

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Termodynamický cyklus heliem chlazeného reaktoru IV. generace

Autor: **Petr Kollross**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Jiří POLANSKÝ, Ph.D.**

Akademický rok 2012/2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Katedra energetických strojů a zařízení

Akad. rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Petr Kollross**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**

Téma bakalářské práce:

Termodynamický cyklus heliem chlazeného reaktoru IV. generace

Základní požadavky:

Vypracovat program na výpočet termodynamického cyklu dle zadaného schématu.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v zadání.

Osnova bakalářské práce:

- 1. Vypracujte přehled termodynamických cyklů současných i budoucích jaderných elektráren, zaměřte se na plynem chlazené reaktory.*
- 2. Vypracujte přehled pracovních látek a jejich termofyzikální vlastnosti.*
- 3. Vytvořte program na výpočet termodynamického cyklu heliem chlazeného reaktoru s výměníkem a bez výměníku tepla.*
- 4. Analyzujte výsledky výpočtu z hlediska účinnosti a měrné práce cyklu.*
- 5. Vypracujte bilanční schéma zadaného termodynamického cyklu pro 4 provozní stavy.*

Rozsah bakalářské práce:

- a) textová část: **30-40 stran formátu A4**
b) grafická část **výkresová dokumentace**
Forma zpracování diplomové práce : **tištěná a elektronická**

Doporučená literatura:

[1] Horlock J. H.: **AdvancedGasTurbineCycles**, PERGAMON, 2003,
ISBN 0-08044273

[2] Meherwan P. Boyce: **GasTurbineEngineering Handbook**,
Butterworth-Heinemann, ISBN0-88415-732-6

[3] Horváth A., Stainsby R.: **ALLEGRO-a Gas-Cooled Fast Reactor
Demonstrator**, INSTN course on **Generation IV systems**, 2012

[4]Gicquel L.: **Alternativethermodynamiccyclesforenergyconversion**,
INSTN, 2012

[5]Cinotti L., **Generation IV: NuclearReactor Systems fortheFuture**,
Saylay 2012

Podkladový materiál, výkresy, prospekty, katalogy apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Jiří Polanský, Ph.D.
Katedra energetických strojů a zařízení

Konzultant bakalářské práce:

Doc. Ing. Jiří Polanský, Ph.D.
Katedra energetických strojů a zařízení

Datum zadání bakalářské práce:

5.11.2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

28. 6. 2013

L.S.

Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan

Doc. Ing. Jiří Polanský, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne: 26. 6. 2013

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: 20.6.2013

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Kollross	Petr	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Doc. Ing. Polanský, Ph.D.	Jiří	
PRACOVISTĚ	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Termodynamický cyklus heliem chlazeného reaktoru IV. generace		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	47	TEXTOVÁ ČÁST	30	GRAFICKÁ ČÁST	17
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Bakalářská práce obsahuje shrnutí termodynamických cyklů a konstrukcí jaderných reaktorů IV. Generace. Řešení E-B cyklu bylo vymodelováno pomocí softwaru Octave.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Cyklus, efektivita, účinnost, výhody, nevýhody Jaderné reaktory, chladící média, Octave, Brytnův a Rankinův cyklus

Abstrakt v češtině

Cílem této práce je shrnout možné konstrukční návrhy nejen stávajících, ale především budoucích plynem chlazených jaderných elektráren, vyjádřit možné pracovní cykly, porovnat je a vyhodnotit. Dalším úkolem je shromáždit pracovní plyny, které budou sloužit jako chladivo v těchto cyklech. Dále je třeba vymodelovat Braytonův cyklus s výměníkem a bez výměníku tepla pro plyn helium a směs helia a dusíku. Výpočet je proveden ve výpočetním softwaru Octave 3.2.4. V tomto programu jsou uvažovány reálné plyny. Pouze směs byla vypočítána rovnicemi pro směs ideálních plynů. Do programu jsou zadány nejpravděpodobnější provozní podmínky jaderných elektráren. Získané výsledky mohou sloužit jako orientační při posuzování vhodnosti směsi plynu a jelikož je můj výpočetní program univerzální, je možné zadávat i odlišné plyny než je helium a dusík. Můžeme porovnávat různé koncentrace helia a dusíku. Program je schopen porovnávat několik cyklů najednou.

Abstract in English

My task is to create possible construction proposals for present and future gas cooled nuclear power plants. I summarize, compare and evaluate possible work cycles. Next task is to summarize work gases which will serve as refrigerant in these cycles. Furthermore I create Brayton cycle with and without heat exchanger for helium and for mixture helium+nitrogen. Simulation is programmed in Octave 3.2.4 software. This program contains real properties of gases. Only for mixtures equations for ideal gases were used. The most likely operations of nuclear power plants are entered in the program. The graphic outputs are involved in my program as well. Obtained results can serve as tentative for assessment of mixtures' suitability. My program is universal and we can input different gases than helium and nitrogen. We can compare different concentrations of helium and nitrogen. The program can compare several cycles with each other.

Obsah

1 Úvod do problematiky jaderných reaktorů IV. generace	9
2 Přehled pracovních látek s jejich fyzikálními vlastnostmi	10
3 Budoucnost jaderných elektráren	12
3.1 uvažované chladicí cykly.....	12
3.2 Cíle do budoucna	12
3.3 Přehled termodynamických cyklů současných i budoucích JE	12
3.4 Popis základních i budoucích oběhů.....	22
3.4.1 Braytonův cyklus	22
3.4.2 Rankin-Clausiiův cyklus.....	27
4 Chlazení směsí plynů He-N₂ v nadkritickém stavu	28
4.1 popis a rozdíly v užití různých druhů plynu.....	28
5 Výpočet zadaného schématu Braytonova cyklu jaderné elektrárny typu HTGR	29
5.1 Zadané schéma.....	29
5.2 Vztahy pro výpočet cyklu	30
5.3 Programové řešení	36
5.4 Bilanční schémata cyklu.....	39
5.5 Uživatelský manuál.....	40
6 Závěr – zhodnocení účinnosti a měrné práce cyklus	43
7 Seznam použitých veličin	44
8 Seznam literatury	45
A Příloha	47
A.1 Obsah příloženého CD.....	47
A.2 Popis funkcí Octave.....	47
A.3 Čísla plynů pro volání knihoven.....	49

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval za odborné rady p. Doc. Ing. Jiřímu Polanskému, Ph.D., který byl vedoucím a konzultantem mé bakalářské práce a p. Prof. Ing. Jiřímu Linhartovi, CSc. za cenné rady, jež mi pomohly zpracovat tuto bakalářskou práci.

1 Úvod

V současné době spotřeba energie neúprosně stoupá a je kladen velký důraz na výkonnost, cenu a ekologii zdroje. Z tohoto důvodu se v současné době vyvíjí nový typ jaderných reaktorů, takzvané jaderné reaktory IV. generace. Tyto reaktory by měli být určeny pro výrobu elektřiny nebo vodíku. Jaderné reaktory IV. generace budou schopni zužítkovat vyhořelé palivo, které v současné době produkují naše jaderné elektrárny. Výstupní teplota z jaderného reaktoru by se měla pohybovat až kolem 1000°C, aby byla zaručena vysoká efektivita. Z tohoto důvodu je kladen důraz na chlazení aktivní zóny. Pro chlazení se předpokládají jako vhodná média plyny, neboť mají výborný součinitel přestupu tepla a dobrou tepelnou kapacitu. Použitý plyn by měl být inertní, v cyklu by nemělo docházet ke změně fáze, dalšími požadovanými vlastnostmi jsou dobrá radiační stabilita, neexplozivní, nehořlavý a cenově dostupný.

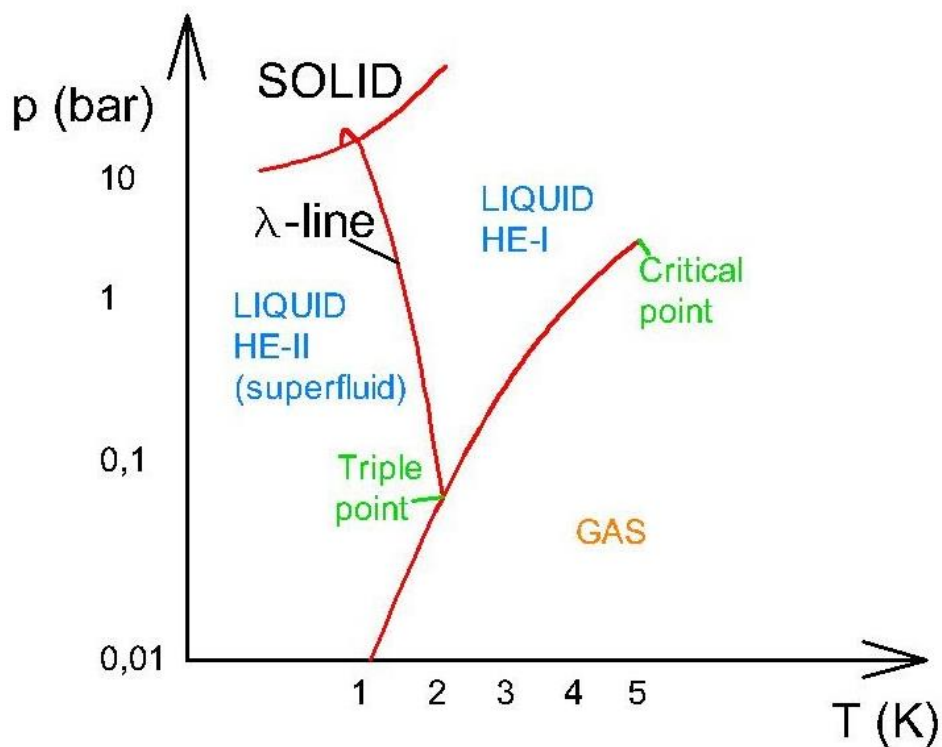
Tuto bakalářskou práci jsem si vybral, protože mě jaderné reaktory velmi zajímají a v současné době pracuji ve firmě Doosan Škoda Power a.s., která se zabývá výrobou turbín i pro jaderné elektrárny.

2 Přehled pracovních látek s jejich fyzikálními vlastnostmi

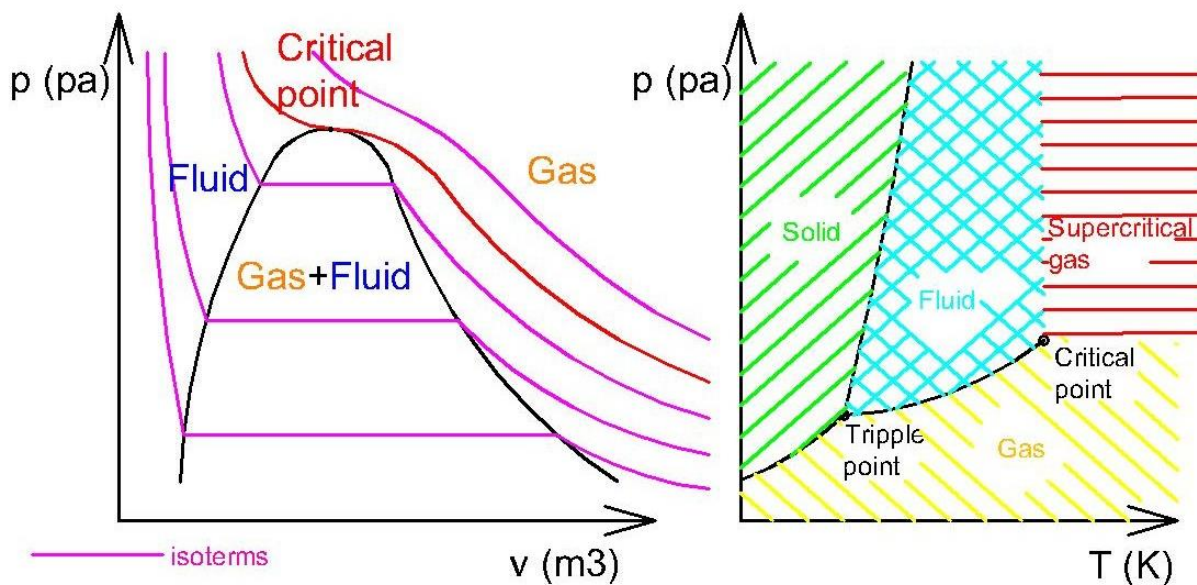
Látka	Zn.	T_k [K]	ρ_k [$\frac{kg}{m^3}$]	p_k [Mpa]	T_{tr} [K]	ρ_{tr} [$\frac{kg}{m^3}$]	p_{tr} [Mpa]	T_t [K]	T_v [K]	r [$\frac{kJ}{kgK}$]	c_p [$\frac{kJ}{kgK}$]	c_p/c_v [-]
Oxid uhličitý	CO ₂	304,1	464	7,3825	216,55	1,951	0,518	216,55 (5,27Mpa)	194,65	0,1889 24	0,844 (0,101Mpa) (298,1K)	1,2937 (0,101Mpa) (298,1K)
Voda	H ₂ O	647,3	322	22,14	273,16	999,78	0,611	273,15 (0,101Mpa)	373,15	0,4614	4,1819 (0,101Mpa) (298,1K)	1,006
Helium	He	5,15	69,64	0,2275	*	*	*	0,95 (0,101Mpa)	4,22	0,2077	5,19 (0,101Mpa) (298,1K)	1,664 (0,101Mpa) (298,1K)
Vodní pára	H ₂ O	647,3	322	22,14	273,16	999,78	0,611	273,15 (0,101Mpa)	373,15	0,4614	2,01 (0,101Mpa) (373,1K)	1,33
Sodík	Na	2573	-	35	373,15	0,0009 68	1x10 ⁻¹¹	370,95 (0,101Mpa)	1168,15	-	1,23 (0,101Mpa) (298,1K)	-
Těžká voda	D ₂ O	644,15	356	21,66	276,95	1105,6	66,009	276,97 (0,101Mpa)	374,57 (0,101Mpa)	0,415	4,228 (0,101Mpa) (298,1K)	1,00296 (0,101Mpa) (298,1K)
Dusík	N ₂	126,15	314,03	3,399	63,15	-	0,0125	63,29 (0,101Mpa)	77,25 (0,101Mpa)	0,2968	1,037 (0,101Mpa) (298,1K)	1,403846 (0,101Mpa) (298,1K)
Argon	Ar	150,85	537,7	4,898	83,75	-	0,068	84,15 (0,101Mpa)	87,25 (0,101Mpa)	0,208	0,52 (0,101Mpa) (298,1K)	1,668 (0,101Mpa) (298,1K)

Trojný a kritický bod si můžete prohlédnout v obr (2).

*) Helium má neobvyklý fázový diagram, neboť nemá trojný bod, protože, jak je vidět na diagramu p-v obrázek (1), má dvě tekuté fáze se změnami mezi nimi. Helium označený jako He II je supratekutý, to znamená, že má nulový třecí odpor [1] - [6].



Obr. (1) Fázový diagram helia [6]



Obr. (2) p - v a T - s diagram trojného a kritického bodu

3 Budoucnost jaderných elektráren

3.1 uvažované chladicí cykly

Pro chlazení budoucích jaderných elektráren se nyní uvažují čtyři základní cykly. Jedná se o klasický Rankin-Clausiův parní cyklus s přehřátou párou, nadkritický Rankin-Clausiův, Braytonův nadkritický cyklus s Héliem a na závěr nadkritický Braytonův cyklus s CO₂. Prozatím je snaha přiřadit příslušné cykly k jednotlivým typům jaderných elektráren tak, aby bylo možno zvážit jejich efektivitu a ekonomičnost.

