



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VÝPOČET VÝMĚNÍKU TEPLA V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ

CALCULATION OF A HEAT EXCHANGER IN A NUCLEAR POWER PLANT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matej Borovička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel

Milčák

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Matej Borovička**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Milčák**
Akademický rok: 2021/22

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:

Výpočet výměníku tepla v jaderné elektrárně

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jaderná energetika má v rámci trvalé udržitelnosti nezpochybnitelné místo. V současnosti je ve světě ve fázi výstavby přibližně padesát reaktorů. Výměníky tepla v jaderných elektrárnách slouží k přenosu energie z jednoho pracovního média na druhé.

Cíle bakalářské práce:

- stručný úvod do jaderné energetiky,
- popis a bilanční výpočet výměníků tepla v tepelných schématech jaderné elektrárny,
- tepelný výpočet výměníku tepla,
- vliv změny provozních podmínek na výkon výměníku.

Seznam doporučené literatury:

BEČVÁŘ, Josef. Jaderné elektrárny. 2. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1981, 634 s.

KLIK, František a Jaroslav DALIBA. Jaderná energetika. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 189 s. : il. ; 30 cm. ISBN 80-01-02550-0.

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vydání třetí. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno, 2019, 131 stran : černobílé ilustrace. ISBN 978-80-214-5769-0.

ÇENGEL, Yunus, Afshin Jahanshahi GHAJAR a Mehmet KANOGLU. Heat and mass transfer: fundamentals and applications. 4th ed. in SI units. New York: McGraw-Hill, 2011, xxi, 902 s. : il. + 1 DVD. ISBN 978-0-07-131112-0.

KUPPAN, Thulukkanam. Heat exchanger design handbook. New York: Marcel Dekker, 2000, x, 1119 s. : il. ISBN 0-8247-9787-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá teoretickým aj výpočtovým popisom parogenerátora. Prvá kapitola sa venuje stručnému popisu jadrových elektrární. Pozornosť je venovaná najmä elektrárňam typu VVER, ktoré sa používajú v Českej a Slovenskej republike. V teoretickej časti sú charakterizované jednotlivé komponenty dôležité pre fungovanie jadrovej elektrárne. V hlavnej časti práce sú popísané horizontálne a vertikálne parogenerátory. Detailnejšie je charakterizovaný parogenerátor typu PGV-213 používaný v jadrovej elektrárni Dukovany. Výpočtová časť je venovaná bilančnému a tepelnému výpočtu parogenerátora. V záveru práce je popísané správanie parogenerátora pri zmenách prevádzkových podmienok.

Kľúčové slova

parogenerátor, tepelný výpočet, jadrová elektrárňa, teplovýmenné rúrky

ABSTRACT

The main theme of this bachelor thesis is a theoretical and computational description of the steam generator. The first chapter deals with a brief description of nuclear power plants. Particular attention is paid to the power plants of the VVER type, which are used in the Czech and Slovak Republic. The theoretical part of this thesis describes the individual components which are important for the operation of a nuclear power plant. The main part of this thesis depicts horizontal and vertical steam generators. Moreover, the PGV-213 type of steam generator that is used in the Dukovany nuclear power plant is more precisely explained. The computation part of this thesis is devoted to the balance and heat calculations of the steam generator. At the conclusion of this thesis, the performance of the steam generator during changes in operating conditions is also described.

Key words

steam generator, thermal calculation, nuclear power plant, heat exchange tubes

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

BOROVÍČKA, Matej. *Výpočet výměníku tepla v jaderné elektrárně*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139379>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Milčák.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému **Výpočet výmenníka tepla v jadrovej elektrárni** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

Dátum

Meno a priezvisko

POĎAKOVANIE

Týmto by som chcel poďakovať vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Pavlovi Milčákovi za jeho odborné vedenie, cenné rady a pripomienky pri tvorbe tejto práce.

OBSAH

ÚVOD.....	10
1 Jadrové elektrárne.....	11
1.1 Princíp fungovania jadrových elektrární.....	11
1.2 Typy jadrových elektrární.....	12
1.3 Okruhy jadrovej elektrárne s reaktorom typu VVER.....	14
1.3.1 Primárny okruh.....	14
1.3.2 Sekundárny okruh.....	15
1.3.3 Terciárny okruh.....	17
1.4 Clausiov – Rankinov parný cyklus pre jadrovú elektráreň.....	17
2 Popis a výpočet parogenerátora.....	20
2.1 Parogenerátory.....	20
2.1.1 Vertikálne parogenerátory.....	20
2.2 Horizontálny parogenerátor PGV 213.....	21
2.2.1 Tlaková nádoba.....	22
2.2.2 Kolektory.....	22
2.2.3 Teplovýmenné rúrky.....	22
2.2.4 Distančná mreža.....	23
2.2.5 Napájacie potrubie.....	23
2.2.6 Separátory.....	23
2.2.7 Parné kolektory.....	23
2.2.8 Odľuh a odkal.....	23
2.3 Porovnanie vertikálneho a horizontálneho parogenerátora.....	23
2.4 Výpočtový program EES.....	23
2.5 Bilančný výpočet parogenerátora.....	24
3 Tepelný výpočet parogenerátora.....	26
4 Vplyv zmeny prevádzkových podmienok na parogenerátor.....	30
ZÁVER.....	35
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV.....	36
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A ZKRATIEK.....	38
ZOZNAM OBRÁZKOV.....	40
ZOZNAM TABULIEK.....	41

ÚVOD

V dnešnej dobe sa ľudstvo stretáva s jedným z najväčších problémov vo svojej histórii, a tým je globálne otepľovanie. To je z veľkej časti zapríčinené stále rastúcou spotrebou elektrickej energie. Tá sa zvyšuje kvôli digitalizácií a modernizácií technológií, ktoré nás všade obklopujú. Dodnes sa väčšina elektrickej energie vyrába z fosílnych palív. Ich spaľovaním sa preukázateľne vypúšťajú skleníkové plyny, ktoré priamo zvyšujú priemernú teplotu zemskej atmosféry.

Obnoviteľné zdroje energie ako sú solárne či veterné elektrárne sú, žiaľ, náročné na priestor, veľmi nákladné a nespoľahlivé, keďže sú závislé od počasia. Aktuálne najlepšou známou alternatívou výroby elektrickej energie, ktorá závažne nezasahuje do okolitej krajiny a nie je závislá od vonkajších vplyvov, je jadrová energetika. Jadrová elektrárňa takmer vôbec nezaťažuje okolité ovzdušie emisiami a pri bezpečnej prevádzke ani neovplyvňuje okolie rádioaktivitou.

Pre Českú aj Slovenskú republiku je jadrová energetika dôležitou témou, keďže sa zaviazali k uhlíkovej neutralite, ku ktorej im tento spôsob výroby energie môže veľmi dopomôcť. Dokazuje to aj rozširovanie jadrových elektrární v Dukovanoch či v Mochovciach.

Vzhľadom na nebezpečnosť prevádzky jadrovej elektrárne je kladený vysoký dôraz na správne fungovanie všetkých komponentov elektrárne. Jedným z nich je aj parogenerátor, ktorý zaisťuje, aby nebezpečná rádioaktivita neopustila kontajment jadrového reaktoru, a zároveň vyrába vodnú paru potrebnú pre roztáčanie parnej turbíny.

