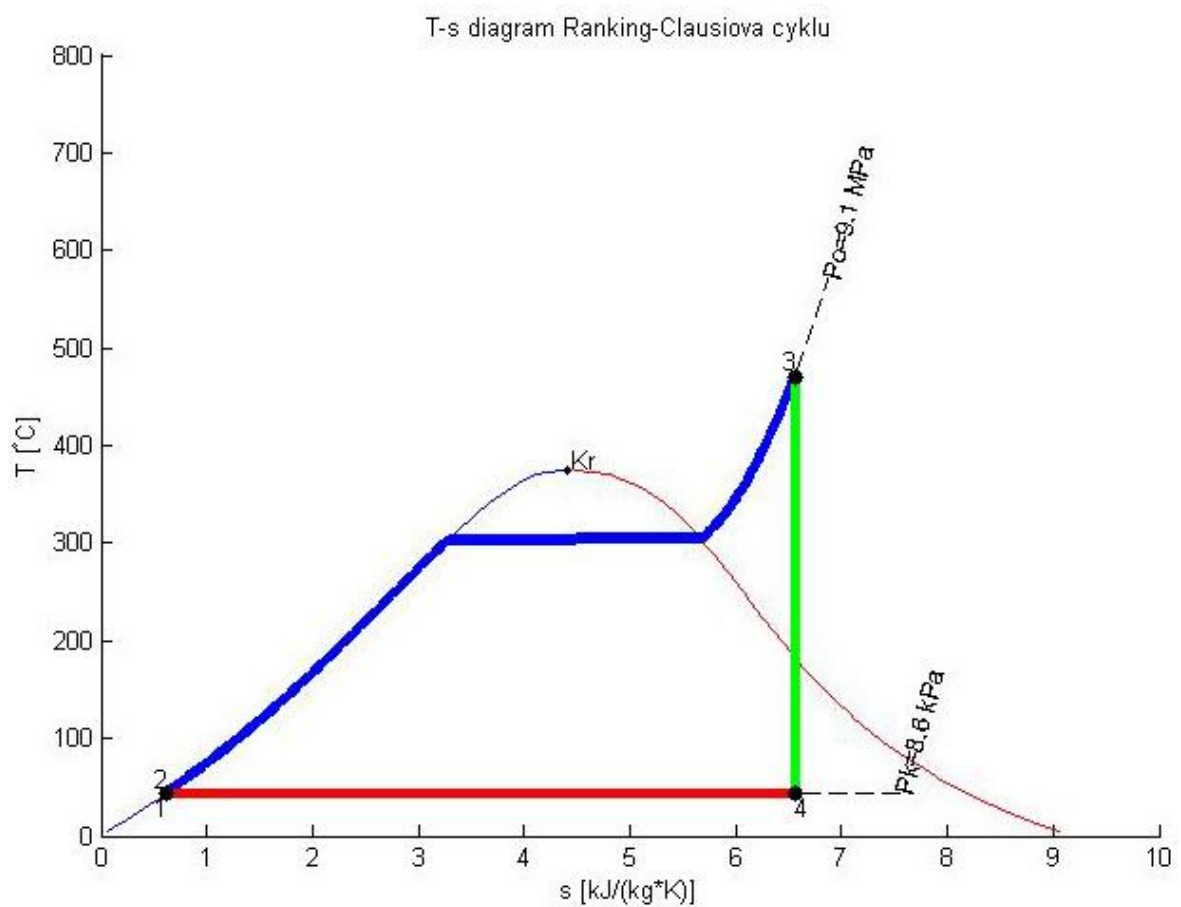
Výstupem z programu je výpis parametrů oběhu uvedených výše a diagram oběhu v T-s diagramu vody a vodní páry, obr 12.2 a obr. 12.3.

```

Command Window
Měrná práce turbíny: 1253.271kJ/kg
Měrná práce čerpadla: -9.144kJ/kg
Měrné přivedené teplo: 3122.946kJ/kg
Měrné odvedené teplo: -1878.818kJ/kg
Získaná měrná práce cyklu: 1244.128kJ/kg
Účinnost cyklu: 39.8%
fx >>

```

Obr. 12.2 Výpis parametrů oběhu



Obr. 12.3 Vykreslený diagram oběhu v T-s diagramu vodní páry

13 ZÁVĚR

Světová energetika bude v blízké době konfrontována s několika problémy, s kterými se bude muset nějakým způsobem vypořádat. Jedním z nich je neustálý růst světové spotřeby energie včetně té elektrické, u které se v horizontu dvaceti let počítá s přibližně 1,7 % nárůstem meziročně. Ten je způsoben zejména rychlým rozvojem průmyslu a energetických potřeb obyvatel rozvojových zemí. Dalším již aktuálním problémem světové energetiky je množství produkovaných zplodin a skleníkových plynů. Také tyto obtíže bude nutné v budoucnosti řešit. Dále v průběhu 21. století lze také očekávat výrazné ztenčení zásob fosilních paliv, z kterých je nyní jejich spalováním produkováno okolo 60% vyrobené elektrické energie na světě. [15]