3.2 Cíle do budoucna

- Navržení optimalizace pro Braytonův cyklus
- Nalezení nejslibnějších hodnot pro provoz
- Určení nejvhodnějších podmínek pro provoz
- Navržení vhodných materiálů
- Zvolení nejpříjemnějšího média
- Zvolení nejproduktivnějšího typu jaderné elektrárny

3.3 Přehled termodynamických cyklů současných i budoucích JE

Uzavřený cyklus GFR – IV generace

GFR – gas cooled fast reactor (Plynem chlazený rychlý reaktor)

Proudící médium primár – nadkritické helium nebo CO₂

Proudící médium sekundár – směs helium+dusík nebo CO₂

Celková tepelná efektivita – 45% až 48%

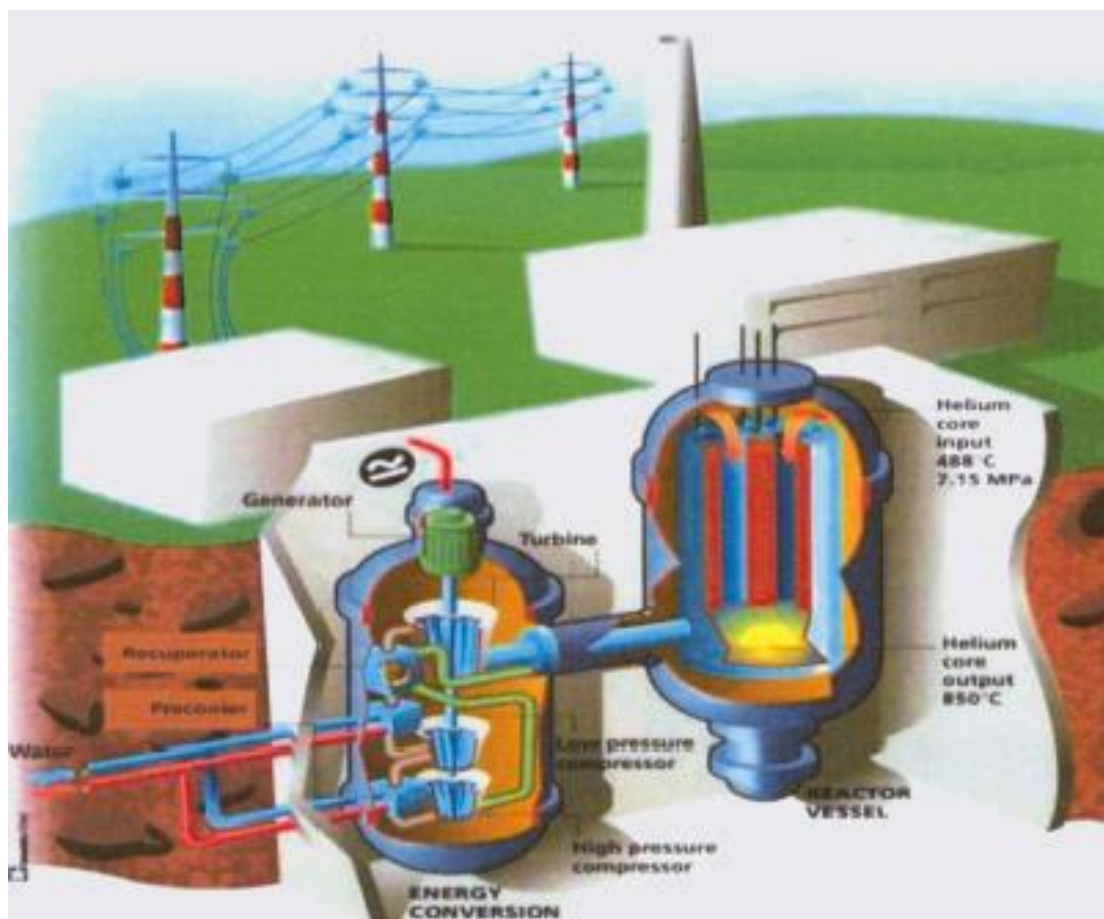
Přímý Braytonův cyklus

Vstup 490°C, výstup 870°C

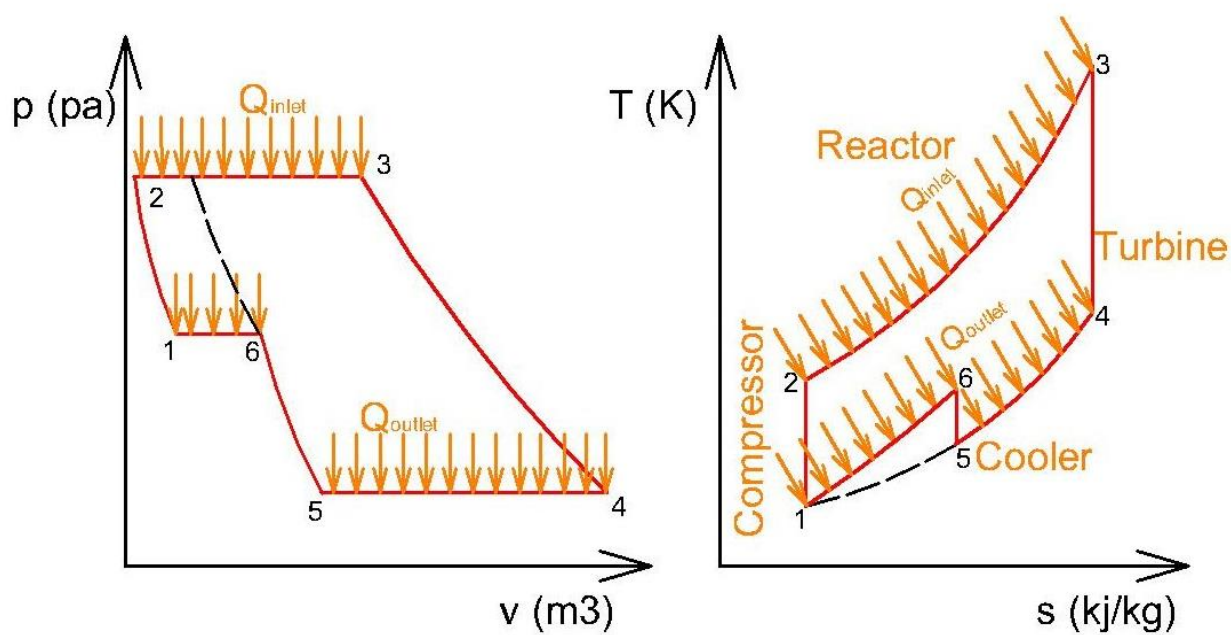
Maximální tlak – 9Mpa

Možné spalování transuranů z vyhořelého paliva

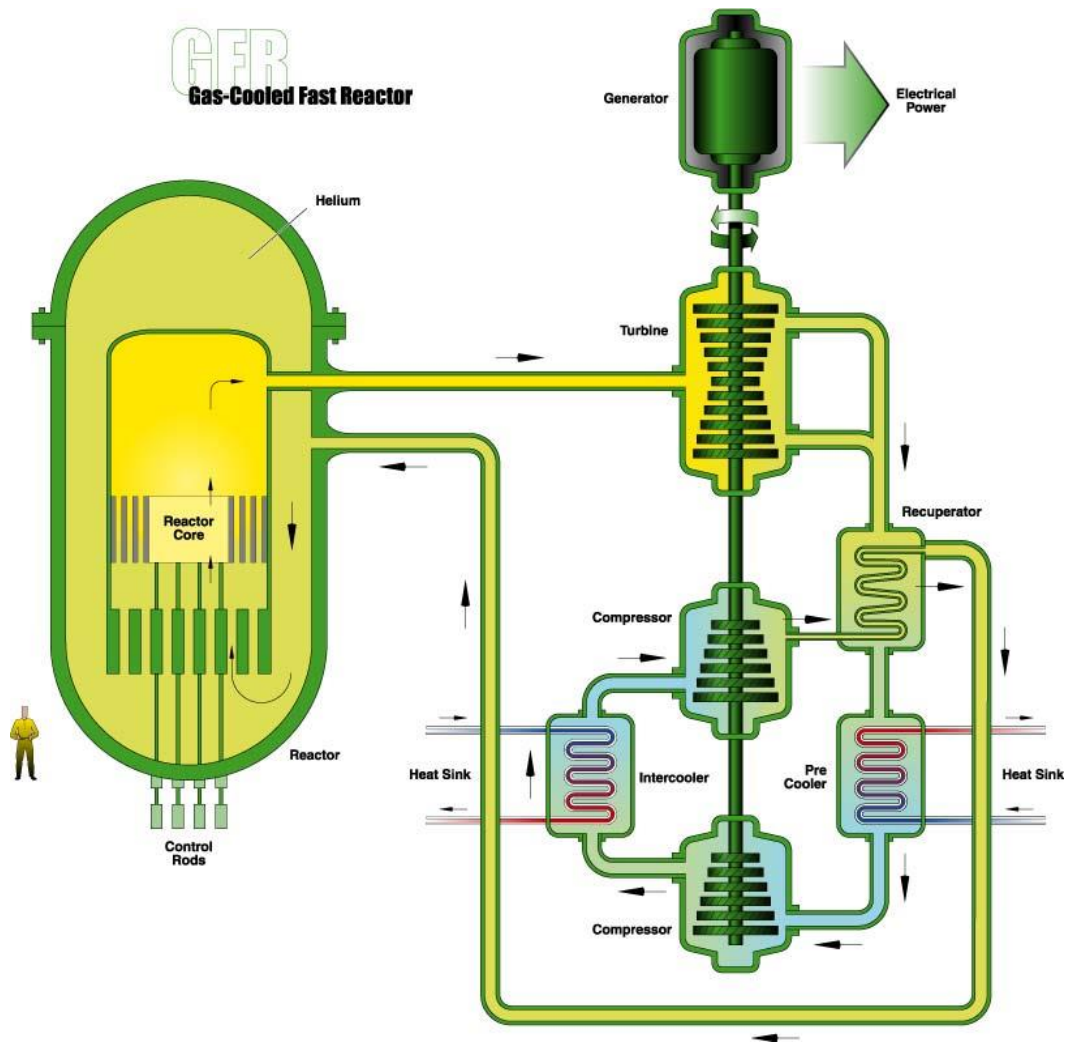
reaktor s tzv. rychlými neutrony dosahující vysokých teplot
palivo U a PU jako kuličky nebo bloky



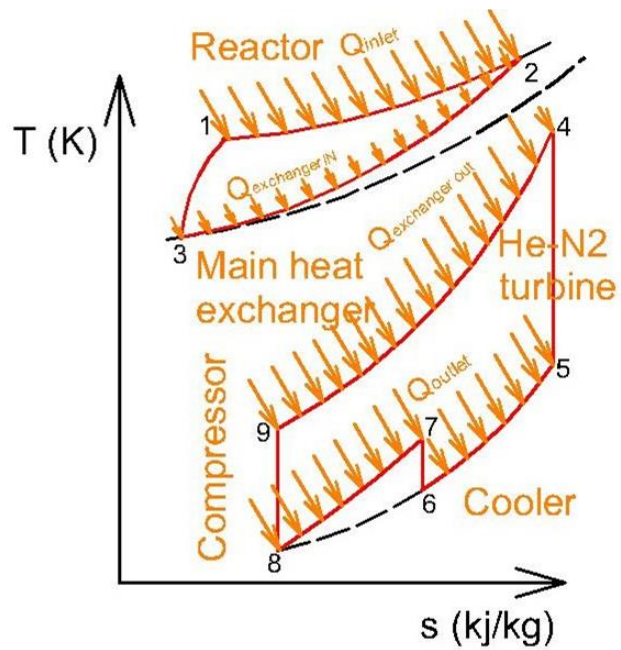
Obr. (3) GFR s přímý cyklus s víceústupňovou kompresí[7]



Obr. (4) Termodynamický Braytonův přímý cyklus GFR s víceústupňovou kompresí[7]



Obr. (5) GFR nepřímý cyklus s vícestupňovou kompresí [14]



Obr. (6) Braytonův nepřímý cyklus GFR s vícestupňovou kompresí [7]

Uzavřený cyklus MSR – IV generace

MSR – molten salt reactor (Reaktor chlazený tekutými solemi)

Proudící médium – soli – fluoridy, chloridy, dusičnany (vysoká tepelná kapacita, vysoká teplota varu)

Celková tepelná efektivita – 38% až 45%

Proudící médium primár – roztavená sůl NaF-zrF₄, t_f=450°C; sekundární okr. NaF nebo NaBF₄

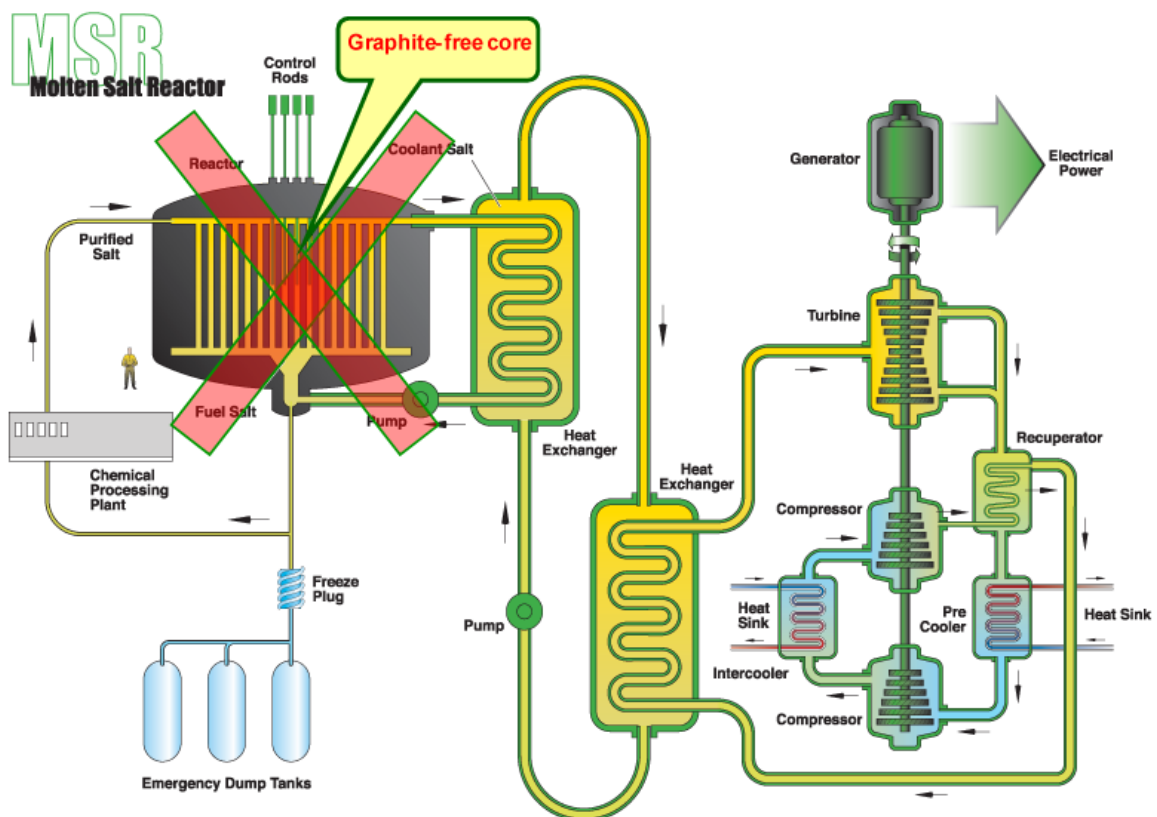
Proudící médium sekundár – přehřátá pára

Maximální teplota – 600-860°C

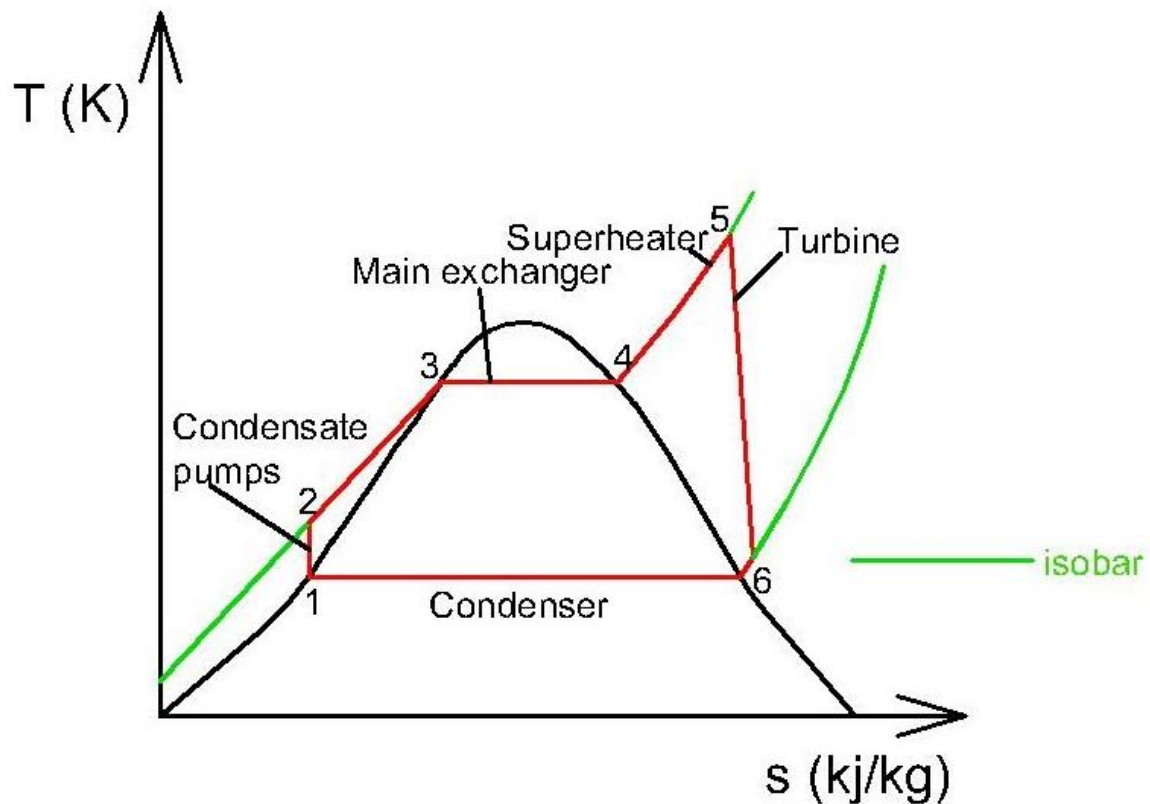
Tlak – 101,3Mpa

Výkon- 1000MWe

Palivo - fluoridová sůl s rozpuštěným Pu a Th



Obr. (7) Schéma reaktoru chlazeného roztavenými solemi [14]



Obr. (8) Termodynamický cyklus reaktoru chlazeného roztavenými solemi (sekundární)[15]

Superkritický cyklus SCWR – IV generace

SCWR – supercritical water cooled reactor (Reaktor chlazený nadkritickou vodou)

Proudící médium – pára-voda (nadkritická voda t a $p < 374^{\circ}\text{C}$ a $22,1\text{ Mpa}$)