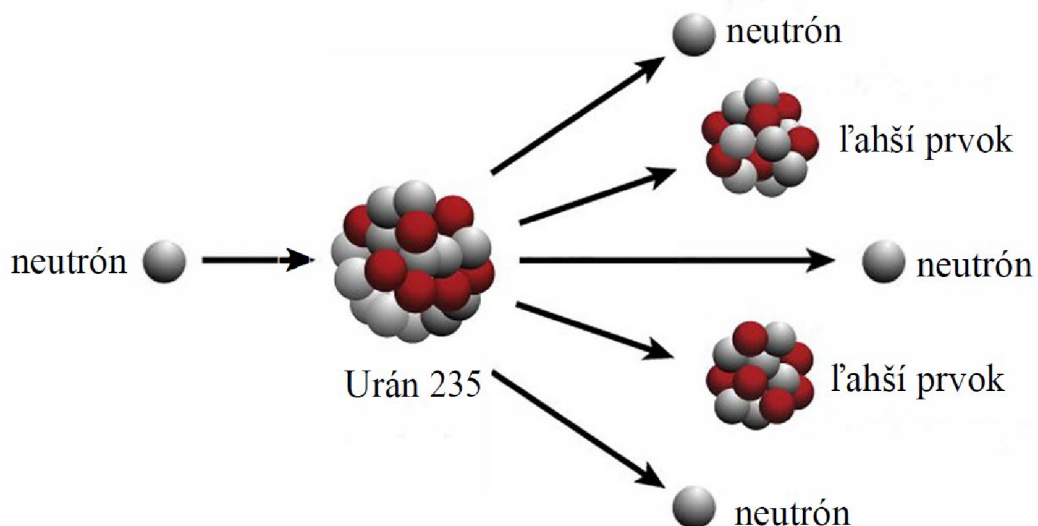
Cieľom tejto práce preto bude stručné popísanie fungovania jadrových elektrární a následný popis parogenerátora používaného v jadrovej elektrárni Dukovany. Výpočtová časť obsahujúca bilančný výpočet bude popisovať výmenu energie medzi primárnym a sekundárnym okruhom v parogenerátore. Nasledujúci tepelný výpočet bude zameraný na zistenie základných parametrov parogenerátora. Práca bude končiť popisom správania parogenerátora pri zmene prevádzkových parametrov.

1 Jadrové elektrárne

Prvým krokom v rozvoji jadrovej energetiky bolo objavenie uránu v roku 1789 nemeckým fyzikom Martinom Klaprothom. O 150 rokov neskôr Enrico Fermi začal vo svojich experimentoch vyrábať ťažšie, ale aj oveľa ľahšie prvky z uránu. Experimentálne potvrdené získanie energie z rozpadu uránu nastalo v roku 1939. Od tohto momentu sa rozbehol výskum štiepenia uránu, žiaľ, zo začiatku najmä z dôvodu vyvíjania jadrovej bomby. Až v roku 1954 uviedli do prevádzky prvú nekomerčne fungujúcu jadrovú elektráreň na svete. Bol to už existujúci reaktor na produkciu plutónia v Obninsku modifikovaný na výrobu tepla a elektriny. Elektráreň bola v prevádzke do roku 1959, ďalej slúžila ako prototyp pre návrhy iných reaktorov, napríklad aj pre reaktor v Černobyle. Do konca 70. rokov sa vývoj jadrovej energetiky rapídne zrýchlil, potom začal stagnovať, a to najmä kvôli jadrovým haváriám – jedným z najznámejších a najzásadnejších príkladov je výbuch v Černobyľskej elektrárni. Obnova rozvoja jadrovej energetiky nastala začiatkom nového tisícročia, keď sa rapídne začal zvyšovať dopyt po elektrickej energii a taktiež uvedomenie si potreby znížiť emisie z dôvodu začínajúcej sa zmeny klimatických podmienok. [1]

1.1 Princíp fungovania jadrových elektrární

Jadrové elektrárne vyrábajú elektrickú energiu podobným spôsobom ako napríklad uhľové elektrárne a to Rankin–Clausiovým cyklom, kde horúca vodná para roztáča pomocou parnej turbíny generátor, ktorý produkuje elektrickú energiu. Hlavný rozdiel je v palive. Tepelnú energiu získavajú štiepením atómových jadier v reaktore. Najviac sa používa urán obohatený o izotop 235, ktorý je oveľa viac nestabilný ako urán 238. Pri náraze neutrónu do jadra uránu sa rozštiepi na dva ľahšie prvky spoločne s tromi voľnými neutrónmi. Ich spoločný súčet hmotností je nižší než hmotnosť pôvodného jadra uránu. Tento úbytok hmotnosti sa pri štiepení jadra mení na tepelnú energiu. Uvoľnené neutróny môžu narážať do ďalších jadier a tým spustiť neriadenú reťazovú reakciu. Preto je nutné štiepenie moderovať a to pomocou vody alebo grafitových tyčí. [2]



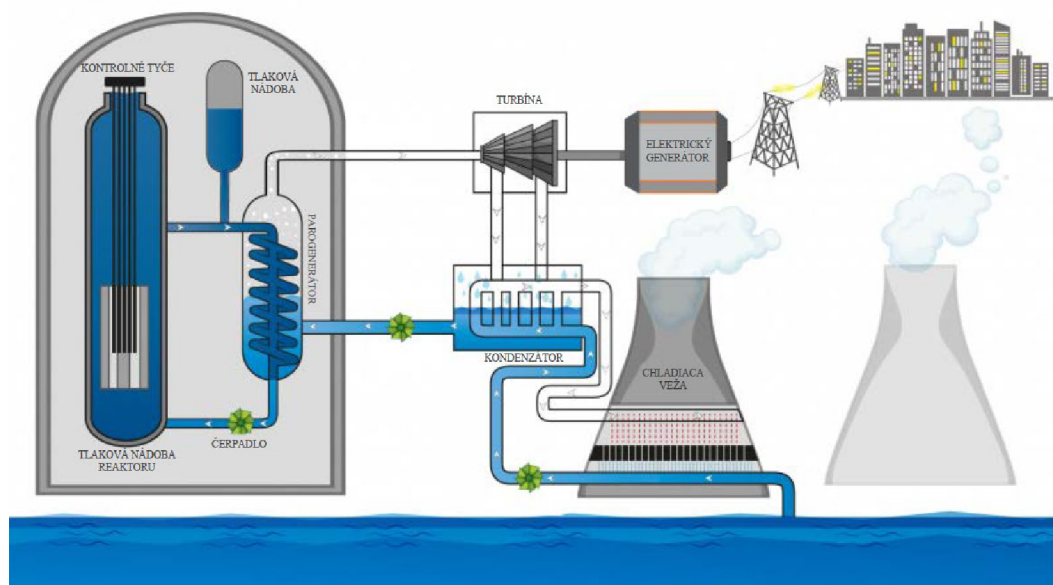
Obrázok 1.1: Štiepna reakcia [3]

1.2 Typy jadrových elektrární

Najviac používaným typom jadrového reaktoru je PWR (Pressurized Water Reactor), v preklade tlakovodný reaktor, ktorý ako moderátor aj chladivo používa ľahkú vodu a má celkovo 3 okruhy:

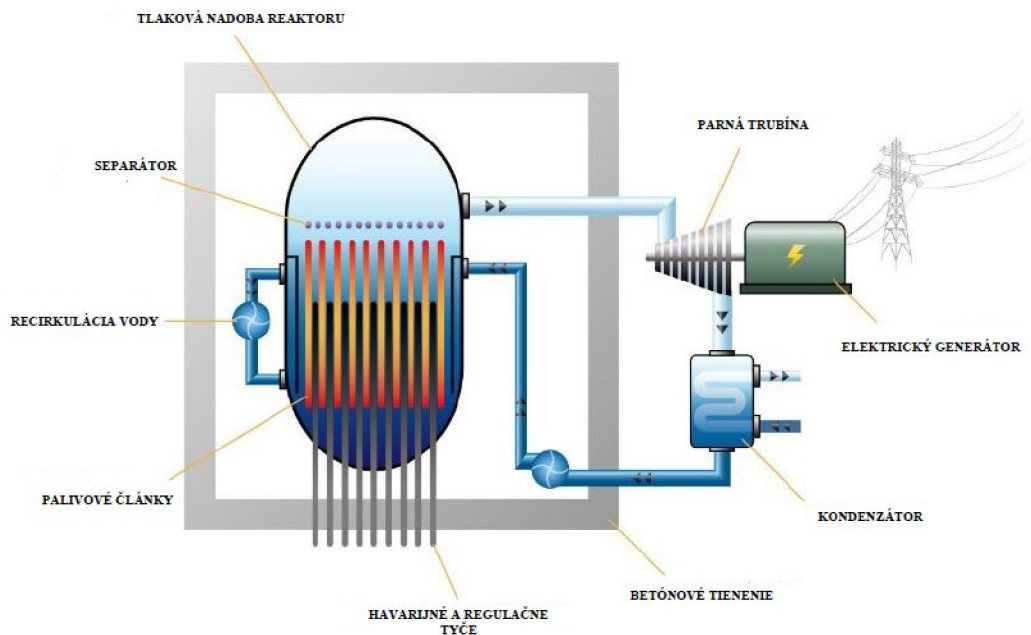
- Primárny okruh
- Sekundárny okruh
- Chladiaci okruh