Bude jistě zajímavé sledovat, jakým směrem se bude skladba energetického mixu vyvíjet. Dnes lze sledovat dva zcela odlišné postoje k jaderné energetice. Jedním z nich je snaha některých zemí omezit, nebo zcela zrušit výrobu elektřiny v jaderných elektrárnách. Například Německo chce odstoupit od jádra již více jak deset let, ale jeho instalované fotovoltaické a větrné kapacity nejsou kvůli malému využití dostatečné. Prozatím nahrazují jaderné kapacity převážně plynové elektrárny. Opačný postoj zaujímají jiné země, například v Evropě s dalším využitím jádra počítá Francie, která dnes vyrábí $\frac{3}{4}$ elektrické energie v jaderných elektrárnách. Také Anglie chce urychlit obměnu svých zastaralých jaderných bloků. Stejně tomu je v rozvojových zemích a zejména v Číně, Indii a Jižní Koreji, kde lze zaznamenat velký rozmach jaderné energetiky. Lze předpokládat, že obnovitelné zdroje energie nebudou schopny zdaleka pokrýt zvyšující se poptávku po elektřině a musejí být vnímány pouze jako doplňkové. Úloha jaderné energetiky ve výrobě elektrické energie bude nepostradatelná. To dokazuje například i to, že dnes je ve výstavbě přes 60 nových reaktorů ve 13 zemích a dalších 167 jich je plánovaných. Jedná se o bloky velkých výkonů, které jsou vhodné k zabezpečení stabilní dodávky elektřiny. V budoucnosti lze očekávat využívání jaderné energie i v jiných odvětvích, například jak již bylo zmíněno jako zdroj tepla k technologickým účelům, k odsolování mořské vody nebo výrobě vodíku. Jaderná energetika se zřejmě nebude dále omezovat pouze na výstavbou bloků velkých výkonů, ale pravděpodobně se budeme moci setkat i s použitím menších jednotek určených například k zásobování velkých měst teplem.[18]

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. vydání 3. přeprac. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003. 284 s. ISBN 80-214-2409-5.
- [2] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Tepelné elektrárny a teplárny*. Praha: Vydavatelství SNTL, 1984. 608 s.
- [3] KLIK, František, DALIBA, Jaroslav. *Jaderná energetika*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 189 s. ISBN 80-010-2550-0.
- [4] RÁČEK, Jiří. *Jaderné elektrárny*. Vydání 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2002. 175s. ISBN 80-214-2158-4.
- [5] DUBŠEK, František. *Jaderné reaktory*. Vydání 1. Brno: Fakulta strojní VUT v Brně, 1995. 145s. ISBN 80-214-0715-8.
- [6] DUBŠEK, František. *Jaderná energetika*. Vydání 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1994. 206s. ISBN 80-214-0538-4.
- [7] MAHAFFEY, James. *Nuclear Power, The History of Nuclear Power*. Vydání 1. Facts on File, 164 s. ISBN 978-0-8160-7649-9.
- [8] LAMARSH, John, BARATTA, Anthony. *Introduction to Nuclear Engineering*. Vydání 3. Prentice Hall, 2001. 783s. ISBN 0-201-82498-1.
- [9] YUNUS A. ÇENGEL, Yunus A. Michael A. *Thermodynamics: an engineering approach. 5th ed.* Boston: McGraw-Hill Higher Education. ISBN 978-007-2884-951.
- [10] Reaktory III. generace aneb jaké reaktory se staví teď a budou stavět v nejbližších desetiletí. *Ústav jaderné fyziky AV ČR* [online]. 2008 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/transmutace/generaceIII.htm>
- [11] VÁCLAV, Dostál. *Jaderné reaktory IV. generace* [online]. Praha, 2010 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z WWW: <http://www.cvut.cz/informace-pro-zamestnance/habilitace/hp/resolveuid/792d6e863ced125ff19815eadec09570>. [Habilitační práce](#).
- [12] Nuclear Power Reactors. *World Nuclear Association* [online]. 2012 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Nuclear-Power-Reactors/#.UZTSIrXJTVx>
- [13] Technologie. In: *SKUPINA ČEZ: Dostavba elektrárny Temelín* [online]. 2012 [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/zvazovana-dostavba-elektřiny-temelin/technologie.html>
- [14] Reaktory IV generace. *OSEL: Objective Source E-Learning* [online]. 2008 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=3568>