Celková tepelná efektivita – 44%

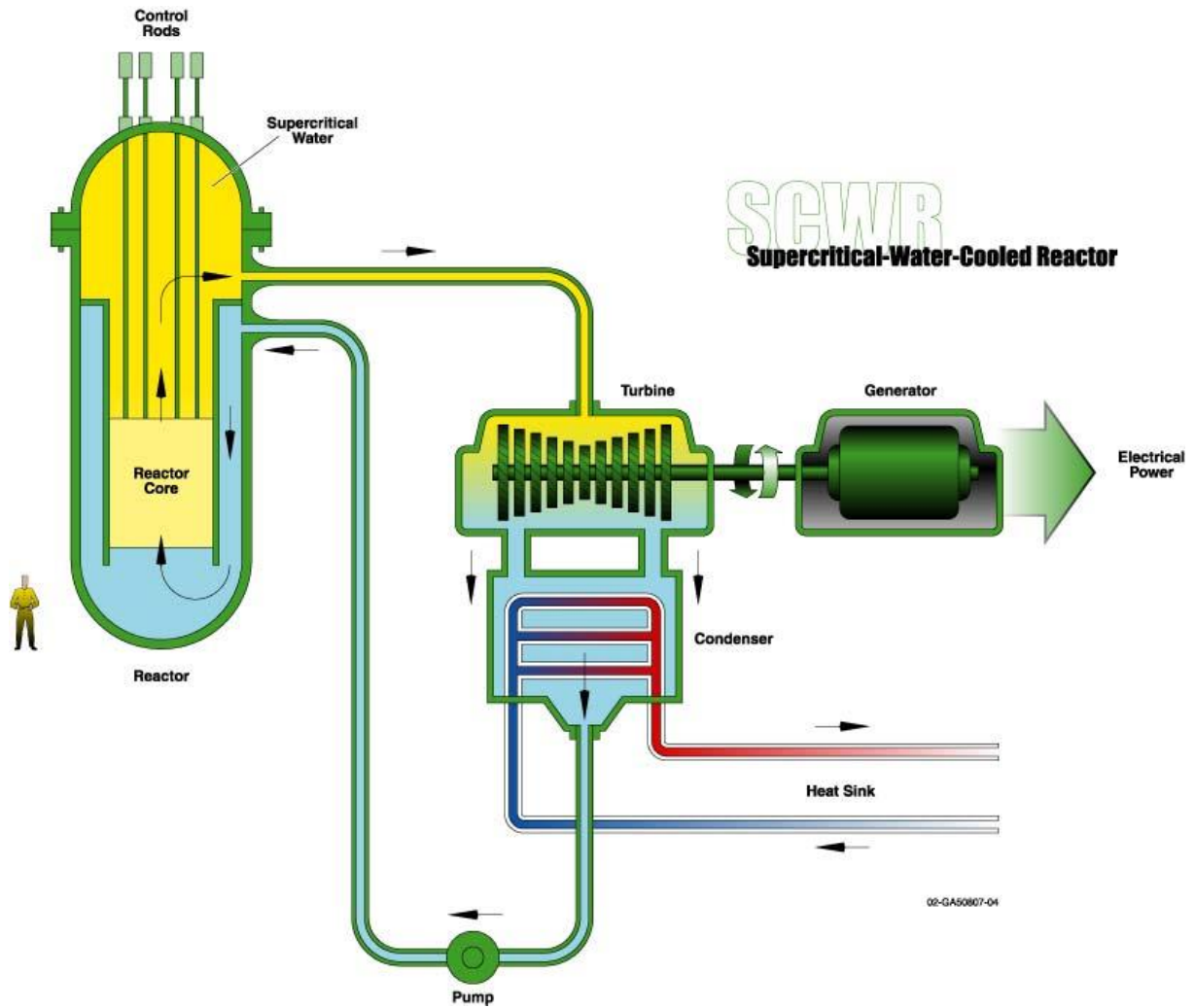
Raikyn-clausius cyklus - často s přihřevem

Vstup 280°C , Výstup 593°C

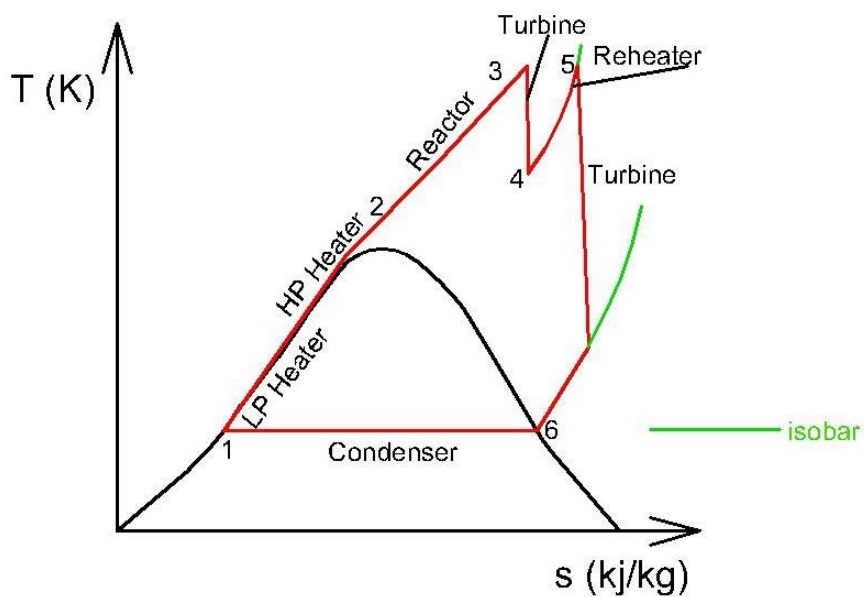
Maximální tlak – $24,2\text{ Mpa}$

Použití rychlých nebo pomalých neutronů

Palivo - U nebo Pu



Obr. (9) Schéma superkritického vodou chlazeného reaktoru [14]



Obr. (10) Termodynamický cyklus reaktoru chlazeného nadkritickou vodou [15]

Uzavřený cyklus VHTR – IV generace

VHTR – very high temperature reactor (Reaktor s velmi vysokými teplotami)

Proudící médium – helium

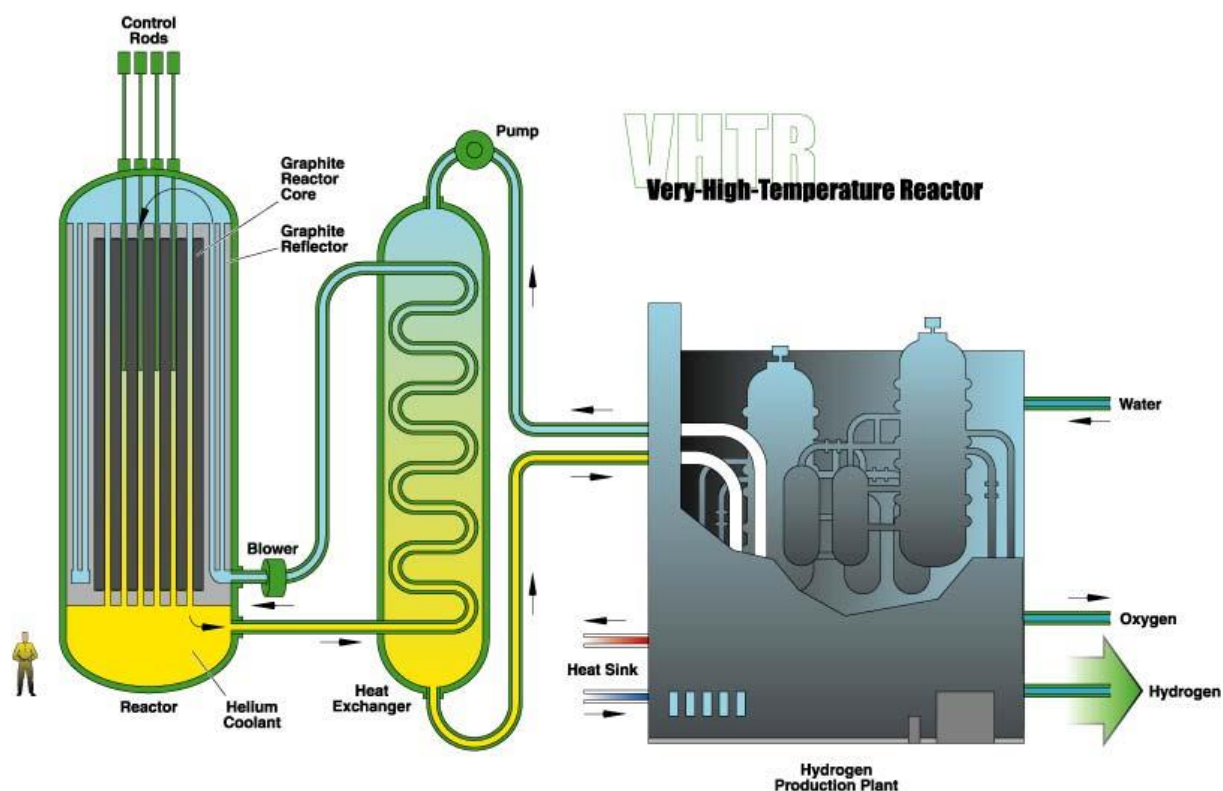
Celková tepelná efektivita – 41,5% až 48%

Přímý i nepřímý Braytonův cyklus

Maximální teplota 850-1000°C

Palivo koulí nebo bloků – hledají se nová paliva

Konstrukce na základě HTGR



Obr. (11) Schéma reaktoru o velmi vysokých teplotách [14]

02-GAS0807-01

Nepřímí uzavřený cyklus pro PWR

PWR – pressurized water reactor

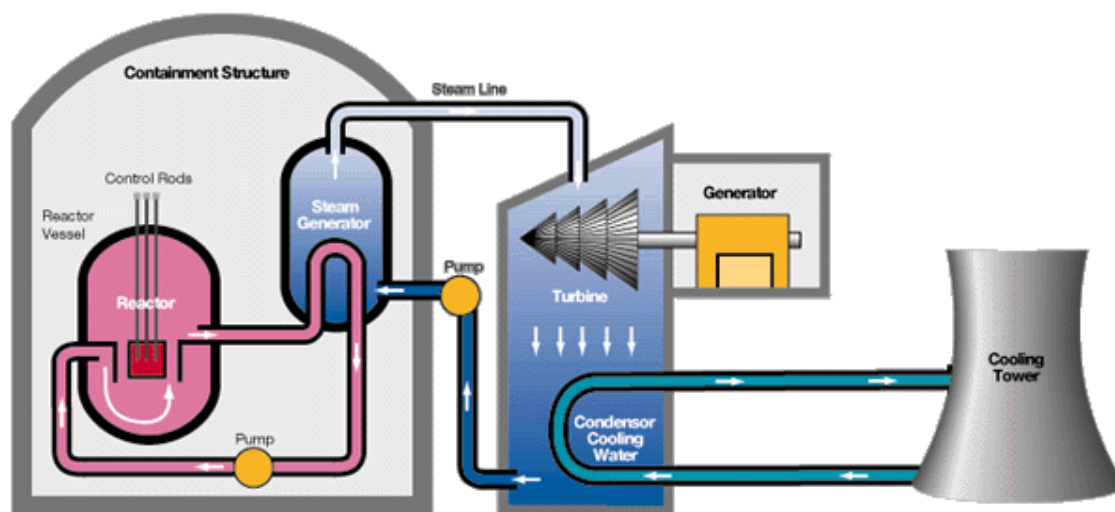
Proudící médium – pára-voda

Celková tepelná efektivita – 34%

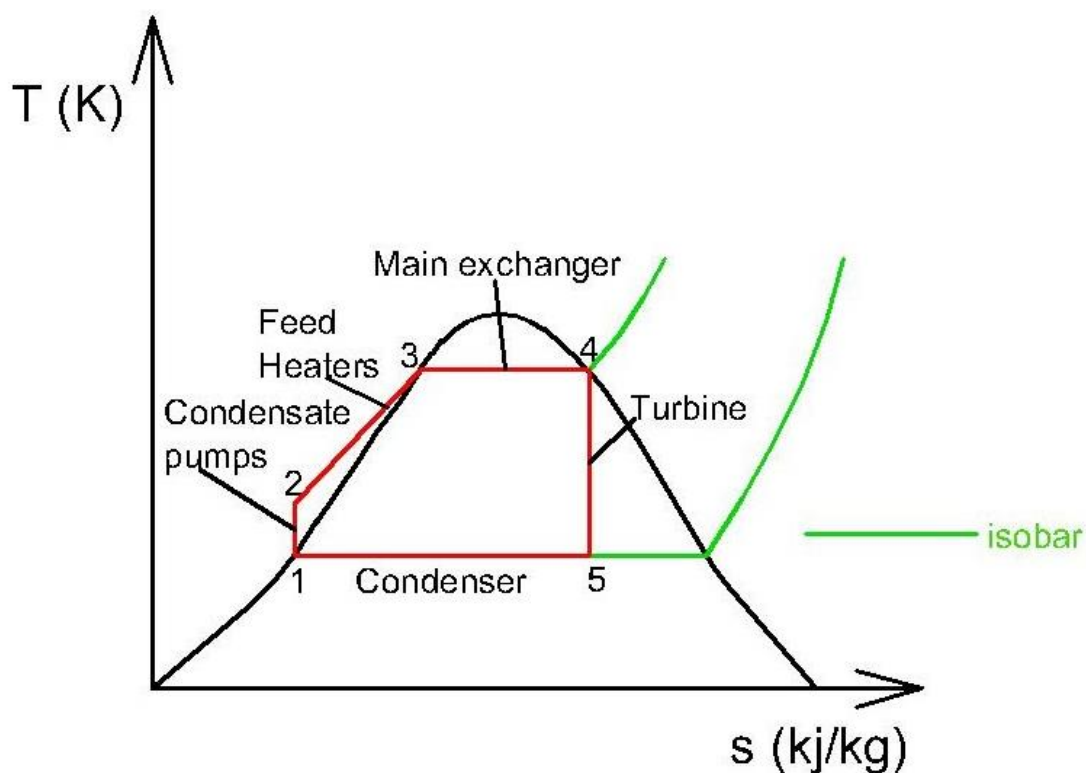
Raikyn-clausius cyklus - často s přihřevem

Maximální teplota - 343°C

Maximální tlak – 15,2Mpa



Obr. (12) Cyklus tlakovodního reaktoru[8]



Obr. (13) Termodynamický cyklus tlakovodního reaktoru (sekundární)[9]

Uzavřený cyklus SFR – IV generace

SFR – sodiumcooled fast reactor (Rychlý sodíkem chlazený reaktor)

Proudící médium primár – chladičem je sodík s Rankin-Clausiovým oběhem

Proudící médium sekundár – pára

Celková tepelná efektivita – 45% až 48%

Maximální teplota 450-550°C

Tlak v primárním cyklu – 101,3Mpa

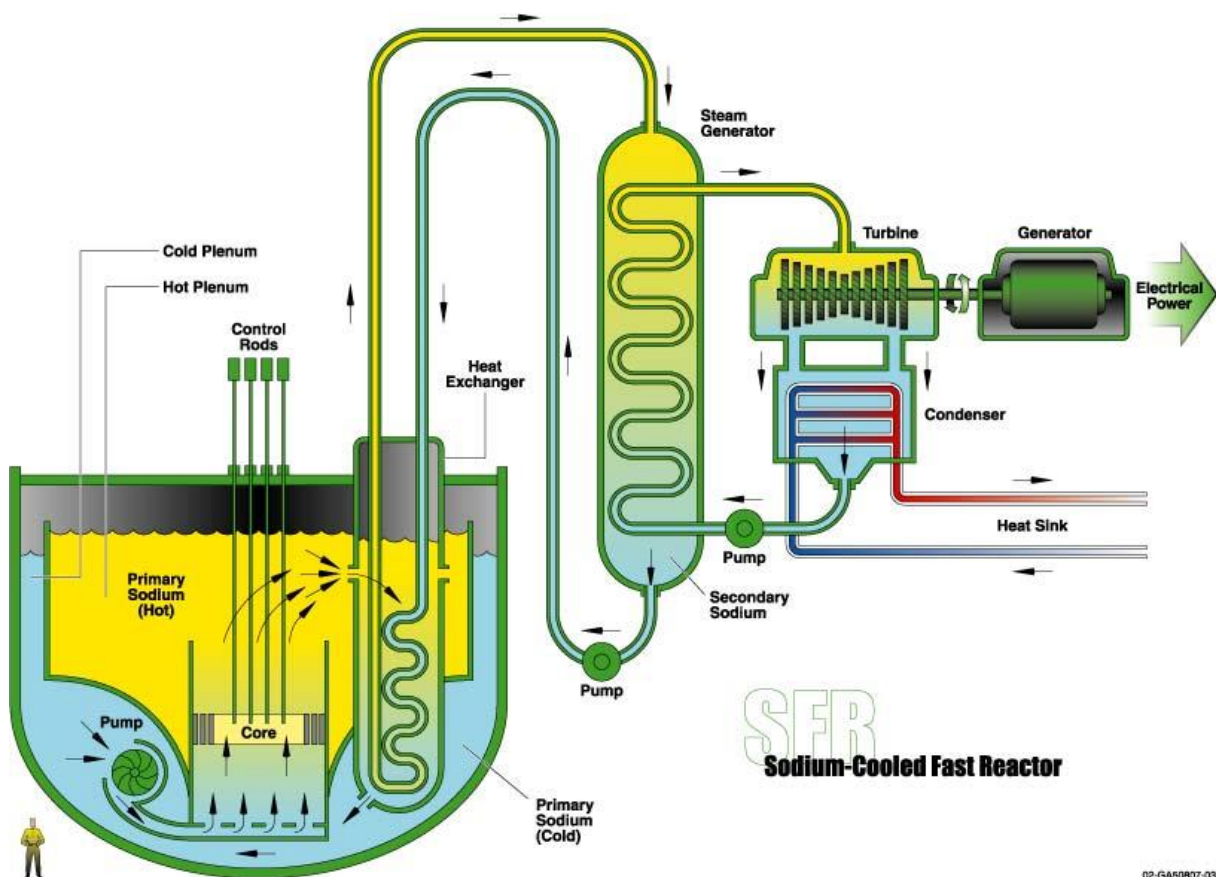
Možné spalování transuranů z vyhořelého paliva