V krajinách takzvaného východného bloku, ktoré boli pod vplyvom bývalého Sovietskeho zväzu, sa používajú elektrárne typu VVER (vodovodný energetický reaktor). Rozdiely medzi týmito reaktormi sú malé. Reaktory typu VVER sú spravidla objemnejšie. Tento fakt im umožňuje poňať väčšie množstvo chladiacej vody v primárnom okruhu a taktiež ich havarijne systémy majú väčšiu zálohu. Toto zabezpečuje vyššiu bezpečnosť reaktorov VVER. Naopak, reaktory PWR sú kompaktnejšie a ich výstavba lacnejšia a náklady na ich údržbu sú značne nižšie. Ďalším rozdielom v konštrukcii reaktorov je poloha parogenerátoru. Pri type PWR sa používajú vertikálne parogenerátory, čo umožňuje ich kompaktnejšie usporiadanie, zatiaľ čo východný typ reaktoru v zásade používa horizontálne parogenerátory. [5] [7]



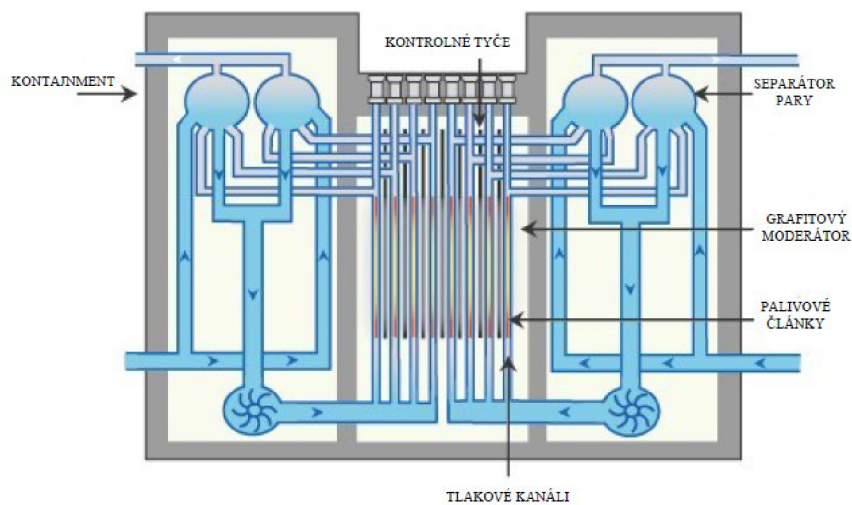
Obrázok 1.2: Reaktor typu PWR/VVER [4]

Druhým najpoužívanejším typom reaktoru je BWR (Boiling Water Reactor). Tento typ reaktora nepoužíva na vytváranie pary parogenerátor, ale tvorí ju priamo v tlakovej nádobe. Para priamo prúdi do turbíny, ktorá roztáča generátor. Vďaka tomu, elektrárni postačujú iba dva okruhy a je na výstavbu jednoduchšia oproti PWR reaktorom. Nevýhodou je vyššia miera rizika úniku rádioaktivity, keďže rádioaktívna para opúšťa betónový kontajment a priamo sa stretáva s turbínou. Jeden z najväčších únikov reaktoru tohto typu sa napríklad odohral vo Fukušime v roku 2011. [7] [9]



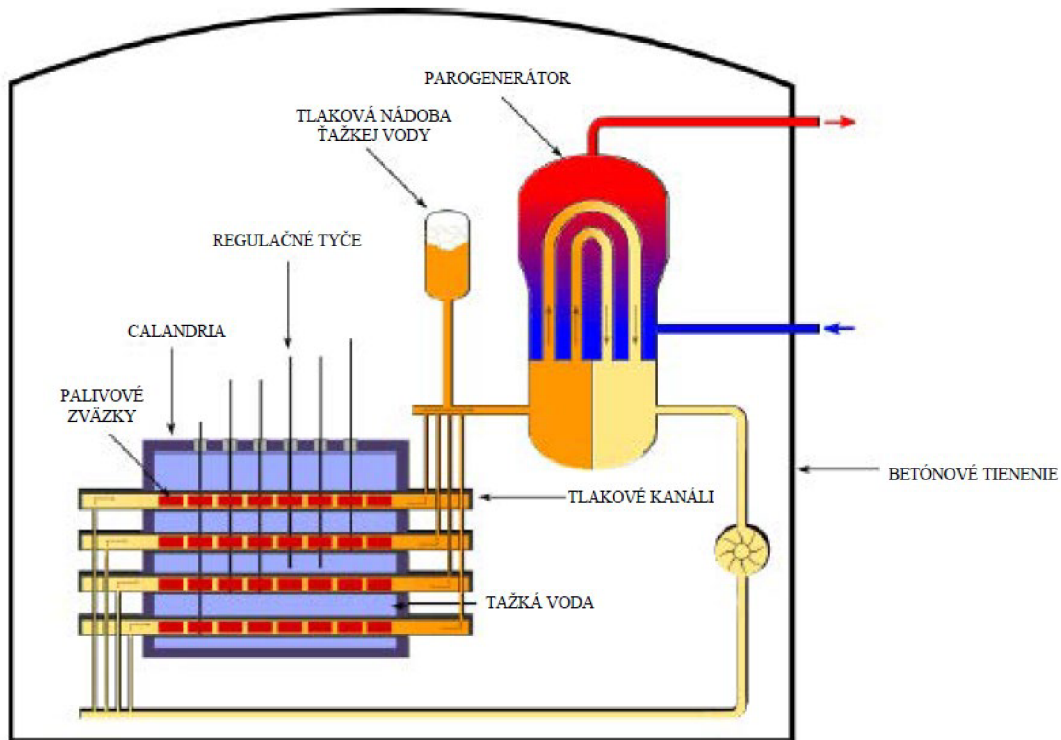
Obrázok 1.3: Reaktor typu BWR [7]

Jeden zo špecifickejších reaktorov je typ RBMK, vysokorýchlostný kanálový reaktor, ktorý bol vyvinutý v Sovietskom zväze. Taktiež sa jedná o reaktor s jedným okruhom a chladiacim okruhom. Na chladenie je využívaná ľahká voda, ale ako moderátor sa využívajú grafitové tyče. Najznámejší reaktor tohto typu bol v Černobyle, kde sa udiala doposiaľ najväčšia jadrová havária na svete. Zvyšné reaktory tohto typu boli po nehode značne konštrukčne upravené a tri z nich sú v Rusku v prevádzke dodnes. [6] [7] [9]



Obrázok 1.4 : Reaktor typu RBMK [6]

Reaktor, ktorý nepotrebuje k svojmu fungovaniu obohatený urán, bol vyvinutý v Kanade s názvom CANDU. Táto schopnosť je dosiahnutá tým, že ako moderátor a chladivo používa ťažkú vodu. Ťažká voda oproti ľahkej pohlcuje omnoho menej voľných elektrónov, vďaka čomu nie je nutné obohacovať prírodný urán. Konštrukčný rozdiel oproti väčšine reaktorov je, že uránové palivo vo forme zväzkov je umiestnené horizontálne vo vnútri tlakových kanálov. Táto skutočnosť umožňuje výmenu paliva počas plného výkonu reaktora. Najväčšou výhodou je používanie prírodného uránu, čo znižuje náklady na výrobu paliva, ktorým môže byť aj vyhorené palivo z elektrárni, ktoré používajú obohatený urán. Nevýhodou je používanie ťažkej vody, ktorej výroba je finančne náročnejšia než používanie ľahkej vody. [7] [10]



Obrázok 1.5: Reaktor typu CANDU

1.3 Okruhy jadrovej elektrárne s reaktorom typu VVER

Ako bolo vyššie uvedené, elektrárne tohto typu sa skladajú z troch okruhov. V nasledujúcich častiach budú jednotlivo rozobrané okruhy jadrovej elektrárne v Dukovanoch.