- [15] OTČENÁŠEK, Petr. *Elektroenergetika ve 21. Století* [online]. 2006. [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/elektricka-energie-cr.pdf>
- [16] Jaderná elektrárna Jaslovské Bohunice. *PRO ATOM WEB* [online]. 2007 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://proatom.luksoft.cz/view.php?cisloclanku=2007020401>
- [17] Advanced Nuclear Power Reactors. *World Nuclear Association* [online]. 2013 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Advanced-Nuclear-Power-Reactors/#.UZPwu7XJTVw>
- [18] Plans For New Reactors Worldwide. *World Nuclear Association* [online]. 2013 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Plans-For-New-Reactors-Worldwide/#.UZY027XJTVw>

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A SYMBOLŮ

<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Název veličiny</i>
a	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	měrná práce
a_0	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	měrná práce oběhu
$a_{\dot{C}}$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	měrná práce čerpadla
a_T	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	měrná práce turbíny
c_v	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita za konstantního objemu
h	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	měrná entalpie
kr		kritický bod
m	$[\text{kg}]$	hmotnost
MWe	$[\text{MW}]$	jednotka elektrického výkonu
p	$[\text{Pa}]$	tlak
q	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	měrné teplo
q_C	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	měrné teplo kondenzace
q_H	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	měrné teplo ohřevu
r	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	měrná plynová konstanta
s	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	měrná entropie
T	$[\text{K}]$	termodynamická teplota
T_C	$[\text{K}]$	teplota kondenzace
T_H	$[\text{K}]$	teplota ohřevu
u	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	měrná vnitřní energie
v	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	měrný objem
x	$[-]$	suchost páry
η_t	$[-]$	termická účinnost
κ	$[-]$	Poissonova konstanta

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<i>Označení</i>	<i>Název</i>
<i>ABWR</i>	Advanced Boiling Water Reactor
<i>ACR1000</i>	Advanced CANDU Reactor
<i>AGR</i>	Advanced Gas Cooled Reactor
<i>AM-1</i>	Atom Mirny
<i>AP1000</i>	Advanced Passive Pressurized Water Reactor 1000 Mwe
<i>AP600</i>	Advanced Passive Pressurized Water Reactor 600 Mwe
<i>APWR</i>	Mitsubishi Advanced Pressurized Water Reactor
<i>B₄C</i>	karbid boru
<i>BWR</i>	Boiling Water Reactor
<i>CANDU</i>	Canada Deuterium Uranium Reactor
<i>CO₂</i>	oxid uhličitý
<i>D₂O</i>	oxid deuteria (těžká voda)
<i>EPR</i>	European Pressurized Reactor
<i>ESBWR</i>	Economic Simplified Boiling Water Reactor
<i>FBR</i>	Fast Breeder Reactor
<i>GCR</i>	Gas Cooled Reactor
<i>GFR</i>	Gas Cooled Fast Reactor
<i>HTGR</i>	High Temperature Gas Cooled Reactor
<i>HWR</i>	Heavy Water Reactor
<i>LFR</i>	Lead Cooled Fast Reactor
<i>LMFBR</i>	Liquid Metal Fast Breeder Reactor
<i>LWGR</i>	Light Water cooled Graphite Moderated Reactor
<i>MAGNOX</i>	plynem chlazený grafitem moderovaný reaktor
<i>MOX</i>	Mixed Oxide Fuel
<i>MSR</i>	Molten Salt Reactor
<i>PHWR</i>	Pressurized Heavy Water Reactor
<i>Pu</i>	plutonium
<i>PuO₂</i>	oxid plutoničitý
<i>PWR</i>	Pressurized Water Reactor
<i>RBMK</i>	Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj
<i>SCWR</i>	Supercritical Water Cooled Reactor
<i>SFR</i>	Sodium Cooled Fast Reactor

U	uran
UO_2	oxid uraničitý
$VHTR$	Very High Temperature Reactor
$VVER$	vodo-vodní energetický reaktor
WNA	World Nuclear Association

FYZIKÁLNÍ KONSTANTY

<i>Symbol</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Název konstanty</i>
kr	p [22,045 MPa] t [274,23 °C]	Kritický bod

INDEXY

<i>Index</i>	<i>Význam</i>
'	sytá kapalina
''	sytá pára
1	stav 1
2	stav 2
3	stav 3
4	stav 4
12	děj probíhající mez stavy

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Zdrojový kód programu na vykreslení a výpočet Rankin-Clausiova oběhu