Palivo - MOX popř. U-Pu-zirkonová slitina

Poměrně drahý ale zároveň nejrozvinutější reaktor IV. generace

Výkon 1500-1700MWe

Reaktor s tzv. rychlými neutrony dosahující vysokých teplot



Obr. (14) Schéma sodíkem chlazeného reaktoru[14]

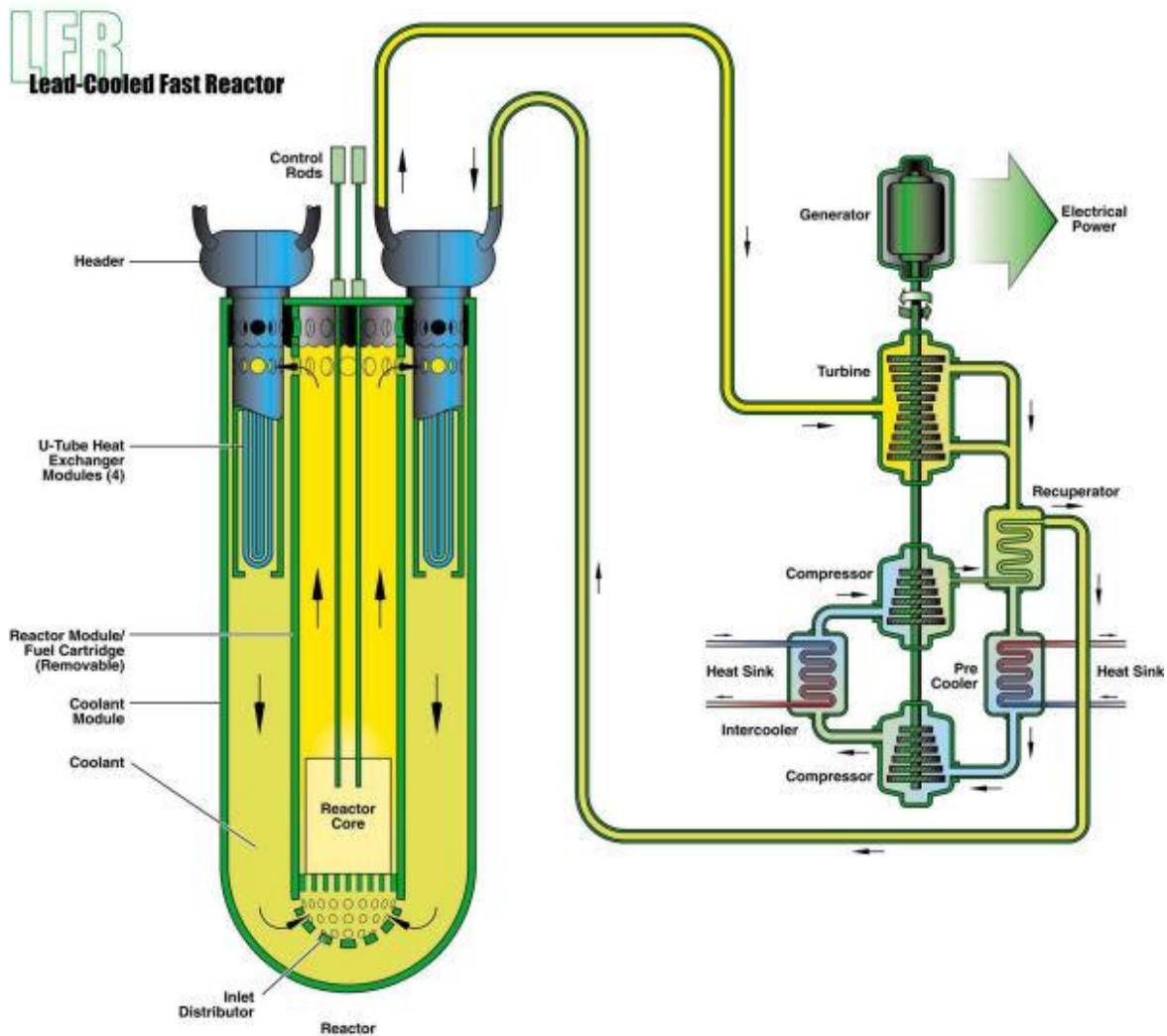
LFR-Rychlý olovem chlazený reaktor (Lead-Cooled Fast Reaktor)

reaktor s tvz. rychlými neutrony dosahující vysokých teplot
chlazení roztaveným olovem nebo roztavenou eutektickou slitinou (tuhne při nejnižších teplotách, jako čistý kov viz Fe_3C), uvažování o Rankin-Calusiově oběhu s přehřátou párou nebo s nadkritickým CO_2

výstup $800^{\circ}C$

výkon lze vybírat z intervalu 50 – 1200MWe

palivo U, TRU, Zr a do budoucna se počítá s nitridickým palivem



Obr. (15) Schéma olovem chlazeného reaktoru [14]

3.4 Popis základních i budoucích oběhů

3.4.1 Braytonův cyklus

Tento cyklus byl poprvé použit panem Georgem Braytonem v oběžném motoru spalujícím ropné palivo v roce 1870, ačkoli byl znám již kolem roku 1791 panem Johnem Barbrem. V literatuře lze nalézt i Ericsson-Braytonův cyklus, který využívá regenerátoru.

Braytonův cyklus demonstruje práci plynové turbíny a jeho užití pro otevřený cyklus ve spalovacích turbínách obrázek (16) a také jako uzavřený Ericsson-Braytonův cyklus obrázek (17) se používá v tepelných a jaderných elektrárnách, zejména v rovnotlakých turbínách, a nadále se s ním počítá ve využití pro jaderné elektrárny IV. generace (s rychlými neutrony).

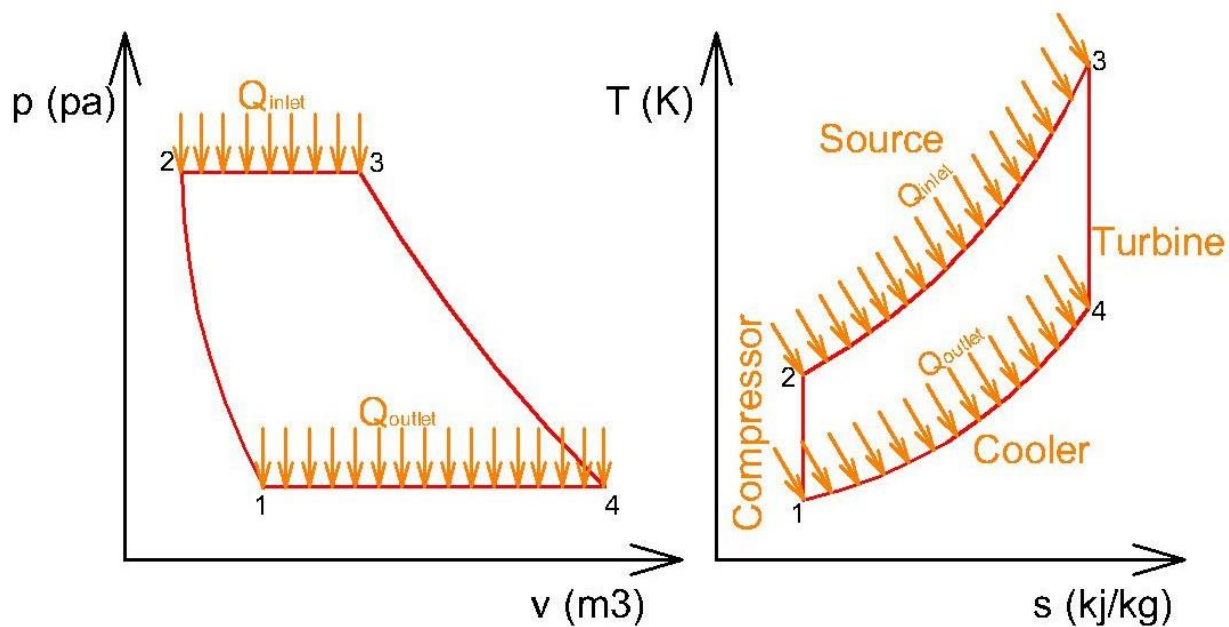
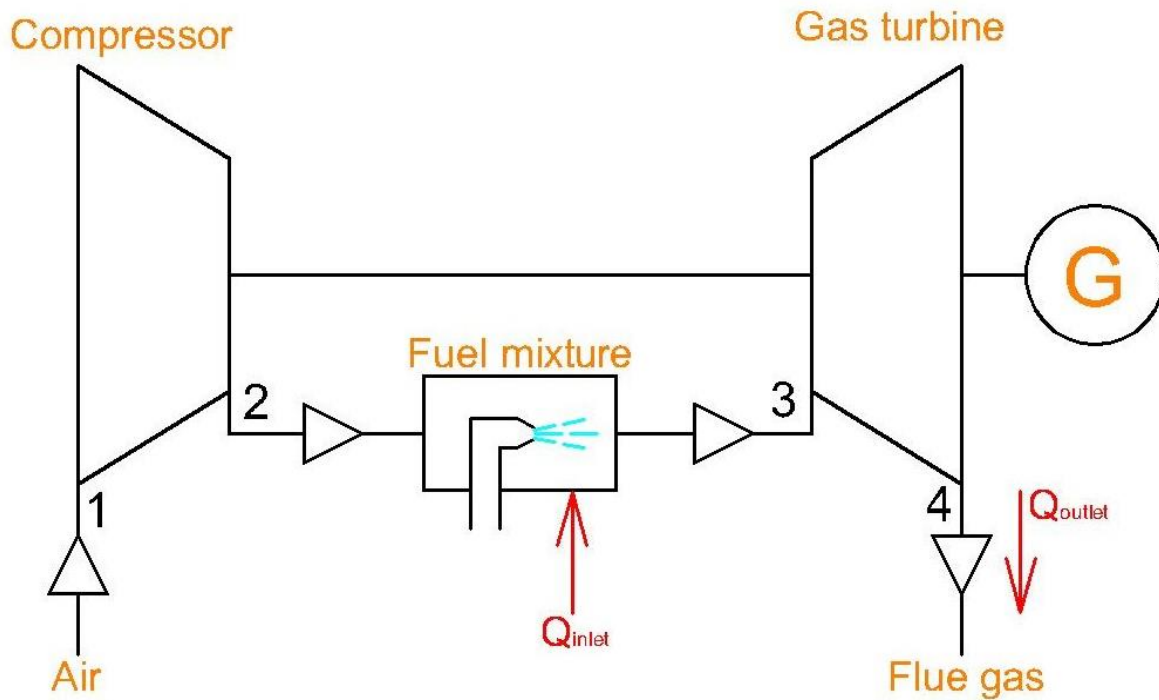
Cyklus lze dělit na cyklus vnější a vnitřní. U vnitřního cyklu se palivo vstřikuje přímo do spalovací komory. Tohoto se využívá především v leteckém průmyslu ve spalovacích turbínách a vlivem menších tepelných ztrát proudění tepla dosahuje oproti vnějšímu cyklu, u kterého proudí teplo ze spalovací komory potrubím do turbíny, větší účinnosti.

Braytonův cyklus má oproti Raikin-Clausiiův vyšší účinnost a za vysokých teplot nevzniká koroze. Účinnost tohoto cyklu se dá dále zvyšovat užitím přehřívání v regenerátoru a předáním zbytkového tepla z výstupu turbíny do potrubí vstupu do zdroje tepla (kotel, reaktor). Užití regenerátoru je podmíněno termickou účinností η_t a dále poměrem teplot T_1/T_3 , jak je patrné z obrázku (18). Regenerační účinnost může dosáhnout až 85%. Účinnost regenerace je vyjádřena v rovnicích (3.9) a (3.10). Dále lze účinnost zvýšit vícestupňovou kompresí a odvodem tepla v mezistupních. Účinnost také může stoupnout zvýšením vstupních parametrů.

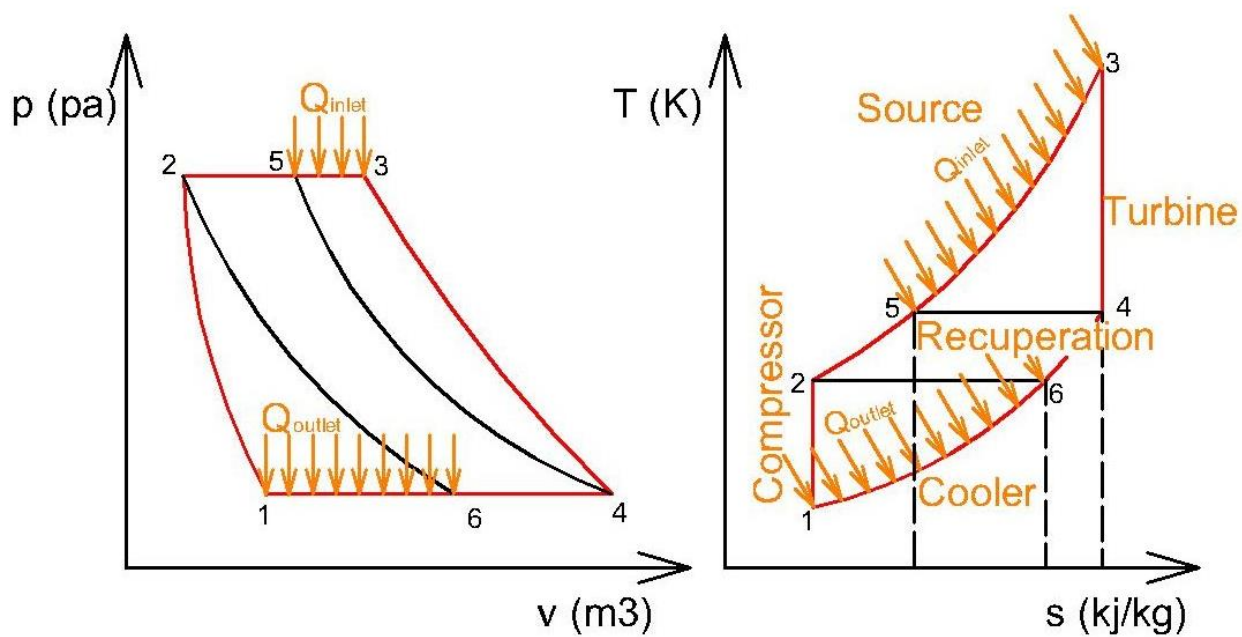
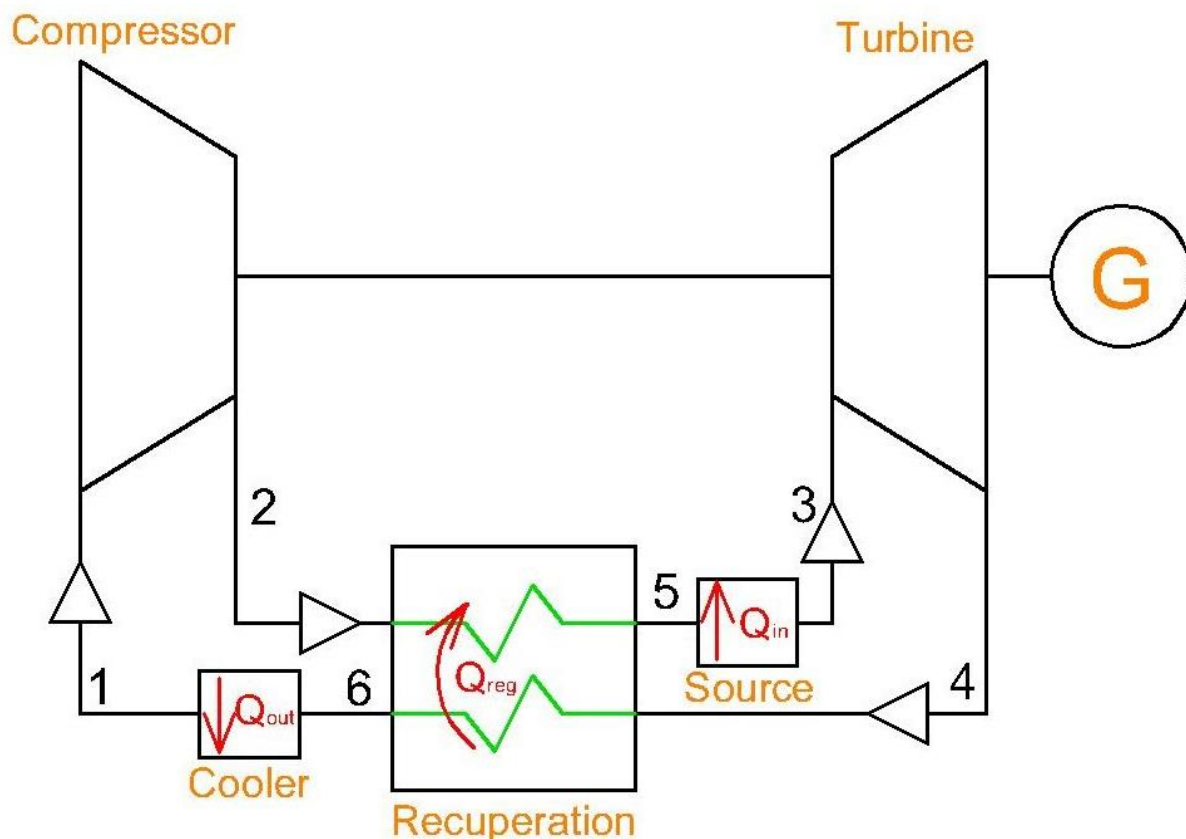
Základní Braytonův ideální cyklus se skládá ze dvou izobar a dvou izoentrop, viz obrázek (16). Pro ideální izoentropické cykly platí vztahy (3.1) až (3.8). Plocha ohraničená izoentropami a izobarami v T-S diagramu je přímo úměrná teplotnímu sdělení (rozdíl teplot přijatého a odevzdaného). Plocha ohraničená izobarami a izoentropami v P-V diagramu je přímo úměrná práci cyklu, kterou lze vypočítat ať už z absolutních nebo technických prací. [10] [11] [12] [13]