1.3.1 Primárny okruh

Primárny okruh je “srdcom“ jadrovej elektrárne, pretože obsahuje jadrový reaktor, v ktorom sa tvorí celková energia. Reaktor je obkolesený šiestimi cirkulačnými slučkami. V každej slučke sa nachádza parogenerátor, cirkulačné čerpadlo a na jednej zo slučiek je umiestnený kompenzátor objemu. Celý primárny okruh je umiestnený v kontajnmente, ktorý zamedzuje akémukoľvek úniku rádioaktivity. [11]

1.3.1.1 Jadrový reaktor

Palivom reaktora je obohatený urán, ktorý obsahuje 4,5% izotopu U 235. Aktívna zóna reaktora obsahuje až 312 palivových kaziet, ktoré dohromady vážia 42 ton. Rozpadom uránu sa v reaktore ohrieva voda, ktorá ďalej pokračuje do parogenerátora. Pri rozpadne sa z jadier uránu uvoľňujú iba rýchle neutróny. Tie treba spomaliť, aby dokázali vyvolať ďalšiu reakciu. Znižovanie energie neutrónov sa dosahuje pomocou moderátora, ktorým je v tomto prípade voda obklopujúca palivo. Výkon reaktora sa reguluje pomocou regulačných kaziet, ktoré

obsahujú bór. Ten sa nachádza v zliatine bórovej oceli. Bór dokáže pohlcovať voľné neutróny, takže pri zasunutí kaziet do reaktora sa začne štiepenie spomaľovať. V prípade havárie sa tyče zasunú úplne a tým sa štiepenie zastaví. [11] [21]

1.3.1.2 Parogenerátor

V parogenerátore dochádza k stretu vody z primárneho a sekundárneho okruhu. Je to hermeticky uzatvorená tlaková nádoba, ktorá zabraňuje úniku rádioaktívnej vody mimo kontajntment. Do parogenerátora vstupuje horúca voda z reaktora, ktorá má vďaka vysokému tlaku vyššiu teplotu ako je bod varu v sekundárnom okruhu. Vďaka tomu sa voda v sekundárnom okruhu rýchlo odparuje a vzniká para. [11] [21]

1.3.1.3 Cirkulačné čerpadlo

Čerpadlo sa nachádza na potrubí, ktoré odvádza ochladenú vodu z parogenerátora do reaktora. Používa sa vertikálne odstredivé upchávkové čerpadlo poháňané pomocou asynchrónneho motora. Sú naň kladené vysoké nároky, keďže musí pracovať pod vysokou teplotou a tlakom. [11] [21]

1.3.1.4 Kompenzátor objemu chladiva

Primárny okruh obsahuje veľké množstvo vody a jej teplota kolíše, preto je potrebné počítať s jej teplotnou rozťažnosťou. Na to slúži kompenzátor objemu, ktorým je obrovská nádoba naplnená do dvoch tretín primárnou vodou a zvyšok tvorí inertný plyn. Tlak sa reguluje pomocou vstavaných sprích v hornej časti kompenzátoru, tie spustením znižujú teplotu vody, zmenšujú jej objem a tým aj tlak. Na spodnej časti sa nachádzajú elektro ohrievače. Tie pomocou ohrievania vody zvyšujú jej teplotu a následne aj tlak. [11] [21]

1.3.1.5 Kontajntment

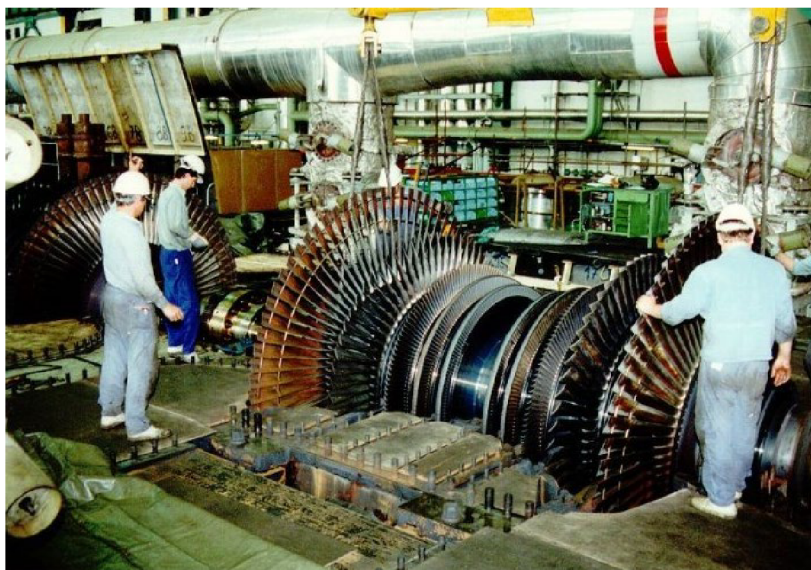
Kontajntment je železobetónový obal slúžiaci na ochranu primárneho okruhu. Zabraňuje voľnému šíreniu rádioaktívnych látok do okolia. Taktiež by mal odolať aj prírodným katastrofám ako je zemetrasenie či dokonca pádu lietadla. [11]

1.3.2 Sekundárny okruh

V sekundárnom okruhu sa vytvorená para v parogenerátore dostáva do turbíny, kde expanduje a tým ju roztáča. Turbína je uložená na jednom hriadeli s elektrickým generátorom, aby bol zabezpečený optimálny prenos krútiaceho momentu. Generátor pomocou elektromagnetickej indukcie premieňa krútiaci moment na elektrickú energiu. Následne sa para dostáva do kondenzátora a prúdi cez ohrievače a čerpadlá, ktoré udržiavajú vodu v obehu. [11]

1.3.2.1 Parná turbína

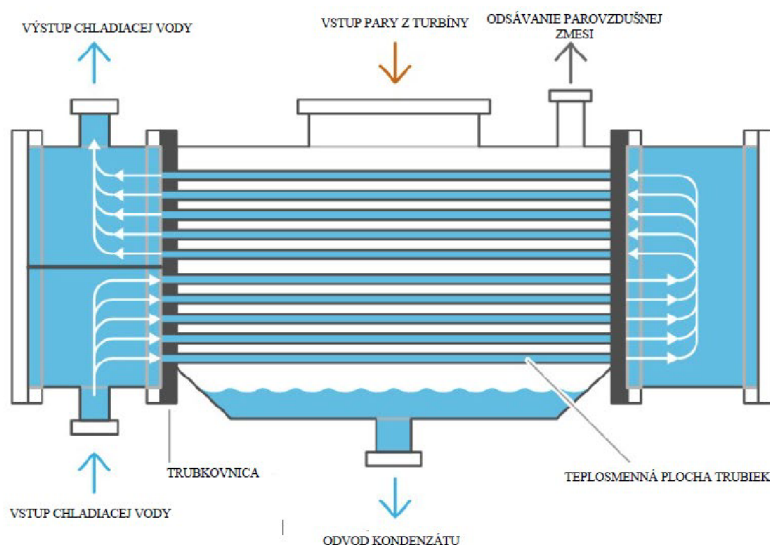
Parná turbína slúži k premene vnútornej energie horúcej pary na mechanickú, čiže otáčanie rotora turbíny. Pre vyššiu efektivitu sa turbíny skladajú z viacerých stupňov a spravidla sa postupne rozširujú, keďže para postupom v turbíne expanduje. V Dukovanskej elektrárni sú na každý blok použité dve turbíny s nominálnym elektrickým výkonom 255 MW. Jednotlivé turbíny sa skladajú z vysokotlakovej časti, kde sa vháňa para priamo z parogenerátora. V prvej časti turbíny para čiastočne kondenzuje. Preto je potrebné, aby pred pokračovaním do nízkotlakovej časti turbíny prúdila cez separátory vlhkosti, kde sa para zbaví vlhkosti. Po zbavení vlhkosti sa para rozdeľuje do dvoch nízkotlakových častí turbíny. [11] [21]



Obrázok 1.6: Parná turbína v Dukovanoch [12]

1.3.2.2 Kondenzátor

Para sa z turbíny dostáva do kondenzátora, výmenníka tepla, kde sa kondenzuje späť na kvapalinu. Para je ochladzovaná chladivom z terciárneho okruhu, ktorá prúdi rúrkami kondenzátora. Na jeho dne sa zbiera kondenzát. [11]



Obrázok 1.7: Kondenzátor [8]

1.3.2.3 Regeneračné ohrievače

Ohrievače sa v sekundárnom cykle využívajú kvôli zefektívneniu účinnosti Rankin-Clausiovho cyklu. Sú to tepelné výmenníky dvoch druhov: nízkotlakové a vysokotlakové. Ohrievače v určitej časti turbíny odoberajú čiastočne expandovanú paru, pomocou ktorej ohrievajú vodu privedenú z kondenzátora. [11]