PŘÍLOHA 1 – ZDROJOVÝ KÓD PROGRAMU NA VYKRESLENÍ A VÝPOČET RANKIN-CLAUSIOVA OBĚHU

```
%PROGRAM RANKIN-CLAUSIUOV CYKLUS
```

```
clear,clc,close all;
```

```
fprintf('!!! Pro správný výpočet je nutné tlaky zadat v MPa a teplotu  
ve stupních C. !!!\n');
```

```
p=[0,0,0,0];  
t=[0,0,0,0];  
s=[0,0,0,0];  
h=[0,0,0,0];  
p(2)=input('Zadej tak ohřevu:');  
p(1)=input('Zadej tak kondenzace:');  
t(3)=input('Zadej teplotu páry na vstupu do turbíny:');  
p=10*p;  
p(3)=p(2);  
p(4)=p(1);
```

```
% určení neznámých veličin  
t(1)=XSteam('Tsat_p',p(1));  
s(1)=XSteam('sL_p',p(1));  
h(1)=XSteam('hL_p',p(1));  
s(2)=s(1);  
t(2)=XSteam('T_ps',p(2),s(2));  
s(3)=XSteam('s_pT',p(3),t(3));  
s(4)=s(3);  
h(4)=XSteam('h_ps',p(4),s(3));  
h(3)=XSteam('h_pT',p(3),t(3));  
t(4)=XSteam('T_ph',p(4),h(4));  
h(2)=XSteam('h_ps',p(2),s(1));
```

```
% měrná práce turbíny  
at=h(3)-h(4);
```

```
% měrná práce čerpadla  
ac=-1*(h(2)-h(1));
```

```
% přivedené teplo  
qh=h(3)-h(2);
```

```
% odvedené teplo  
qc=h(1)-h(4);
```

```
% měrná práce cyklu  
a0=qh-abs(qc);
```

```
% termická účinnost oběhu  
n=abs(a0)/qh;
```

```
% vykreslení grafu  
figure;  
hold on;
```

```

% vykreslení čary syté kapaliny a páry
vekT = linspace(0,800,200);
svyp = arrayfun(@(x) XSteam('sV_T',x),vekT);
skap = arrayfun(@(x) XSteam('sL_T',x),vekT);
plot(svyp,vekT,'r-')
plot(skap,vekT,'b-')

% vykreslení jednotlivých dějů
plot([s(1) s(2)], [t(1) t(2)], 'y-', 'linewidth', 4)

t23=linspace(t(2),t(3),200);
s23 = arrayfun(@(t) XSteam('s_PT',p(2),t),t23);
plot(s23,t23,'b-', 'linewidth', 4)

plot([s(3) s(4)], [t(3) t(4)], 'g-', 'linewidth', 4)

s41 = linspace(s(4),s(1),200);
t41 = arrayfun(@(x) XSteam('T_ps',p(1),x),s41);
plot(s41,t41,'r-', 'linewidth', 4);

% úpravy grafu
i=[0,0];
i(1)=max(skap);
i(2)=min(svyp);
l=mean(i);

plot(l,374.1,'k.', 'MarkerSize', 10);
text(l+0.03,385,'Kr');
vekToh=linspace(t(3),t(3)+100,100);
soh = arrayfun(@(x) XSteam('s_PT',p(2),x),vekToh);
plot(soh,vekToh,'k--', 'linewidth', 1);
text(soh(end), vekToh(end), sprintf('Po=%2.1f
MPa',p(3)*0.1), 'rotation', 75)

vekskon=linspace(s(4),s(4)+1,100);
vekTkon = arrayfun(@(x) XSteam('T_ps',p(1),x),vekskon);
plot(vekskon,vekTkon,'k--', 'linewidth', 1);
text(vekskon(end), vekTkon(end), sprintf('Pk=%2.1f
kPa',p(4)*100), 'rotation', 75)

plot(s,t,'k.', 'MarkerSize', 20);

text(s(1)-0.1,t(1)-15,'1');
text(s(2)-0.1,t(2)+15,'2');
text(s(3)-0.1,t(3)+15,'3');
text(s(4),t(4)-15,'4');

% název grafu a popisy os
title('T-s diagram Ranking-Clausiova cyklu')
xlabel('s [kJ/(kg*K)]')
ylabel('T [^\circC]')

```

```
% výstupní data
clc;

fprintf('Měrná práce turbíny: %.3fkJ/kg\n',at);
fprintf('Měrná práce čerpadla: %.3fkJ/kg\n',ac);
fprintf('Měrné přivedené teplo: %.3fkJ/kg\n',qh);
fprintf('Měrné odvedené teplo: %.3fkJ/kg\n',qc);
fprintf('Získaná měrná práce cyklu: %.3fkJ/kg\n',a0);
fprintf('Účinnost cyklu: %1.1f%%\n',abs(n)*100);
```