Souhrn výhod

- Vyšší tepelnou účinnost.
- Nižší průtok chladiva, což vede k redukci velikosti chladicích čerpadel, potrubí a s tím souvisejícího zařízení.
- Nižší množství chladiva.
- Kompaktnost
- Jednoduchost
- Účinnost
- Nižší teplota



Obr. (16) Otevřený ideální Braytonův cyklus [14]



Obr. (17) Uzavřený ideální Ericsson-Braytonův cyklus s regenerací [14]

Pro Braytonův cyklus platí:

$$\frac{P_2}{P_1} = \pi \quad (3.1)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \varphi \quad (3.2)$$

Pro výpočet teplot platí:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (3.2)$$

$$T_3 = T_2 \frac{V_3}{V_2} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \varphi \quad (3.3)$$

$$T_3 = T_2 \frac{V_3}{V_2} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \varphi \quad (3.4)$$

$$T_4 = T_3 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \varphi \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_1 \varphi \quad (3.5)$$

Pro výpočet účinnosti platí:

a) Bez výměníku tepla Obr. (5)

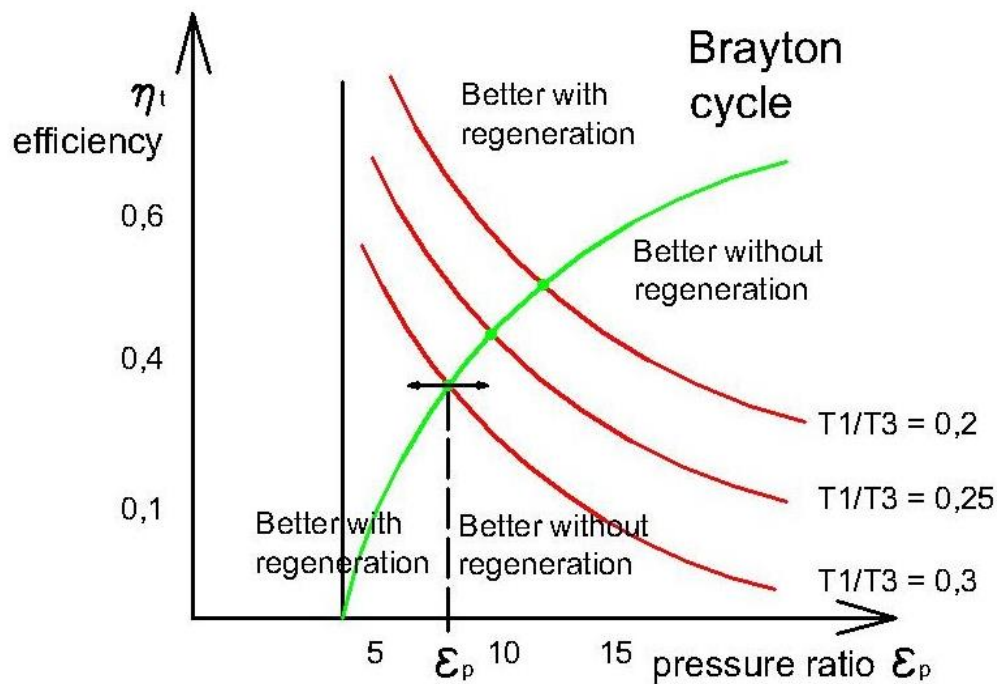
$$\eta_t = 1 - \frac{q_0}{q_p} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \varphi - T_1}{T_1 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \varphi - T_1 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \quad (3.6)$$

b) S výměníkem tepla (regenerace) Obr. (6)

$$\begin{aligned} \eta_t &= 1 - \frac{q_0}{q_p} = 1 - \frac{c_p(T_6 - T_1)}{c_p(T_3 - T_5)} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} \\ &= 1 - \frac{T_1 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - T_1}{T_1 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \varphi - T_1 \varphi} = 1 - \frac{1}{\varphi} \end{aligned} \quad (3.7)$$

a kde

$$c_p = \frac{r - \kappa}{\kappa - 1} \quad (3.8)$$



Obr. (18) Vhodnost užití regenerátoru [18]

$$\eta_{reg} = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2} \quad (3.9)$$

$$\eta_{reg} = \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2} \quad (3.10)$$

Přičemž platí závislost:

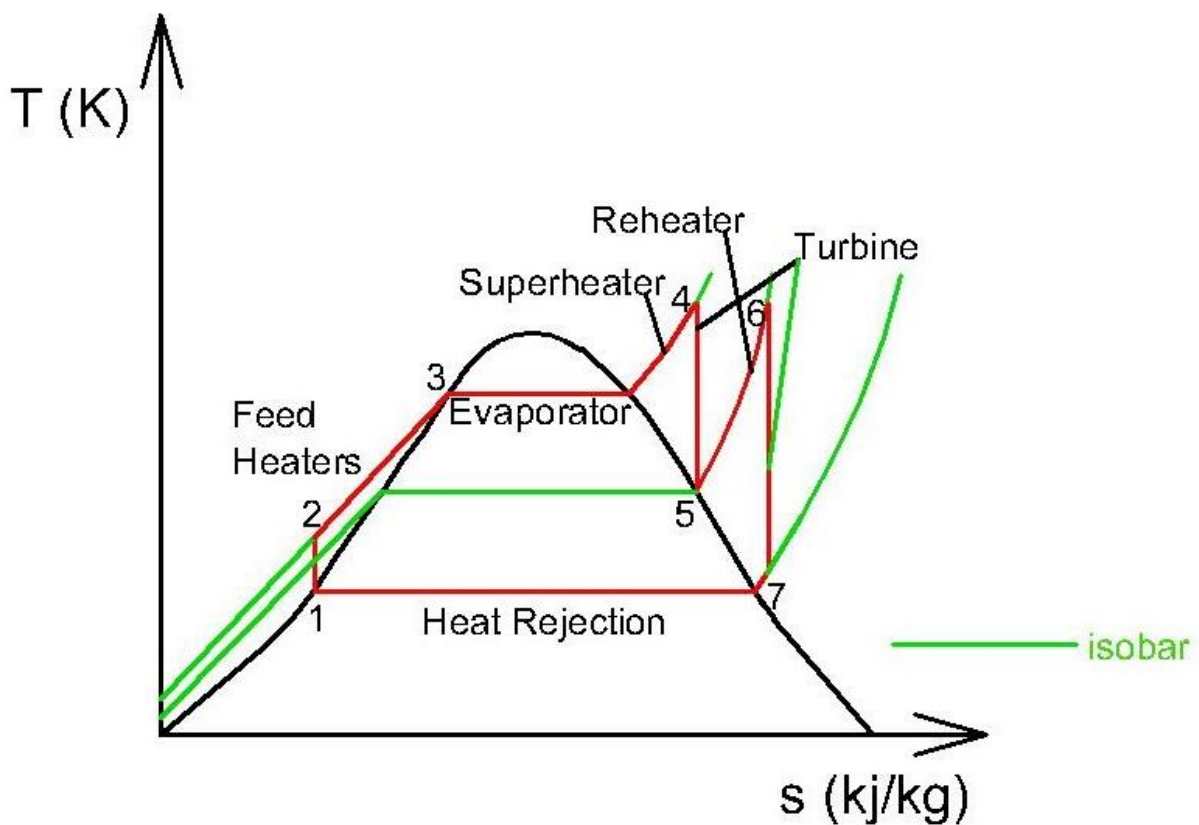
$$Pro \epsilon_p = konst. \quad \eta_t \uparrow s \left(\frac{T_1}{T_3}\right) \downarrow \quad (3.11)$$

A zároveň platí:

$$Pro \left(\frac{T_1}{T_3}\right) = konst. \quad \eta_t \downarrow s \epsilon_p \uparrow \quad (3.12)$$

3.4.2 Rankin-Clausiusův cyklus

V současné době se ve většině tepelných elektráren užívá Rankin-Clausiusův parní cyklus znázorněný na obrázku (19), který tvoří asi 80% vyrobené energie. Základní cyklus je sestaven ze dvou izobar a dvou izoentrop. Pro dosažení přehřáté páry a přiblížení se Carnotovu cyklu (cyklus s největší účinností) lze do tohoto cyklu vložit přehřívák a přeměnit sytou páru na přehřátou. Výkon lze také navýšit snížením tlaku v kondenzátoru, zvýšením admisního tlaku páry (tlak páry kolem 14 MPa, teplota páry kolem 520 °C), což je pára vstupující do turbíny. Dnes se v moderních parních elektrárnách užívá nejen klasického Rankin-Clausiusova cyklu v oblasti podkritické, ale již jsou v provozu i parní elektrárny (Ledvice), které mají cyklus v hodnotách nadkritických při tlacích $p > 22$ Mpa (dnes více než 30 Mpa při výkonech nad 1000 MW). Jak si lze z obr. (19) povšimnout (a zároveň to vyplývá z kontextu), u Rankinova cyklu dochází k několika změnám fází. Snahou do budoucna je zcela nahradit Rankin-Clausiusův cyklus Braytonovým. [10] [11] [12] [13]



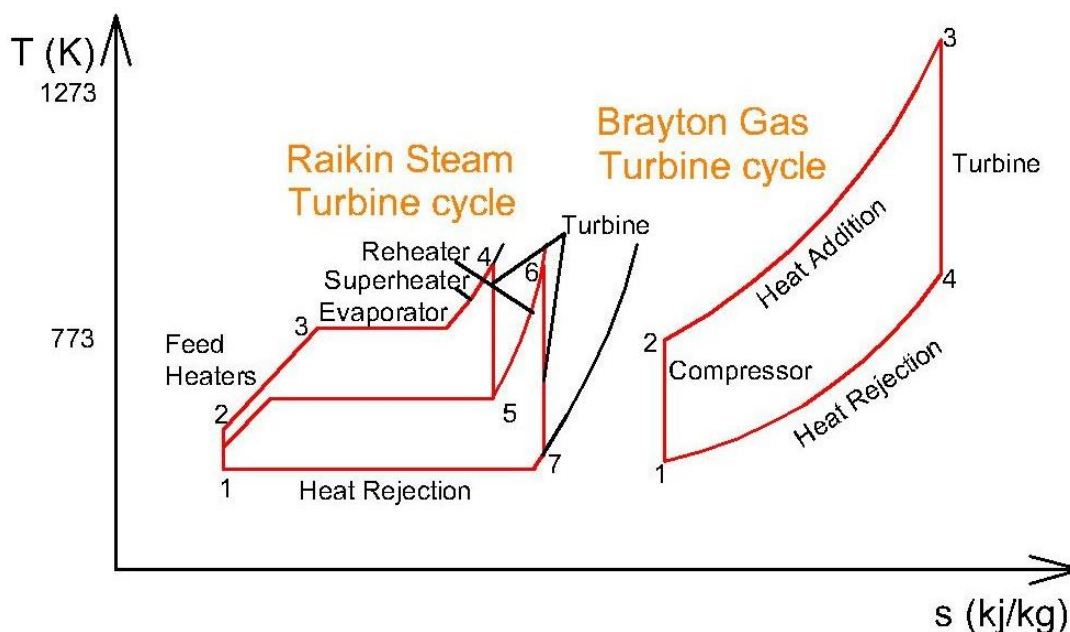
Obr. (19) Rankinův parní cyklus [15]

4 Chlazení směsí plynů He-N₂ v nadkritickém stavu

4.1 Popis a rozdíly v užití různých druhů plynu

V současné době se uvažuje o několika variantách chlazení jaderných reaktorů IV. generace. Mezi plyny, s kterými lze chladit jaderný reaktor, patří: helium, dusík, argon, xenon, oxid uhličitý, pára, vodík a oxid uhelnatý. Vodík je díky svým extrémně výbušným vlastnostem téměř vyloučen. S oxidem uhelnatým se rovněž příliš nepočítá kvůli jeho vysoce toxickým vlastnostem. Nejpravděpodobnější plyny, které lze využít pro chlazení jaderného reaktoru, jsou helium a CO₂. Předpokládá se nadkritické CO₂ o teplotě 550°C (je výhodné jej používat při teplotě nad 500°C) při stejné efektivitě má nižší teplotu než Braytonův heliový cyklus, který má teplotu 850°C, viz obrázek (20), ale heliový cyklus má menší tlak 8 Mpa versus 20 Mpa při stejné efektivitě. Pro modernější cykly s CO₂ se do budoucna uvažuje s teplotami o hodnotě až 650°C. Z tohoto vyplývá nevýhoda cyklu CO₂ oproti heliu musím užít turbokompresory s větším výkonem.

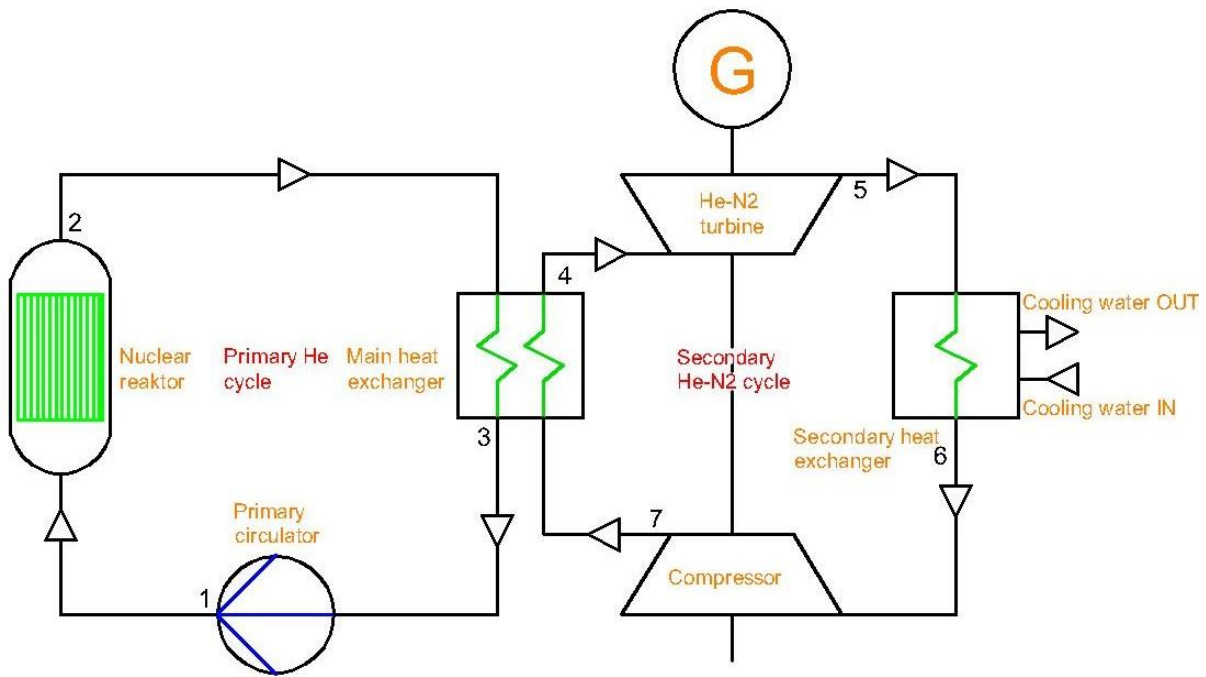
Čisté helium nebo jeho směsi je další z uvažovaných plynů, jež je možno využít v jaderné energetice. Výhodou je zejména použitelnost při jakékoli vysoké pracovní teplotě a tedy má i vyšší účinnost. Helium jako chladivo má potenciál nejen v jaderných reaktorech IV. generace, ale i jako chladivo při vývoji fúzních termojaderných reaktorů. Helium má poměrně velkou tepelnou kapacitu a vodivost. Má velice nízký bod varu. Je inertní, takže je zajištěna ochrana potrubí proti korozi. Helium je nehořlavé, netoxické a nemá výbušné vlastnosti. Je radiačně stabilní a má nízkou neutronovou stabilitu. Má nízkou atomovou hmotnost a je možné jej použít jako moderátor. Je možné jej použít ve směsi s plyny jako je dusík a argon. Tyto plyny nám mohou zlepšit součinitel přestupu tepla. Při použití argonu, což je jednoduchý dvouatomový plyn, se vyhneme komplikací v molekulární struktuře, což neplatí pro dusík. Bohužel jeho nevýhodou je cena, neboť helium je vzácný plyn. Tuto nevýhodu se nám díky směsi plynů podaří zmenšit. Zároveň je to jednoatomový plyn, takže nároky na těsnost potrubí budou rovněž vysoké. Dalšími problémy je malý objemový průtok a tedy i malé lopatky a vysoké obvodové rychlosti.[16] [20]