1.3.3 Terciárny okruh

Primárnou úlohou terciárneho (chladiaceho) okruhu je ochladzovať chladiacu vodu prúdiacu v kondenzátore. Pomocou studenej vody v kondenzátore sa zaisťuje podtlak v sekundárnom okruhu. S klesajúcou teplotou chladiacej vody sa podtlak zvyšuje, a tým rastie aj účinnosť cyklu. Z tohto dôvodu elektrárne fungujú efektívnejšie v zime, keď je chladnejší vzduch než v lete. Voda sa ochladzuje v chladiacich vežiach. Obeh vody medzi kondenzátormi a vežami zabezpečujú obehové čerpadlá. [11]

1.3.3.1 Chladiace veže

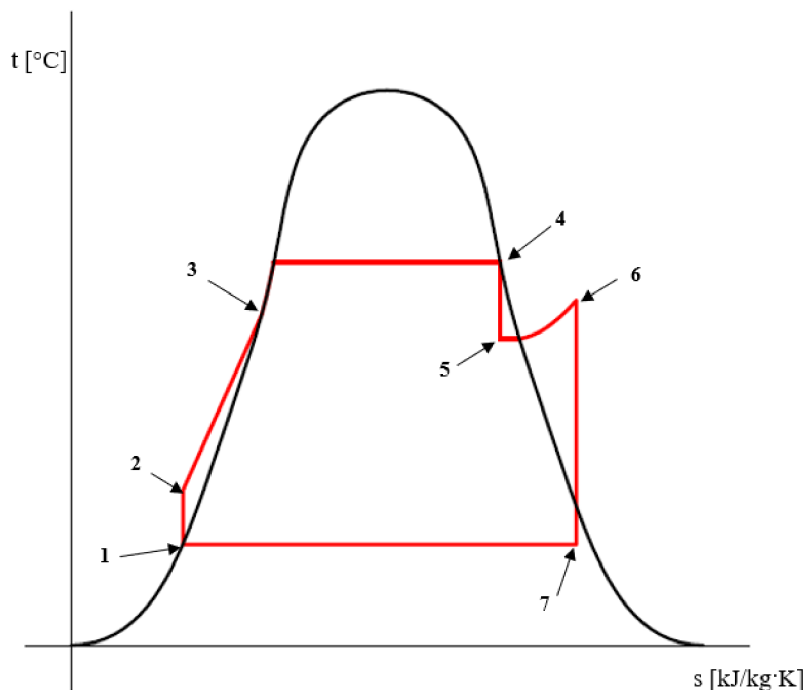
Vysoké chladiace veže zabezpečujú dostatočný ťah vzduchu na ochladzovanie vody terciárneho okruhu. Tá je rozstrekovaná systémom trysiek na spodnej časti veže. Na dne je bazén, do ktorého steká ochladená voda vzduchom. Voda sa ochladzuje pri kontakte s prúdiacim vzduchom vo veži, a zároveň sa časť z nej odparuje, čím vznikajú známe oblaky nad vežami jadrových elektrární. Každá z ôsmich veží takto odparí 150 litrov vody za sekundu. Odparenú vodu je nutné dopĺňať z externého zdroja. V prípade elektrárne Dukovany je to rieka Jihlava. [11]



Obrázok 1.8: Chladiace veže Dukovany

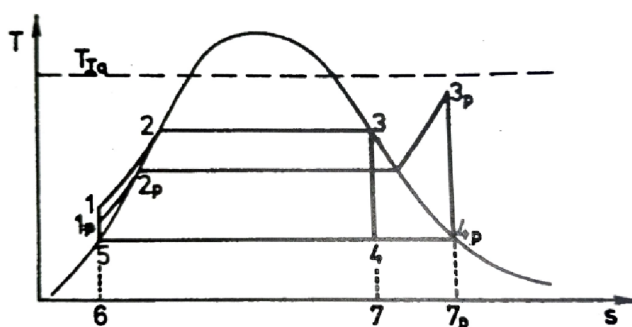
1.4 Clausiov – Rankinov parný cyklus pre jadrovú elektráreň

Cyklus opisuje obeh média v sekundárnom okruhu, kde sa naakumulovaná energia pary premieňa na energiu mechanickú. Znázornený je v T-s diagrame, ktorý popisuje závislosť teploty na entropii vodnej pary. Na obrázku 1.9 sa nachádza zjednodušené zobrazenie ideálneho cyklu bez energetických strát. Obeh začína v bode 1 kde sa voda skondenovaná v kondenzátore dostáva do čerpadla. To zvyšuje tlak vody pred vstupom do parogenerátora a zaručuje obeh v sekundárnom okruhu. Medzi bodom 2 a 3 voda prechádza cez sériu ohrievačov, kde sa predhrieva pomocou odobratej pary z turbín, čo pomáha zvyšovať efektívnosť cyklu. V bode 3 sa dostáva do parogenerátora. Tu je voda uvedená do varu a za stáleho tlaku sa odparuje. Do vysokotlakovej turbíny sa dostáva v bode 4, kde znižuje svoju teplotu a tlak a zároveň mierne kondenzuje. Preto je nutné, aby pred vstupom do nízkotlakovej turbíny prešla separátormi pary. Medzi bodmi 5 a 6 sa ohrieva v ohrievačoch, ktoré sú napájané parou z vysokotlakovej turbíny. Následne sa para v bode 6 dostáva do nízkotlakovej turbíny. Tam už plne expanduje a presúva sa opäť do kondenzátora v bode 7. [20] [23]



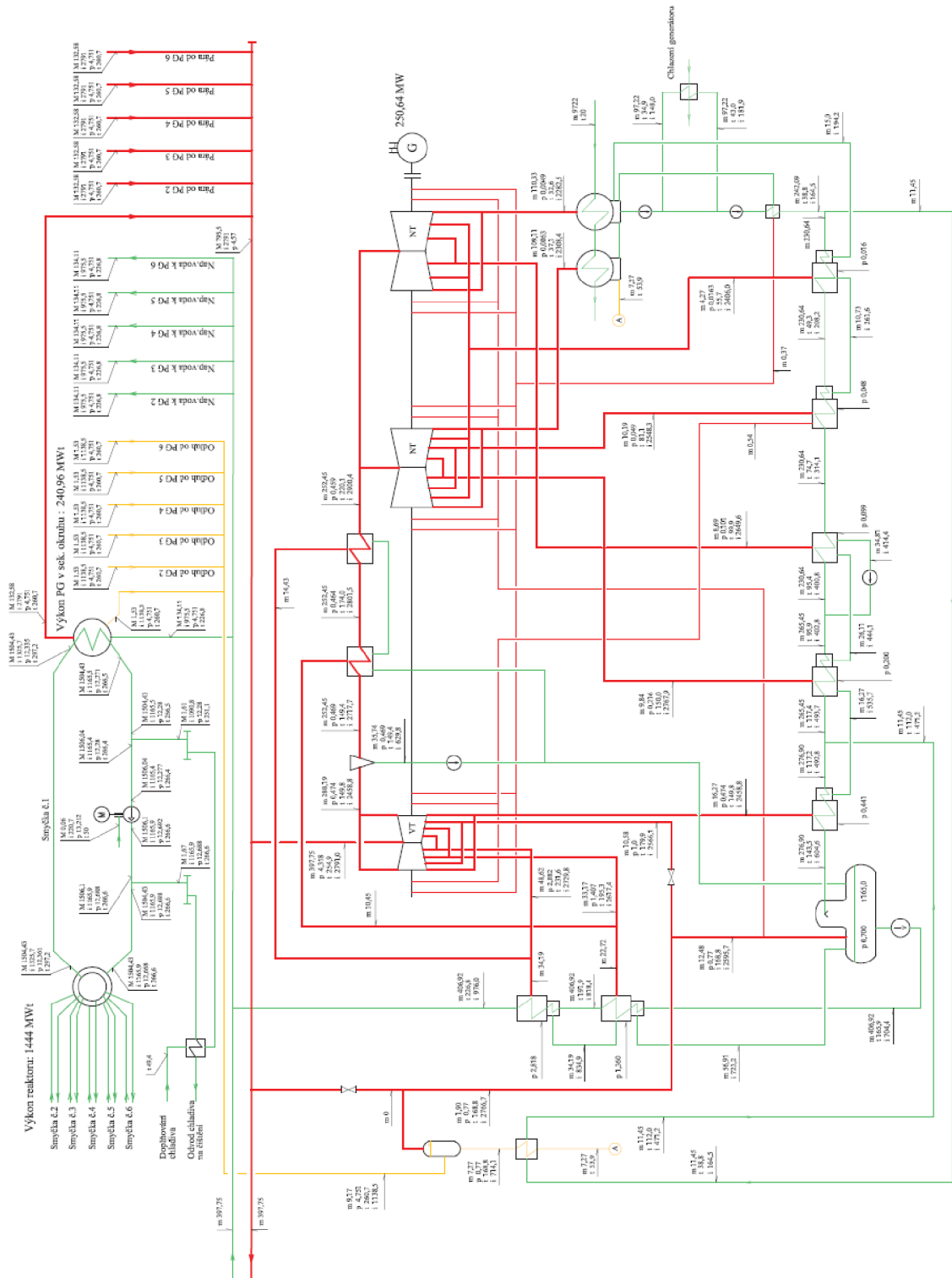
Obrázok 1.9: Clausiov-Rankinov cyklus v T-s diagrame