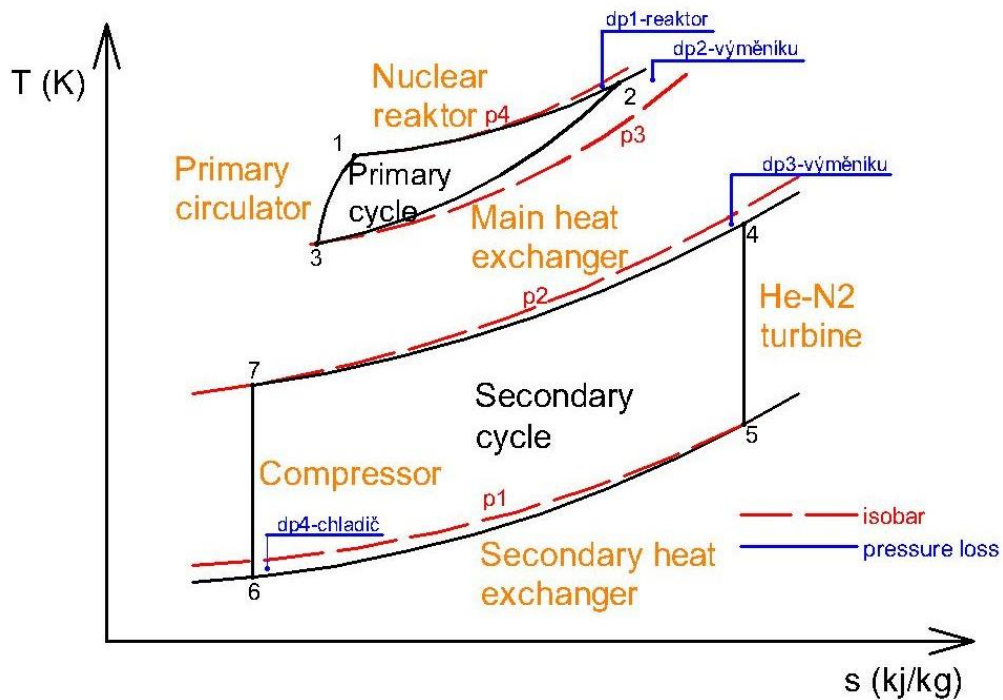
Obr. (20) Porovnání Rankinova parního cyklu s Braytonovým plynovým cyklem v T-S diagramu [9]

5 Výpočet zadaného schématu Braytonova cyklu jaderné elektrárně typu HTHR

5.1 Zadané schéma:

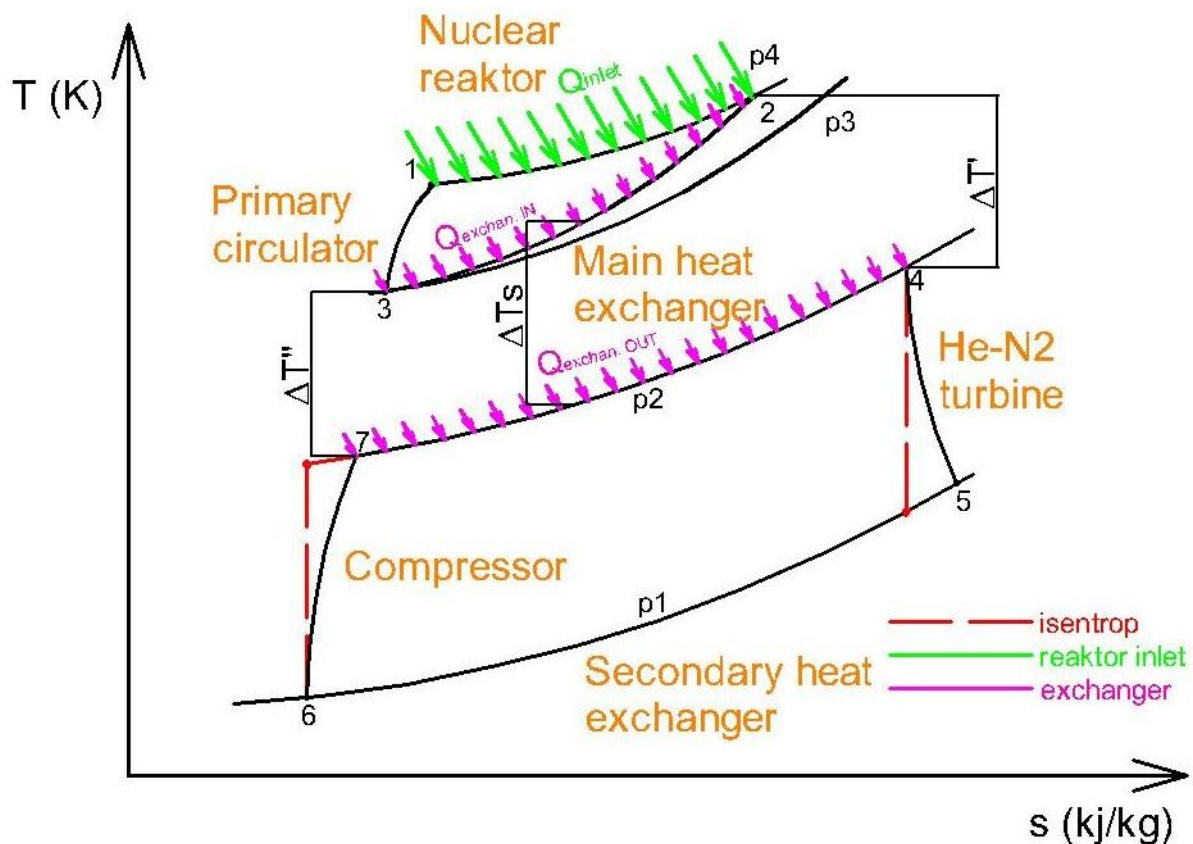


Obr. (21) Nepřímí Braytonův cyklus [19]



Obr. (22) Reálný termodynamický cyklus s uvažováním tlakových ztrát v reaktoru a výměníku.

Pozn. Obrázek (22) je pouze ilustrační, neboť izobary p_4 a p_2 mají podobné hodnoty a ve skutečnosti se překrývají. Obrázek je takto nakreslen pouze kvůli přehlednosti.



Obr. (23) Termodynamický cyklus se zobrazenými vstupy Q_{inlet} z reaktoru a vstupu $Q_{exchanger\ OUT}$ do sekundárního cyklu. Zde je rovněž zavedena účinnost turbíny, kompresoru a dmyhadla.

Výpočet reálného cyklu

Primární heliem chlazený cyklus

V primárním cyklu proudí pouze hélium. To znamená, že zde nepočítám se směsí.

Volané funkce jako např. $hotp$ jsou součástí přílohy. Jsou přílohy kapitola A2.

Pro bod 1 máme dané parametry: T_1, p_4

Jsme schopni pomocí funkce $hotp$ spočítat entalpii v bodě 1.

Pro bod 2 máme dané parametry: T_2 a pokles tlaku v reaktoru dp_1

Tlak v bodě 2 je roven $p = p_4 - dp_1$

Nyní mohu opět dle funkce $hotp$ spočítat entalpii v bodě 2.

Pro bod 3 máme dané parametry: pokles tlaku ve výměníku dp_2 a účinnost dmyhadla η

Tlak p_2 zjistíme z $p_3 = p_4 - dp_1 - dp_2$

V ideálním případě by se entropie $s_1 = s_3$

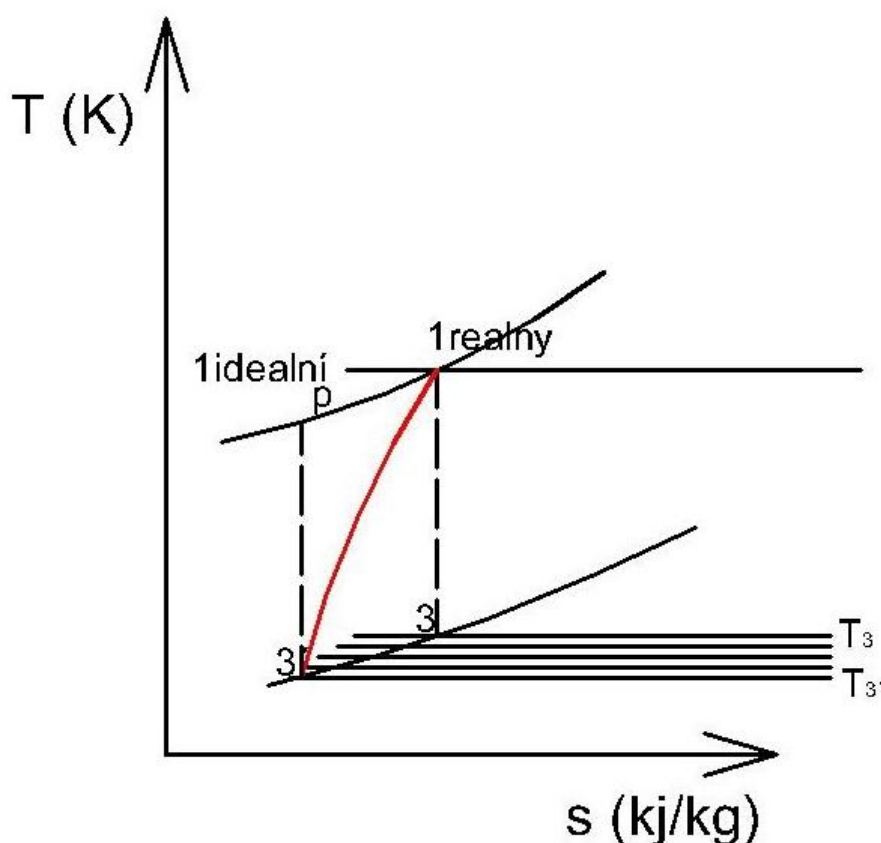
Pomocí databázové funkce hps vypočtu entalpii v bodě 3

Iterací – snižováním entalpie zjistím skutečný bod 3' z rovnosti rovnice (5.1)

$$\eta = \frac{h_{1is} - h_3}{h_1 - h_3} \quad (5.1)$$

Kde h_1 je dané, η dmyhadla je dána, h_{1is} se iteruje, h_3 se iteruje

Výsledkem je zjištěná entalpie h_3 . Pomocí funkce toph zjistíme teplotu T_3 v bode 3 při tlaku p_3 obrázek (24).



Obr. (24) Iterace v primární části cyklu

Sekundární směsí HE+N₂ chlazený cyklus

Pro bod 4 je dáno: k, S, L:

Je patrné, že teplo mezi body 2 a 3 rovnice (5.2) musí předáno mezi body 4 a 7:

Výpočet provedeme pomocí vzorců pro výměník. V našem případě – protiproud.

$$Q = h_2 - h_3 \quad (5.2)$$

Vyjdeme ze vztahu, že

$$Q = \Delta T_s k S \quad (5.3)$$

Ekvivalentní úpravou dostaneme, že

$$\Delta T_s = \frac{Q}{k S} \quad (5.4)$$

Zároveň pro výměník tepla platí, že

$$\Delta T_s = \text{"úpravy"} = \frac{\Delta T' - \Delta T''}{\ln \frac{\Delta T'}{\Delta T''}} \quad (5.5)$$

kde

„ $\Delta T = \Delta T' e^{-kx}$ navzdálenosti L je $\Delta T'' = \Delta T' e^{-kL}$ provedeme substitucí“

$$\Delta T_s = \frac{\Delta T' - \Delta T' e^{-kL}}{\ln \frac{\Delta T'}{\Delta T' e^{-kL}}} \quad (5.6)$$

Po dosazení

$$\Delta T_s = \frac{(T_2 - T_4) - (T_2 - T_4)e^{-kL}}{\ln \frac{(T_2 - T_4)}{(T_2 - T_4)e^{-kL}}} \quad (5.7)$$

Provedeme iteraci, tak aby se levá strana vyrovnala pravé.

Z této iterace jsme zjistili teplotu T4.

Pokud opět dosadíme do $\Delta T'' = \Delta T' e^{-kL}$ za $\Delta T'$, tak můžeme vypočítat $\Delta T''$.

Zde je $\Delta T'' = T_3 - T_7$. Z tohoto vztahu dostaneme teplotu T7.

V bodě 6 známe teplotu T6 a tlak směsi p1:

Tlak v bodě 6 je ponížen o tlakovou ztrátu dp4a tedy tlak v bodě 6 je $p = p_1 - dp_4$.

Ze zadaných objemových podílů dusíku a helia zjistíme parciální tlak P1 pomocí vztahů (5.8) a (5.9).

$$p_{1\text{parc.}} = p_1 \omega_{he} \quad (5.8)$$

$$p_{1\text{parc.}} = p_1 \omega_{N_2} \quad (5.9)$$

Kde objemový podíl vyjádříme takto:

$$\omega_{he} = \frac{\frac{w_{he}}{M_{he}}}{\sum_1^n \frac{w_n}{M_n}} \quad (5.10)$$

$$\omega_{N_2} = \frac{\frac{w_{N_2}}{M_{N_2}}}{\sum_1^n \frac{w_n}{M_n}} \quad (5.11)$$

Dále pomocí funkce hotp můžeme zjistit entalpie v bodě 6.

Pro bod 7 jsme již zjistili teplotu T7 směsi:

V ideálním případě by entropie v bodě 6 byla stejná jako v bodě 7.

Pomocí databázové funkce pots zjistíme tlak p2 v ideálním případě.

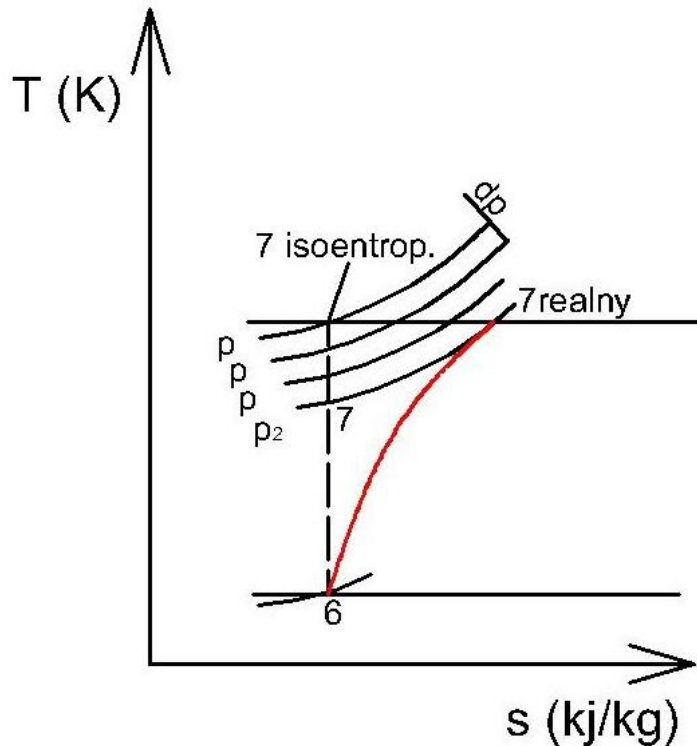
Provedeme iteraci tak, že snižujeme tlak.

Iterací – snižováním tlaku zjistíme skutečný bod 7 z rovnice (5.12) a parciální tlak p2.

$$\eta = \frac{h_{7is} - h_6}{h_7 - h_6} \quad (5.12)$$

Kde h_6 je dané, η kompresoru je dána, h_{7is} se iteruje, h_7 se iteruje

Výsledkem je entalpie v bodě 7 a zjištěný tlak p_2 obrázek (25).



Obr. (25) Iterace v sekundární části cyklu

Tlak v bodě 4 je ponížen o ztrátu dp_3 ve výměníku.

Tedy tlak v bodě 4 je roven $p = p_2 - dp_3$.

Pomocí zjištěného parciálního tlaku p_2 poníženého o dp_3 a teploty T_4 můžeme zjistit entalpii v bodě 4 a to funkcí h_{tp} .

Pro bod 5 je znám parciální tlak p_1 a je dána účinnost turbíny:

Vycházím z uvažování, že v ideálním případě je entropie v bodě 4 je stejná jako v bodě 5.

Pomocí funkce h_{ops} vypočtu ideální entalpii v bodě 5.

Ze vzorce (5.13) pro účinnost turbíny vypočtu skutečnou entalpii (5.14) v bodě 5.

$$\eta_t = \frac{h_5 - h_4}{h_{5is} - h_4} \quad (5.13)$$

$$h_5 = \eta_t(h_{5is} - h_4) + h_4 \quad (5.14)$$

Pomocí funkce tops zjistím teplotu v bodě 5.

Tento postup provedeme separátně pro oba plyny a tímto obdržíme matice N a M.

Matice N je matice pouze pro helium a matice M pouze pro dusík. V těchto maticích jsou rozdílné entalpie. Každý cyklus má 3 řádky. V prvním řádku jsou uloženy teploty, v druhém entalpie a ve třetím se nachází entropie. Sloupce jsou uspořádány chronologicky od bodu 1 do bodu 7. Parciální tlaky pro helium jsou uloženy v matici Pparc a pro dusík Pparc1.