Z grafu možno vyčítať, že z parogenerátora vychádza sýta para a nie prehriata ako tomu býva v bežných tepelných elektrárnach. Dôvodom je nižšia teplota vody v primárnom okruhu, kde sa voda v reaktore ohrieva len o 30 °C na teplotu 297 °C. Taktiež sa aj napájacia voda v parogenerátore ohrieva len o 34 °C na teplotu 260,7. Pre porovnanie v tepelnej elektrárni v Ledviciach sa para v kotly ohrieva na 600 °C. Keby sa voda v parogenerátore ohrievala až na sýtu paru, musel by sa znížiť tlak v sekundárnom okruhu a zvýšila by sa teplota výstupnej pary. To by zapríčinilo zníženie rozdielu teplôt medzi primárnym a sekundárnym okruhom. Znížený teplotný logaritmický spád by musel byť kompenzovaný väčšou teplovýmennou plochou. Keďže požiadavky na materiál, z ktorého sú vyrobené rúrky v parogenerátore sú veľmi vysoké, vzrástli by investičné náklady. Výroba prehriatej pary na úkor zníženého tlaku by taktiež znižovala efektivitu cyklu. Na obrázku 1.10 je vidieť že pomer plôch 1-2-3-4-5 a 1-2-3-7-6 je zreteľne väčší než pomer plôch $1_p-2_p-3_p-4_p-5$ a $1_p-2_p-3_p-7_p-6$. [13] [15]



Obrázok 1.10: Porovnanie cyklov so sýtou parou a prehriatou [15]

Na obrázku 1.11 je znázornená tepelná schéma jadrovej elektrárne Dukovany, kde je v pravej hornej časti zelenou farbou znázornený obeh primárnej vody medzi reaktorom a parogenerátorom. Červené čiary popisujú tok horúcej pary z parogenerátora do turbín a z nich do kondenzátora a ohrievačov. Z kondenzátorov cez ohrievače a čerpadlá tečie napájacia voda označená tenšími zelenými čiarami.



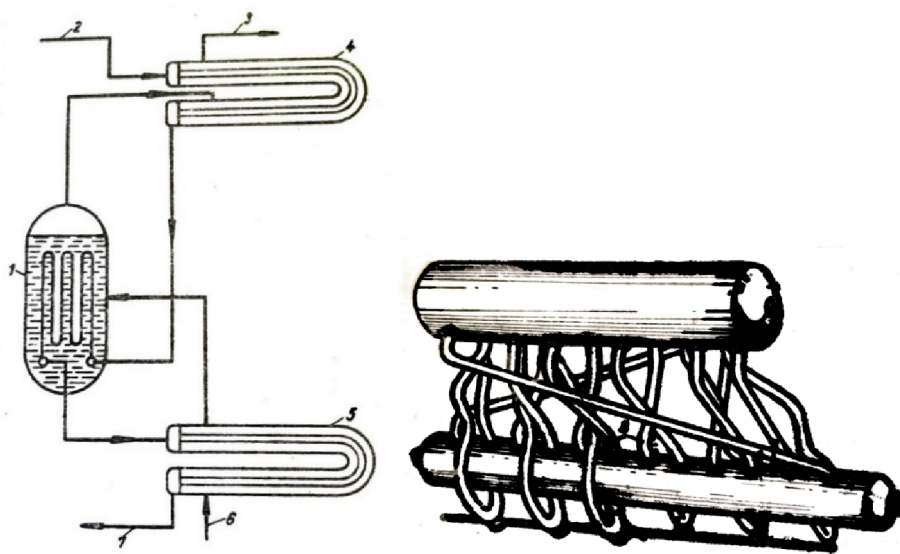
Obrázok 1.11: Tepelná schéma jadrovej elektrárne Dukovany [19]

2 Popis a výpočet parogenerátoru

Táto kapitola sa bude venovať popisu a bilančnému výpočtu parogenerátora.

2.1 Parogenerátory

Výmenníky tepla určené na tvorbu pary pre turbínu sa začali používať hneď v prvých jadrových elektrárnach chladených tlakovou vodou. Prvý priemyslovo používaný parogenerátor bol v prevádzke v spomínanej jadrovej elektrárni v Obninsku. Skladal sa z troch častí a to z ekonomizéru, výparníku a prehrievača. Jeho schému je možné vidieť na obrázku 2.1. Naopak v Spojených štátoch sa jeden z prvých parogenerátorov nachádzal v elektrárni Schippingport v meste Indian-point. [23]

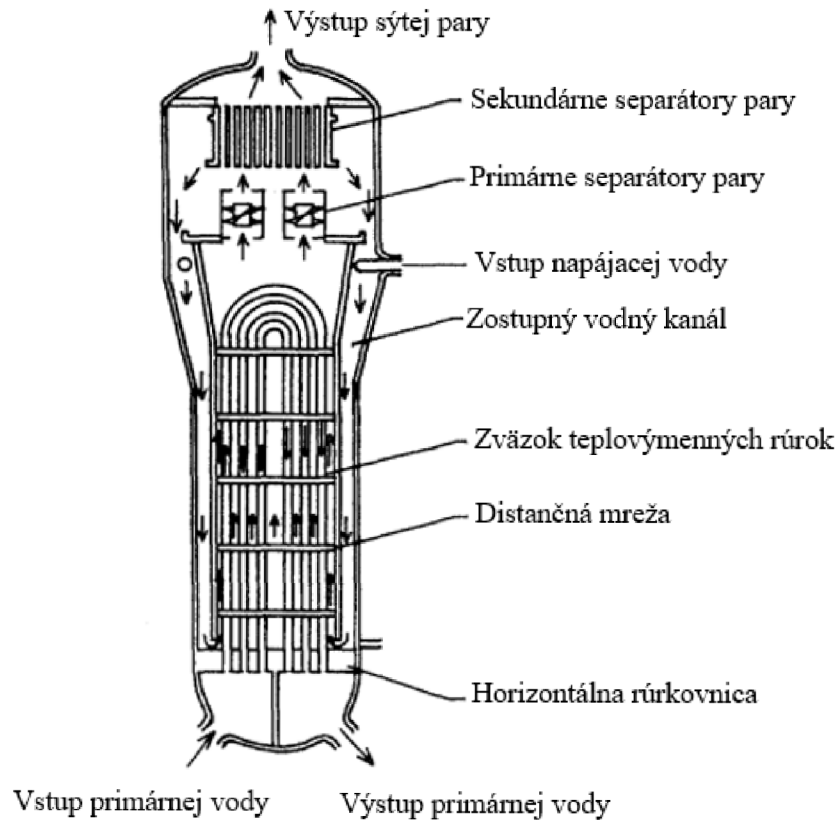


Obrázok 2.1: Napravo schéma prvého parogenerátora v Obninsku, Naľavo parogenerátor elektrárne Shppingport v USA. 1-výparník, 2-vstup primárnej vody, 3-výstup prehriatej pary, 4-prehrievač, 5-ekonomizér, 6 vstup napájacej vody, 7-výstup primárnej vody [23]

Ďalšie generácie parogenerátorov už boli zväčša tvorené jednou tlakovou nádobou. V západných krajinách to sú vertikálne parogenerátory pre reaktory PWR a vo východných horizontálne pre reaktory VVER [23]