Výpočet směsi

Cp v bodě 4 a 7 je vypočteno z funkce cpotp

Cp směsi je definována dle vzorce(5.15) pro výpočet objemové měrné tepelné kapacity.

$$C_s = \sum C_i \frac{V_i}{V_s} = \sum C_i \omega_i = C_{pHe} \omega_{he} + C_{pN2} \omega_{N2} \quad (5.15)$$

Tlak směsi je definován v druhé části Daltonova zákona. Součet parciálních tlaků složek pi se rovná tlaku směsi ps, jak lze vidět v rovnici (5.16).

$$p_s = \sum p_i = Pparc_i + Pparc1_i \quad (5.16)$$

Entalpii směsi je vypočítána z bilance pro entalpii viz (5.17) a ekvivalentními úpravami dostaneme výsledný vztah (5.18). Zde je h1 entalpie prvního a h2 entalpie druhého plynu v témž bodě a hs je entalpie směsi.

$$h_s \cdot m_s = (h_1 \cdot m_1 + h_2 \cdot m_2) \quad (5.17)$$

$$h_s = (h_1 \cdot m_1 + h_2 \cdot m_2) / m_s \quad (5.18)$$

kde

$$m_s = (m_1 + m_2) \quad (5.19)$$

Protože neznám hmotnosti a mám zadané pouze objemové podíly, tak musím objemové podíly přepočítat na hmotnostní s pomocí vzorce (5.20).

$$\sigma_i = \frac{m_i}{m_s} = \frac{m_i}{\sum m_i} = \frac{n_i \cdot M_i}{\sum n_i \cdot M_i} = \frac{\frac{n_i}{n_s} M_i}{\sum \frac{n_i}{n_s} M_i} = \frac{\omega_i M_i}{\sum \omega_i M_i} \quad (5.20)$$

Všechny entalpie jsou uloženy v matici K.

Každý cyklus má 3 řádky. V prvním řádku jsou uloženy teploty, v druhém entalpie a ve třetím se nachází entropie. Sloupce jsou uspořádány chronologicky od bodu 1 do bodu 7.

Celková tepelná účinnost cyklu je definována dle vztahu (5.21).

$$\eta_{tc} = \frac{\text{Net work Output}}{\text{Heat Input}} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad (5.21)$$

kde

$$\begin{aligned} W_{net} &= W_{turbíny} - W_{kompresoru} - W_{dmychadla} = \\ &= (h_4 - h_5) - (h_7 - h_6) - (h_2 - h_3) \end{aligned} \quad (5.22)$$

a kde

$$Q_{in} = C_{s4}T_4 - C_{s7}T_7 \quad (5.23)$$

Pro výpočet přímého cyklu je postup obdobný. Pouze část s výpočtem výměníku se neuvažuje a nevyskytuje se zde druhý plyn. To znamená, že v cyklu proudí pouze čisté helium a výpočet je jednodušší. [12], [17]

5.3 Programové řešení

Zadané hodnoty lze vidět v Obr. (26)

Cyklus 1:

T1=533K, T2=900K, T6=363K, p1=5Mpa, p4=7Mpa, $\omega=0.8$

Cyklus 2:

T1=540K, T2=1000K, T6=320K, p1=5Mpa, p4=7Mpa, $\omega=0.7$

Cyklus 3:

T1=550K, T2=1010K, T6=340K, p1=5.4Mpa, p4=7.2Mpa, $\omega=0.85$

Pro všechny tři cykly platí:

$$\begin{aligned}\eta_t &= 0.9 \\ \eta_d &= 0.8 \\ \eta_c &= 0.8 \\ S &= 10 \\ L &= 6 \\ k &= 5 \\ dp_1 &= 0.01 \\ dp_2 &= 0.01 \\ dp_3 &= 0.02 \\ dp_4 &= 0.01\end{aligned}$$

```
Uitejte
Prosim zadejte vstupni parametry cyklu
Volit muzete z hodnot p1, p2, T1, T2, T3, T4, n1, k1,
p-tlak, T-teplota, n-ucinnost turbiny., k-ucinn. kompresoru

Jsou zde dva okruhy Ano/Ne: Ano
<T1;T2;T6;p1;p4>: [533,540,550;900,1000,1010;363,320,340;5,5,5.4;7,7,7.2]
Zadejte ucinnost primarniho dmyhadla: 0.8
Zadejte ucinnost sekundarni turbiny a kompresoru ve tvaru: [nt,nk]: [0.9,0.8]
Zadejte dp primarniho vymenik a reaktoru okruhu[vymenik, reaktor]: [0.01,0.02]
Zadejte dp sekundarniho vymenik a chladic okruhu[vymenik, kompr]: [0.01,0.01]
Zadejte soucinitel prostupu tepla : 5
Zadejte plochu vymeniku : 10
Zadejte delku vymeniku : 6
Zadejte plyny ve formatu : [plyn1,plyn2] [49,42]
Zadejte objemovr pomyr omega: [0.8,0.7,0.85]
octave-3.2.4.exe:3> _
```

Obr. (26) Vstupní parametry pro porovnání tří cyklů

Všechny výstupní parametry jsou seřazeny na Obr. (27).

Cyklus 1:

Měrná práce cyklu:

$$W = W_t - W_c - W_d = 272,93 - 200,43 - 5,34 = 67,16 \frac{kJ}{kg}$$

$$\eta_{tc} = 0,0819 \cdot 100 = 8,19\%$$

Cyklus 2:

Měrná práce cyklu:

$$W = W_t - W_c - W_d = 411,88 - 265,14 - 5,41 = 141,32 \frac{kJ}{kg}$$

$$\eta_{tc} = 0,114 \cdot 100 = 11,4\%$$

Cyklus 3:

Měrná práce cyklu:

$$W = W_t - W_c - W_d = 390,46 - 261,01 - 5,36 = 124,09 \frac{kJ}{kg}$$

$$\eta_{tC} = 0,134 \cdot 100 = 13,4\%$$

```
---Vysledky---
Cyklus 1
Teploty v bode 1 az 7
 533.00  900.00  531.99  889.00  714.77  363.00  482.03
Entalpie v bode 1 az 7
 2789.20  4693.32  2783.85  1503.20  1230.27  598.82  799.25
Merna prace dmyhadla 1
 5.3487
Merna prace kompresoru 1
 200.43
Merna prace turbiny 1
 272.93
Ucininnost cyklu 1
 0.081911

---Vysledky---
Cyklus 2
Teploty v bode 1 az 7
 540.00  1000.00  538.97  989.00  730.08  320.00  477.35
Entalpie v bode 1 az 7
 2825.51  5212.28  2820.10  1682.62  1270.74  525.47  790.61
Merna prace dmyhadla 2
 5.4110
Merna prace kompresoru 2
 265.14
Merna prace turbiny 2
 411.88
Ucininnost cyklu 2
 0.11406

---Vysledky---
Cyklus 3
Teploty v bode 1 az 7
 550.00  1010.00  548.98  999.00  754.92  340.00  494.53
Entalpie v bode 1 az 7
 2877.99  5264.73  2872.63  1700.43  1309.97  559.26  820.27
Merna prace dmyhadla 3
 5.3635
Merna prace kompresoru 3
 261.01
Merna prace turbiny 3
 390.46
Ucininnost cyklu 3
 0.13401
```

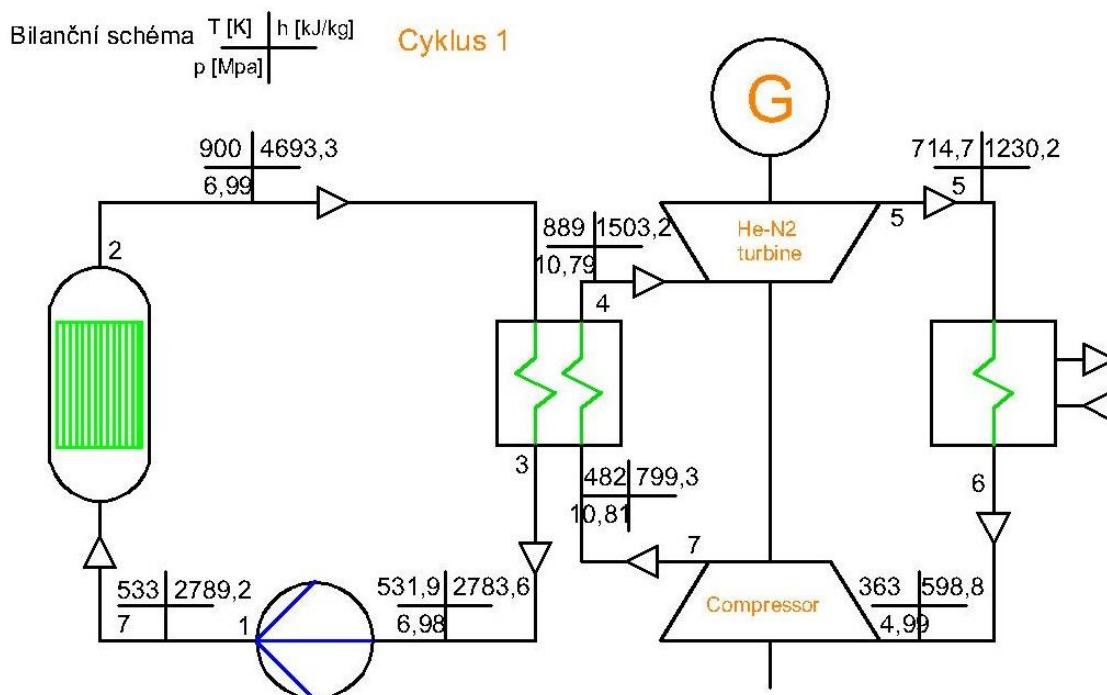
Obr. (27) Výstupní parametry

5.3 Bilanční schémata cyklu

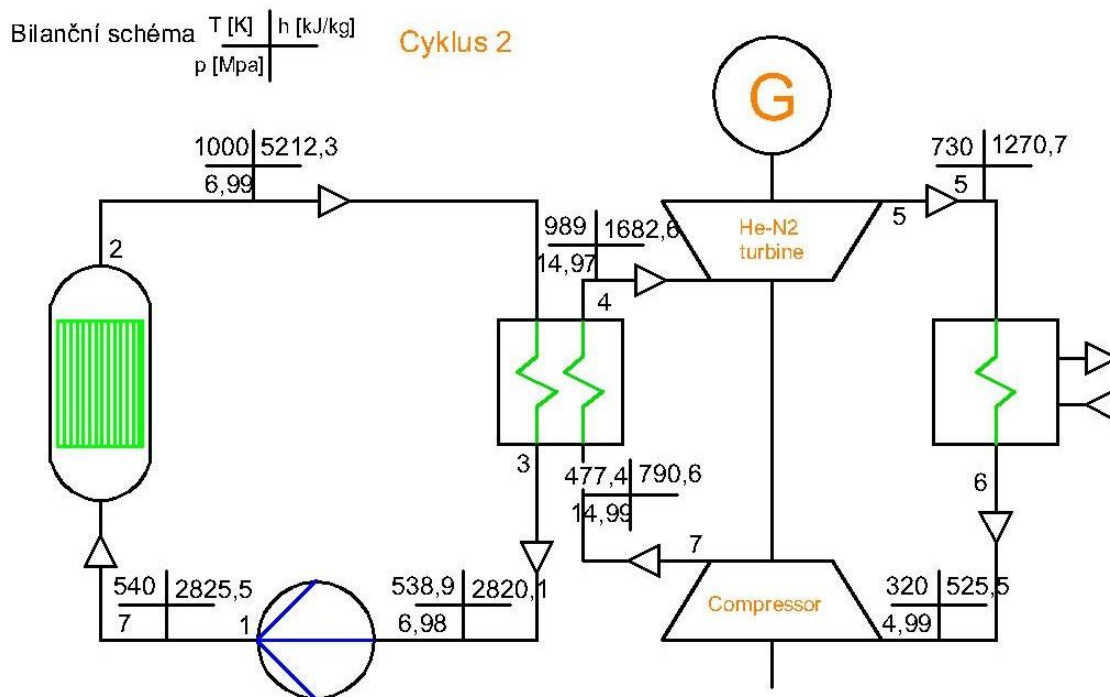
Parametry Bilanční schémata cyklu 1 můžete vidět na obrázku (28).

Parametry Bilanční schémata cyklu 1 můžete vidět na obrázku (29).

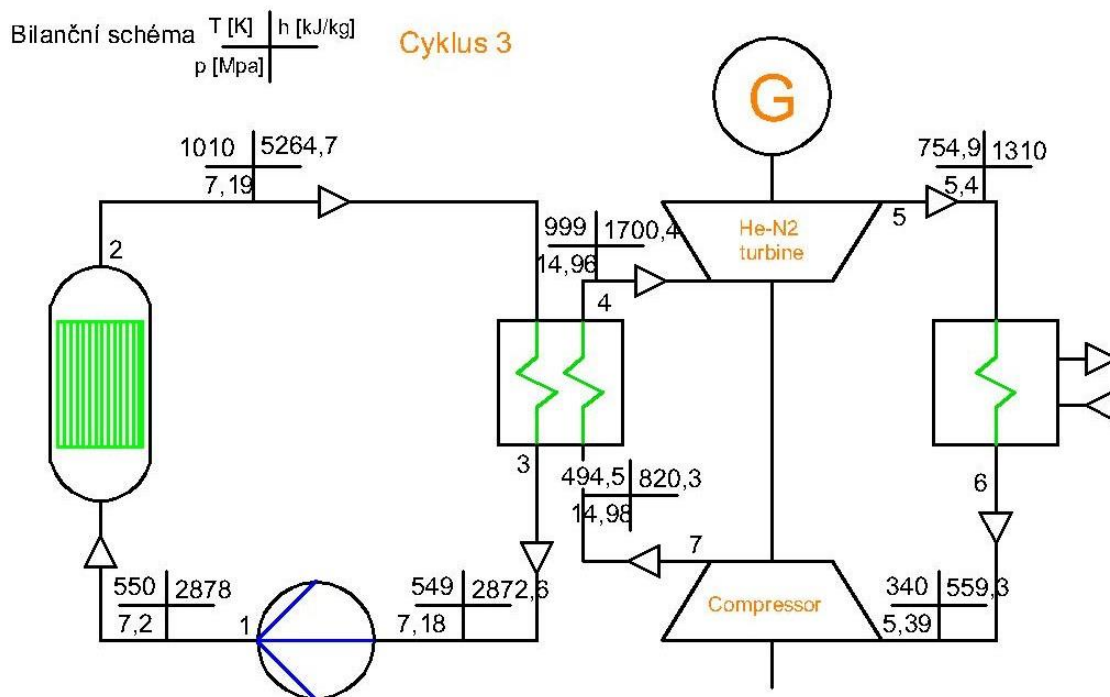
Parametry Bilanční schémata cyklu 1 můžete vidět na obrázku (30).



Obr. (28) Bilanční schéma 1. Cyklu



Obr. (29) Bilanční schéma 2. Cyklu



Obr. (30) Bilanční schéma 3. cyklu

5.5 Uživatelský manuál

Přímý cyklus

```

Uitejte
Prosím zadejte vstupní parametry cyklu
Uolít můžete z hodnot p1, p2, T1, T2, T3, T4, n1, k1,
p-tlak, T-teplota, n-účinnost turbíny., k-účinn. kompresoru

Jsou zde dva okruhy Ano/Ne: Ne
Budete zadávat T1 nebo T2? T1
Budete zadávat T3 nebo T4? T4
Zadejte maticic ve tvaru [T1vT2;T3vT4;p1;p2]: [363,295;679,585;0.5,0.4;0.7,0.8]
Zdejte dp primárního chladiče a reaktoru okruh[chladič, reaktor]: [0.1,0.15]
Zadejte účinnost primární turbíny a kompresoru ve tvaru: [nt,nk]: [0.95,0.8]
    
```

Obr. (31) Vytisknutí příkazového řádku z programu Octave3.2.4 pro přímý cyklus

Vstupy, které jsou popsány v textu v dole, tak jsou zároveň znázorněny v Obr. (31).

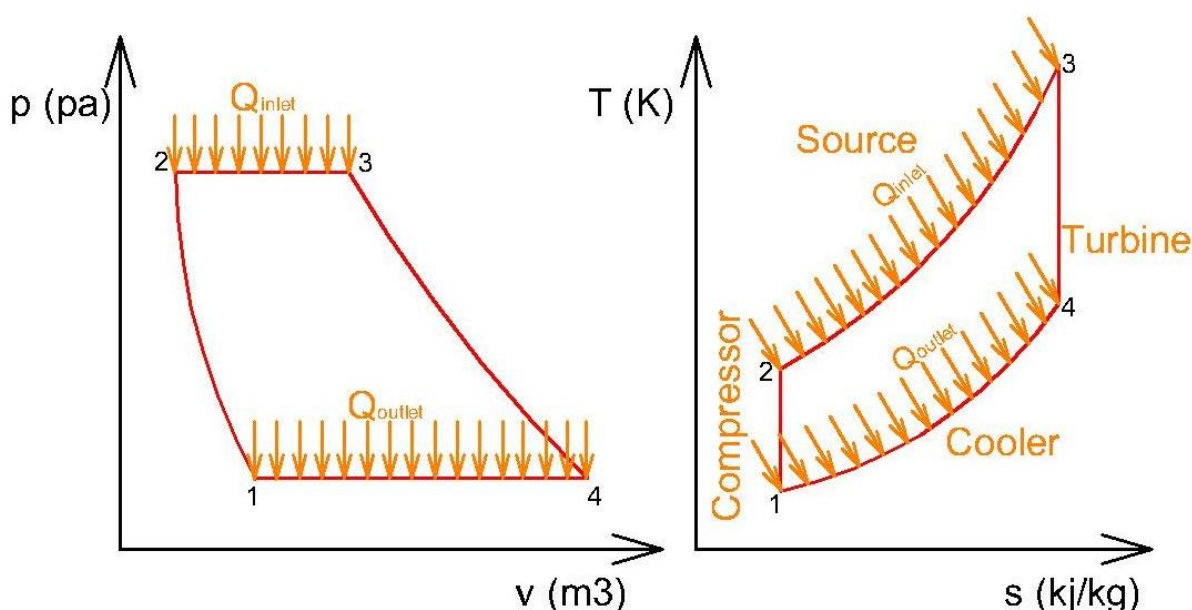
Pro přímý cyklus vložíme do prvního příkazového řádku „Ne“.