2.1.1 Vertikálne parogenerátory

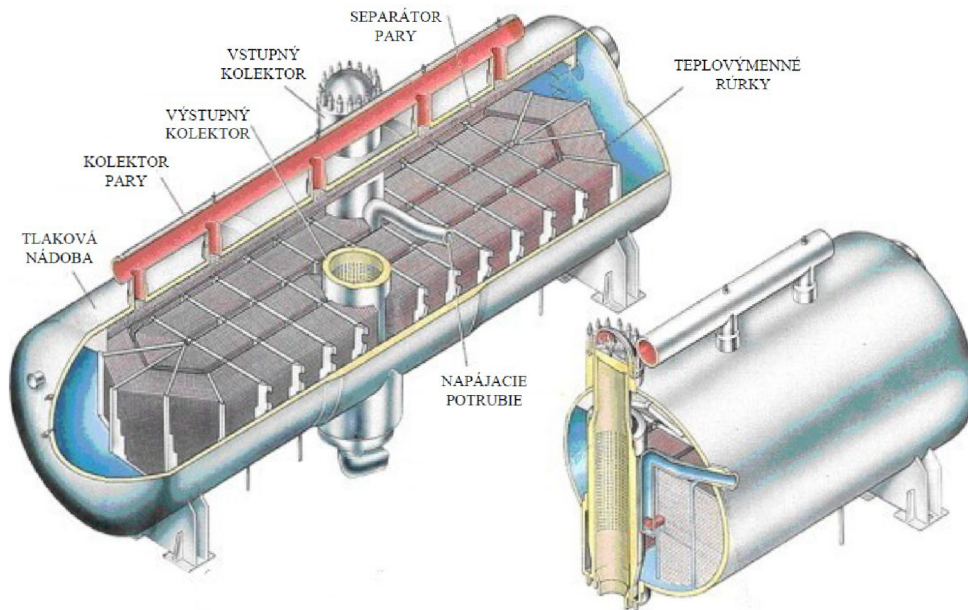
Vertikálny parogenerátor je valcová tlaková nádoba, ktorá sa skladá z dvoch dielov. V spodnom je zväzok teplovýmenných rúrok tvaru prevráteného U, tie sú zapustené do horizontálnej rúrkovnice. Na vrchu sa nachádzajú primárne a sekundárne separátory pary. V hornej časti parogenerátora vstupuje z boku napájacia voda, ktorá steká zostupným vodným kanálom do priestoru medzi teplovýmennými rúrkami. Tam sa dostáva do varu a odparuje sa. Prechádza cez separátory pary, kde sa vysušuje na relatívnu suchosť 0,99 a odchádza z parogenerátora. Skondenzovaná voda v separátoroch steká naspäť do dolnej časti, kde sa cestou zmiešava s prichádzajúcou napájacou vodou. [15] [25]



Obrázok 2.2: Vertikálny parogenerátor [25]

2.2 Horizontálny parogenerátor PGV 213

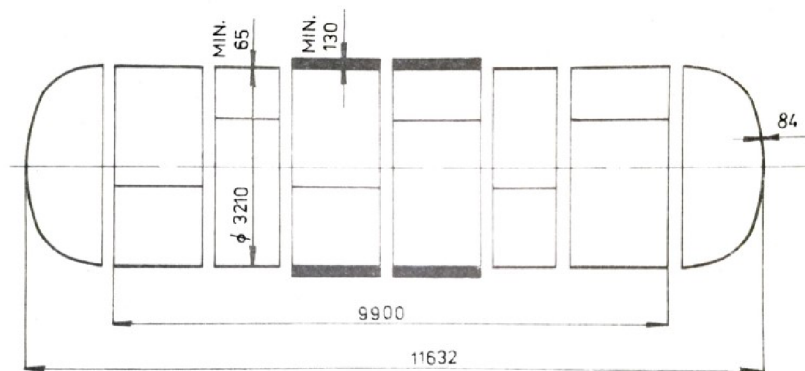
Parogenerátor PGV 213 má tvar valcovej nádoby dlhšej 11,8 m s priemerom 3,21 m.



Obrázok 2.3: Parogenerátor typu PGV 213 [24]

2.2.1 Tlaková nádoba

Všetky základné komponenty sú uložené v tlakovej nádobe. Má tvar horizontálnej valcovitej nádoby s otvormi pre dva kolektory slúžiace k vstupu a výstupu vody v primárnom okruhu. Vyrobena je z uhlíkovej oceli. Nádoba sa skladá z ôsmich zvarovaných častí ako je možné vidieť na obrázku 2.4. Do prostredných dvoch valcov s hrubšou stenou sú navítané otvory pre kolektory na prívod a odvod primárneho média a taktiež otvor pre vstup napájacej vody. Na otvory sa následne navarujú nátrubky, do ktorých sa zasúvajú kolektory. Do vrchnej časti je navítaných 5 dier pre odvod pary. Ďalej sú potrebné otvory pre odluh, odkal, a ďalšie rôzne menšie diery pre meranie hladiny a podobne. [16] [17] [19]



Obrázok 2.4: Tlaková nádoba parogenerátoru [17]

2.2.2 Kolektory

Kolektory sú zvislé valcové telesá zvarované z troch častí. Sú vyrobené z austenitickej oceli. Na kolektory sú napojené teplovýmenné rúrky pomocou vyvítaných dier. Kolektory presahujú až do vrchnej časti nádoby, kde sú ukončené vekami. Spoj s vekami je rozobratelný, čo umožňuje prístup potrebný pre údržbu či opravy kolektorov. Veká sú utesnené pomocou dvoch niklových tesniacich krúžkov. [16] [17] [19]

2.2.3 Teplovýmenné rúrky

Cez teplovýmenné rúrky preteká ohriata voda z reaktora odovzdávajúca teplo vode sekundárneho okruhu. Rúrky sú ponorené pod hladinou napájacej vody. Cirkulácia sekundárnej vody medzi rúrkami je prirodzená. Počet rúrok je 5536 s vonkajším priemerom 16 mm a hrúbkou steny 1,4 mm. Trubky sú uložené v radách nad sebou s vertikálnym rozostupom 24 mm a horizontálnym rozostupom 30 mm.

Malá hrúbka steny rúrky zaručuje nízky odpor voči vedeniu tepla stenou a znižuje spotrebu materiálu. Nevýhodou tenkých trubiek je náročné dosiahnutie tesnosti pri spojení s kolektorom, takže okrem zavalcovania do otvorov kolektorov je ich nutné aj privariť.

Jeden z hlavných dôvod prečo cez teplovýmenné rúrky preteká voda primárneho okruhu je, že má vyšší tlak než v sekundárnom okruhu. Z tohto dôvodu je teleso výmenníka namáhané menším tlakom. Ďalšou výhodou je, že súčiniteľ prestupu tepla sa zvyšuje s rastúcou rýchlosťou prúdenia tlakovej vody v rúrkach. Tento efekt je omnoho vyšší než by to bolo pri vriacej vode. Výhodou umiestnenia sekundárneho okruhu v nádobe je väčší priestor mimo rúry, ktorý umožňuje jednoduchšiu separáciu vody zo sytej pary. [16] [17] [19] [20]

2.2.4 Distančná mreža

Teplovýmenné rúrky sú podoprené pomocou distančných mreží, ktoré zabraňujú vibráciám a zaisťujú priestor medzi rúrkami dôležitý pre cirkuláciu sekundárnej vody. Hladina sekundárnej vody siaha približne niekoľko desiatok milimetrov nad najvyššie položenú rúrku. [16] [17] [19]

2.2.5 Napájacie potrubie.

Kvapalná voda zo sekundárneho okruhu sa do parogenerátora dostáva pomocou napájacieho potrubia. V nádobe sa rozdeľuje na dve vetvy, z ktorých vychádza 6 rád ohnutých rúr do tvaru písmena J a tie zaručujú neustále pokrytie napájacou vodou rozvodových rúrok. Napájacie potrubie je privedené do časti bližšej ku kolektoru s prívodom primárnej vody. Táto časť je teplejšia. Vďaka tomu sa lepšie vyrovnáva teplotný rozdiel v nádobe, keďže teplota napájacej vody je nižšia než jej bod varu a ešte sa musí pred odparením ohriať. [16] [17] [19]