V jednookruhovém cyklu si můžeme vybrat, zda jsou vstupní parametry T1 nebo T2 a zvolíme do příkazového řádku.

Dále si můžeme vybrat, zda další vstupní parametr je T3 nebo T4 a zvolíme.

Následně vložíme matici s hodnotami. Čárky oddělují počet cyklů. To znamená, že veličiny 363 a 295 jsou teploty pro první a pro druhý cyklus. V tomto případě jsme zvolili, že se jedná o teplotu T_1 . Kdybychom za 295 umístili čárku, tak můžeme vložit hodnotu třetího cyklu atd. Tímto způsobem určujeme počty cyklů, jež chceme porovnat. Hodnoty z odlišných bodů se oddělují středníkem, jak je vidět na obrázku (31). Hodnoty 679 a 585 značí námi zvolenou teplotu T_4 , přičemž 679 je hodnota prvního a 585 druhého cyklu. Dále jsou zde p_1 s hodnotami 0,5 a 0,4 pro první a druhý cyklus. Na posledních místech matice jsou hodnoty tlaků p_2 a ty mají velikost 0,7 a 0,8.

V páté příkazové řádce se nachází matice tlakových ztrát v chladiči a reaktoru. Tyto hodnoty jsou pouze dvě pro libovolný počet cyklů. Je to proto, abychom měli nějaké společné měřítko pro všechny cykly a mohly je porovnat. Týmž důvod platí i pro poslední příkazový řádek, kde je matice složená také ze dvou veličin, a to účinnosti turbíny a kompresoru. Umístění bodů T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , p_1 , p_2 můžete vidět v obrázek (32).



Obr. (32) Body v programu

Nepřímý cyklus

```

Uitejte
Prosim zadejte vstupni parametry cyklu
Volit muzete z hodnot p1, p2, T1, T2, T3, T4, n1, k1.
p-tlak, T-teplota, n-ucinnost turbiny., k-ucinn. kompresoru

Jsou zde dva okruhy Ano/Ne: Ano
Zadejte maticic ve tvaru: [T1;T2;T6;p1;p4]: [533,540;789,790;363,313;5,5.4;7,71
Zadejte ucinnost primarniho dmyhadla: 0.8
Zadejte ucinnost sekundarni turbiny a kompresoru ve tvaru: [nt,nk]: [0.95,0.8]
Zdejte dp primarniho vymenik a reaktoru okruhu[vymenik, reaktor]: [0.1,0.15]
Zdejte dp sekundarniho vymenik a chladic okruhu[vymenik, kompr]: [0.12,0.12]
Zadejte soucinitel prostupu tepla : 5
Zadejte plochu vymeniku : 10
Zadejte delku vymeniku : 6
Zadejte plyny ve formatu : [plyn1,plyn2] [49, 42]
Zadejte objemovr pomyr omega: [0.8, 0.7]
    
```

Obr. (33) Vytisknutí příkazového řádku z programu Octave3.2.4 pro nepřímý cyklus

Následující vstupy, které jsou popsány v textu dole a jsou znázorněny v obr. (33).

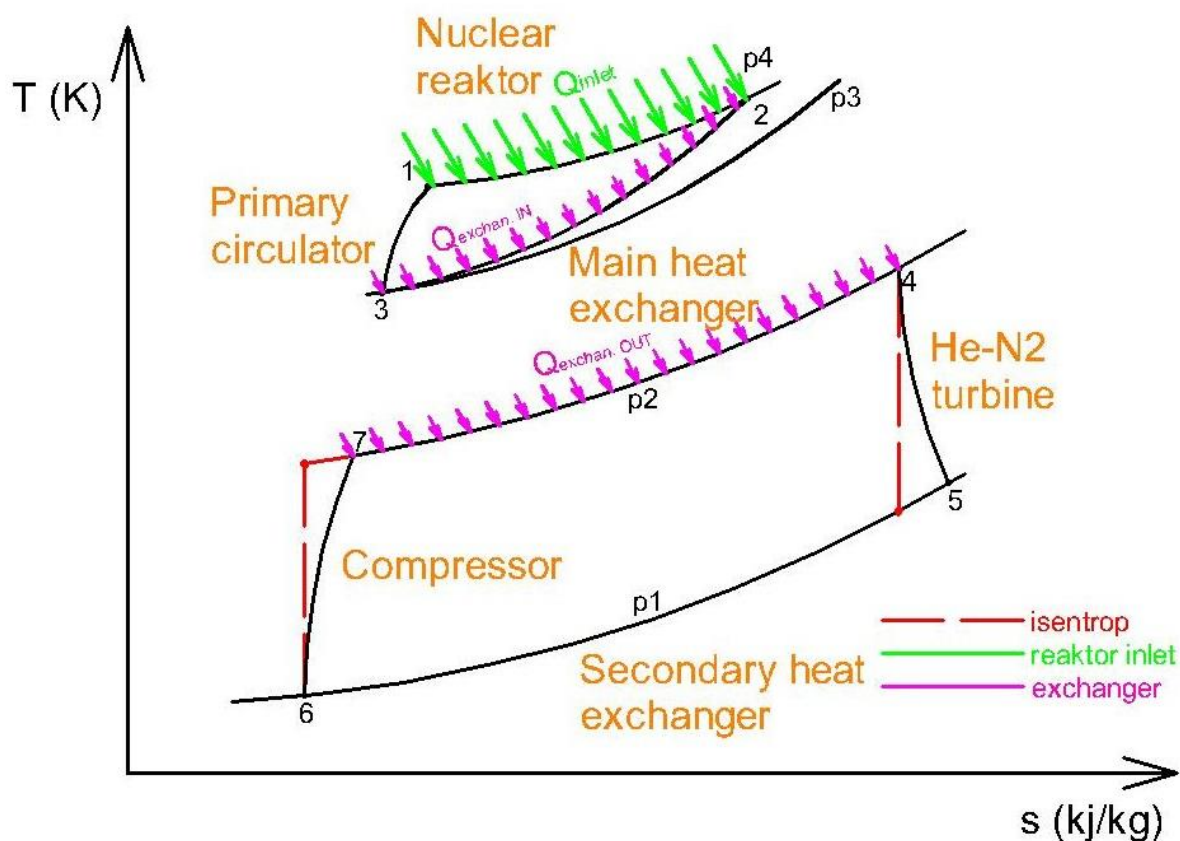
Pro nepřímý cyklus vložíme do prvního příkazového řádku Ano.

Pro nepřímý cyklus zadáváme hodnoty T_1 , T_2 , T_6 , p_1 , p_4 . Zadávání do matice je analogické přímému cyklu, takže hodnoty pro jednotlivé cykly oddělíme čárkou a další veličinu v odlišném bodě středníkem.

Všechny účinnosti jsou zadány pouze jednou a jsou společné pro všechny cykly, abychom tyto cykly mohli porovnat. Odděleny jsou čárkami.

Umístění bodů T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 , T_7 a p_1 , p_2 , p_3 , p_4 můžete vidět v obr(34).

Teploty jsou zadávané v Kelvinech a tlaky v Mpa.



Obr. (34) Body v programu

6. Závěr

Pro výpočet jsem použil Vzorce pro směs ideálních plynů, neboť se nacházíme dostatečně daleko od kritického bodu. Samotný výpočet je prováděn funkcemi, které jsou nadefinovány pro reálné plyny. Při vyšších teplotách než je 1000°C se u dusíku vyskytuje chyba okolo 10%. Tato chyba se částečně eliminuje směsí s heliem, protože helium je dostatečně daleko od kritického bodu a chová se jako ideální plyn.

Do programu se musí zadávat tlaková ztráta výměníku a jeho délka. Tato tlaková ztráta se může do programu vložit jako funkce délky (plochy) výměníku. Účinnost kompresoru rovněž není konstantou, neboť je závislá na počtu stupňů turbíny.

V primárním cyklu protéká množství helia m_1 s dobrou měrnou tepelnou kapacitou. V sekundárním cyklu protéká množství směsi helia a dusík s horší tepelnou kapacitou a z tohoto vyplývá, že musím do sekundárního cyklu umístit více chladiva m_2 , abych mohl všechno teplo převzít z primárního cyklu. Tím se ovšem zvětšují zařízení jako jsou kompresory a výměník. Z toho vyplývají větší náklady, prostorová náročnost a častější možnosti poruch.

Účinnost turbíny je také závislá na počtu stupňů v turbíně. Počet stupňů je závislý na vlastnostech protékaného média tak, že ve vztahu $\frac{u}{c}$ dostanu optimální tlakový spád a z tohoto zjistím počet stupňů turbíny. Je zřejmé, že čím více stupňů turbíny je zhotoveno, tím jsou zde větší mechanické ztráty turbíny a tím je menší i její účinnost. Výsledná účinnost je rovna součinu mechanických účinností jednotlivých stupňů.

Ve výsledku není účinnost cyklu zdaleka očekávaných 42-47% procent. Vysvětlením je, že tento cyklus nevyužívá regenerace, která nám může zvednout účinnost o desítky procent. Další možností je, že program obsahuje programátorskou chybu. K této variantě se však po prostudování článku [TheBraytonCyclewithRegeneration, Intercolling, & Reheating](#) nepřikláním. [19]

7 Seznam použitých veličin

Název veličiny	Značka veličiny	Jednotky	Název veličiny	Značka veličiny	Jednotky
Tlak	p_i	Mpa	Tep.kapacita při $p=\text{konst.}$	c_p	$\frac{J}{KgK}$
Objem	v_i	m^3	Poissonovo číslo	κ	-
Teplota	T_i	$^{\circ}C / K$	Poměr tlaků	π, ε	-
Hustota	ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Poměr objemů	φ	-
Celková účinnost	η	%	Plynová konstanta	r	$\frac{J}{KgK}$
Účinnost turbíny	η_t	%	Výkon	P	W
Účinnost kompresoru	η_c	%	Molární hmotnost	M	$\frac{g}{mol}$
Přivedené teplo	q_p	$\frac{J}{Kg}$	Hmotnostní průtok	\dot{m}	$\frac{kg}{s}$
Odvedené teplo	q_o	$\frac{J}{Kg}$	Měrná práce turbíny	w_t	$\frac{J}{Kg}$
Měrná práce cyklu	W	$\frac{J}{Kg}$	Měrná práce kompresoru	w_k	$\frac{J}{Kg}$
Měrná entalpie	H	$\frac{J}{Kg}$	Index	x	-
Měrná entropie	s	$\frac{J}{KgK}$	Tep.kapacita při $v=\text{konst.}$	c_v	$\frac{J}{KgK}$
Objemový podíl	ω	-	Střední logaritmický rozdíl	ΔT_s	K

Součinitel přestupu tepla	k	$\frac{W}{m^2K}$	Izoentropická rychlost	c	$\frac{m}{s}$
Obvodová rychlost	u	$\frac{m}{s}$	Termická účinnost cyklu	η_{tC}	%
Účinnost dmyhadla	η_d	%	Plocha výměníku	S	m^2
Délka výměníku	L	m	Měrná práce dmyhadla	w_d	$\frac{J}{Kg}$

8 Seznam literatury

8.1 Knižní publikace

- [7] DOSTÁL, V., Jaderné reaktory IV. generace. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2010
- [9] RAGHEB M., Nuclearreactorconcepts and thermodynamiccycles, 23/2/2013
- [11] SNÁŠEL, J., Netradiční tepelné oběhy Vysoké učení technické v Brně, 2010
- [12] LINHART, J., Termomechanika, stručné učební texty ZČU, Fakulta strojní Plzeň
- [13] Žilinská univerzita v Žilině, Strojnícka fakulta, Katedra energetickej techniky, Zdroje tepla, Přednáška 5. 2010
- [18] ŠTĚTINA, J., Oběhy spalovacích turbín proudění plynů a par. Brno: VÚT Brno, FST, Energetický ústav odbor termomechaniky a techniky prostředí, 2008
- [20] HABERSTROH Ch., Helium refrigerationfor SC Accelerators 2009, TechnischeUniversitatDresden

8.2 PUBLIKACE NA INTERNETU

[1] <http://encyclopedia.airliquide.com/Encyclopedia.asp?LanguageID=11&CountryID=19&Formula=h2o&GasID=20&UNNumber=>

Air lipide 2013

[2] <http://www.lsbu.ac.uk/water/data.html>

Waterstructure and science, Martin Chaplin

[3] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Voda>

Wikipedie otevřená encyklopedie

[4] http://www.engineeringtoolbox.com/spesific-heat-capacity-gases-d_159.html

TheEngineeringToolBox

[5] <http://www.nist.gov/data/PDFfiles/jpcrd250.pdf>

Thermophysicalpropertiesof Fluid D2O, KESTIN J., SENGER J.V., KAMGAR-PARSI B., SENGER LEVELT J.M.H

[6] http://www.chem.queensu.ca/people/faculty/mombourquette/Chem221/5_PhaseChanges/PhaseDiagrams.asp

Phasediagrams, MOMBOURQUETTE M.

[7] www.cea.fr

BURLET,H., Material and componentsforgascooledreactors, cea 2012

[8] <http://www.nucleartourist.com/type/pwr.htm>

Copyright © 1996-2006. JTheVirtualNuclearTourist. Allrightsreserved. Revised: December 19, 2005.

[10] magazin, Solar Thermal, Supercritical CO2 BraytonCycleTurbinesPromiseGiantLeap in Thermal-to-Electric ConversionEfficienc

<http://www.solarthermalmagazine.com/2011/03/06/supercritical-co2-brayton-cycle-turbines-promise-giant-leap-in-thermal-to-electric-conversion-efficiency/> , 2012

[14] <http://www.gen-4.org/>

Generation IV International Forum, LeDeine Saint-Germain, France

[15] <http://daryanenergyblog.wordpress.com/ca/part-8-msr-lftr/8-9-the-brayton-cycle-and-msr-reactors/>

Wordpress.com

[16] ČERNÝ M., vscht Praha,

http://tresen.vscht.cz/kap/data/studentska_cinnost/obhajoba_semestralniho_projektu_2009/47_typicke_necistoty_obsazene_v_plynnem_chladivu_vysokoteplotnich_a_fuznich_reaktoru_a_moznosti_jejich_odstraneni_vliv_necistot_na_zivotnost_konstrukcnich_materialu_soubor.pdf

[17] GRAMOLL Kurt, HUANG M., 2013

https://ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc=&topic=th&chap_sec=06.5&page=theory

[19] LANE D., Adams J., TheBraytonCyclewithRegeneration, Intercolling, &Reheating, 2013

<http://web.me.unr.edu/me372/Spring2001/The%20Brayton%20Cycle%20with%20Regeneration.pdf>

8.3 PROGRAMOVÉ PODKLADY

[21] WAGNER, W., Descriptionofthe Software FLUIDCAL (Dynamic Link Library) fortheCalculationofThermodynamic and Transport Propertiesof a Great NumberofFluids: FakultätfürMaschinenbau, Bochum

[22] PŮTOVÁ A., POLANSKÝ J., Funkce fluidcal, ZČU, fakulta strojní Plzeň 2012

A Příloha

A.1 Obsah příloženého CD

BP.pdf soubor s bakalářskou prací

BP.m soubors vytvořeným programem

A.2 Popis funkcí Octave

Výpočet teploty [K]

TOPS – Výpočet teploty ze zadaného tlaku a entropie

TOPH – Výpočet teploty ze zadaného tlaku a entalpie

TODP – Výpočet teploty ze zadané hustoty a tlaku

Výpočet entalpie [$\frac{kJ}{kg}$]

HOTP – Výpočet entalpie ze zadané teploty a tlaku

HOPS – Výpočet entalpie ze zadaného tlaku a entropie

HOTD – Výpočet entalpie ze zadané teploty a hustoty

Výpočet entropie $[\frac{kJ}{kg K}]$

SOTP – Výpočet entropie ze zadané teploty a tlaku

SOPH – Výpočet entropie ze zadaného tlaku a entalpie

SOTD – Výpočet entropie ze zadané teploty a hustoty

Výpočet hustoty $[\frac{kg}{m^3}]$

DOPT - Výpočet hustoty ze zadaného tlaku a teploty

DOHS - Výpočet hustoty ze zadané entalpie a entropie

DOPS - Výpočet hustoty ze zadané tlaku a entropie

Výpočet tlaku $[Mpa]$

POTD - Výpočet tlaku ze zadané teploty a hustoty

Výpočet měrné tepelné kapacity $[\frac{kJ}{kg K}]$

CPOTP – Výpočet tepelné kapacity při konstantním tlaku ze zadané teploty a tlaku

A.2 Čísla pro volání knihoven

Argon	41
Nitrogen	42
Helium	49
Water	50
Carbon dioxide	51
Carbon monoxide	56