2.2.6 Separátory

V hornej časti parogenerátora sa nad hladinou vody nachádzajú žalúziové separátory pary. Tie oddeľujú vodu od pary. Voda následne steká späť do spodnej časti parogenerátora. Na správnu prevádzku sa vyžaduje vysušenie pary na relatívnu suchosť 0,99. Vďaka vysušeniu pary sa znižuje opotrebenie turbíny, ktoré by mohlo byť spôsobené kvapôčkami vody v pare. [16] [17] [19]

2.2.7 Parné kolektory

Vysušená para sa zberá v parnom kolektore, ktorý sa nachádza nad bubnom parogenerátora. K bubnu je pripojený pomocou piatich nátrubkov. [16] [17] [19]

2.2.8 Odluh a odkal

Na spodnej časti tlakovej nádoby sa nachádzajú dva nátrubky slúžiace na nepretržitý odvod odluhu. Cieľom tohto odvodu je zabránenie hromadeniu nečistôt v primárnom okruhu. Týmto spôsobom sa odvádza približne 0,4% pretekajúcej vody. [16] [17] [19]

2.3 Porovnanie vertikálneho a horizontálneho parogenerátora

Najväčšou nevýhodou horizontálnych parogenerátorov používaných v našich jadrových elektrárnach je ich veľký pôdorys, ktorý sťažuje možnosť umiestnenia primárneho okruhu do jedného kontajneru. Na druhej strane ich konštrukcia má aj niekoľko výhod. Výroba je jednoduchšia vďaka tenším stenám vertikálnym rúrkovnic, do ktorých sa ľahšie vrtajú diery pre teplovýmenné rúrky než do robustných horizontálnych rúrkovnic vertikálnych parogenerátorov. Výroba horizontálnych parogenerátorov je lacnejšia vďaka možnosti použitia vysoko legovanej oceli na teplovýmenné rúrky. Pre rúrky vo vertikálnych parogenerátoroch je nutné používať zliatiny niklu, ktoré sú omnoho drahšie, z dôvodu výskytu korózie nad vodorovnou rúrkovnicou. Ďalšou konštrukčnou výhodou je väčšia plocha hladiny vody vďaka, čomu sa menej strháva kvapalná fáza do pary. To odľahčuje separáciu vody z pary a tým znižuje nároky na separátory. Vďaka tomu sú v horizontálnych parogenerátoroch prítomné iba žalúziové separátory. Spoľahlivosť prevádzky je pri oboch druhoch parogenerátorov porovnateľná. [16]

2.4 Výpočtový program EES

Zvolený program pre výpočet parogenerátora je Engineering Equation Solver, v preklade Riešiteľ inžinierskych rovníc, skratka EES. Jedná sa o komerčný software určený na riešenie sústav nelineárnych algebraických, diferenciálnych či integrálnych rovníc. Ďalej obsahuje

funkcie ako optimalizácia, analýza neistoty, lineárna a nelineárna regresia, konverzia jednotiek a generovanie grafov. Najväčšou výhodou EES je rozsiahla databáza termodynamických vlastností látok, ktoré je možné použiť pri výpočtoch. Program rieši rovnice numericky a teda nie je potrebné dodržiavať postupnosť rovníc vo výpočte. Tieto funkcie boli hlavným dôvodom pre výber tohto výpočtového programu. [14]

2.5 Bilančný výpočet parogenerátora

V nasledujúcej tabuľke sa nachádzajú zadané termodynamické hodnoty potrebné k bilančnému a tepelnému výpočtu. Celý výpočet prebehol vo výpočtovom programe EES. V tabuľke 1 sú uvedené východzie hodnoty pre výpočet, ktoré pochádzajú z teplotnej schémy Jadrovej elektrárne Dukovany zobrazenej na obrázku číslo 1.11.

Tabuľka 1: Zadané hodnoty

Tlak vody v primárnom okruhu na vstupe do PG	p_1	12	MPa
Tlak napájajúcej vody na vstupe do PG	p_2	4,78	MPa
Teplota vody v primárnom okruhu na vstupe do PG	t_{1in}	296,18	°C
Teplota vody v primárnom okruhu na výstupe do PG	t_{1out}	267,18	°C
Teplota napájajúcej vody	t_{2in}	223,3	°C
Teplota pary na výstupe z PG	t_p	261,11	°C
Tepelný výkon reaktoru	Q	1375	MW

V bilančnom výpočte je potrebné pomocou zadaných hodnôt dopočítať hmotnostný tok v primárnom a sekundárnom okruhu. Tieto neznáme je možné vyjadriť pomocou rovníc tepelného výkonu v primárnom a sekundárnom okruhu.

Ako bolo v predchádzajúcej kapitole uvedené na jeden jadrový reaktor je pomocou slučiek napojených šesť parogenerátorov. Medzi každý jeden sa rovnomerne rozdeľuje tepelný výkon reaktoru.

$$Q_1 = \frac{Q}{6} = \frac{1375}{6} = 229 \text{ [MW]} \quad (2.1)$$

Účinnosť výmeny tepla medzi primárnym a sekundárnym médiom je uvažovaná $\eta=0,99$.

$$Q_2 = Q_1 * \eta_{PG} = 229 * 0,99 = 226,9 \text{ [MW]} \quad (2.2)$$

Entalpie potrebné pre výpočet je možné zistiť v databázach programu EES pomocou funkcií na základe zadanej teploty a tlaku.

$$h_{1in} = \text{enthalpy}(\text{Steam_IAPWS}; T = t_{1in}; P = p_1) = 1320 \text{ [kJ/kg]} \quad (2.3)$$

$$h_{1out} = \text{enthalpy}(\text{Steam_IAPWS}; T = t_{1out}; P = p_1) = 1169,4 \text{ [kJ/kg]} \quad (2.4)$$

$$h_{2in} = \text{enthalpy}(\text{Steam_IAPWS}; T = t_{2in}; P = p_2) = 959,5 \text{ [kJ/kg]} \quad (2.5)$$

Entalpia vodnej pary v parogenerátore je zistená na základe tlaku a suchosti pary, ktorú možno uvažovať ako $x=1$.

$$h_p = \text{enthalpy}(\text{Steam_IAPWS}; x = x; P = p_2) = 2796 \text{ [kJ/kg]} \quad (2.6)$$

$$Q_1 = m_1 * (h_{1in} - h_{1out}) \rightarrow m_1 = 1522 \text{ [kg/s]} \quad (2.7)$$

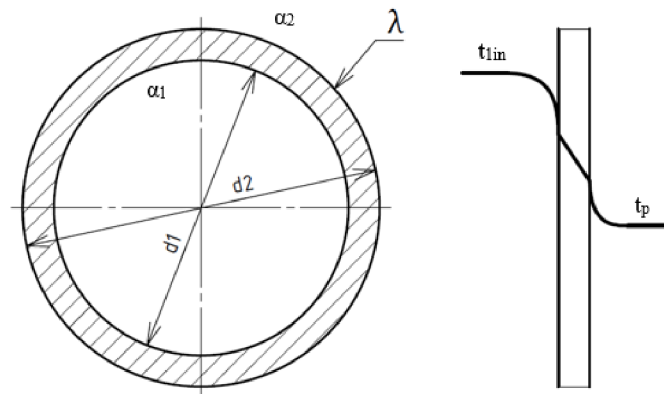
$$Q_p = m_p * (h_{2in} - h_p) \rightarrow m_p = 123,5 \text{ [kg/s]} \quad (2.8)$$

Z výsledných hodnôt v rovniciach (2.7) a (2.8) je vidieť, že hmotnostný tok v primárnom okruhu je násobne vyšší. To je zapríčinené spotrebou energie na skupenskú premenu v sekundárnom okruhu. Para má za rovnakých podmienok vyššiu entalpiu než voda takže dokáže preniesť viac energie menšou hmotnosťou.

3 Tepelný výpočet parogenerátora

Cieľom tepelného výpočtu bude vypočítať teplovýmennú plochu rúrok a ich počet v parogenerátore, ktorý je potrebný na výmenu tepelného výkonu medzi primárnym a sekundárnym okruhom. Výpočty prebiehali na základe vzťahov z [18].

Pre tento výpočet je na začiatok nutné vyjadriť súčiniteľ prestupu tepla. Ten je závislý na súčiniteloch prestupu tepla vo vnútri rúrok α_1 , mimo nich α_2 a súčiniteľa tepelnej vodivosti λ . Pre oceľ zn. 08Ch18N10T, z ktorého sú vyrobené rúrky, je $\lambda=15$ [W/m.K]. Dôležité sú aj rozmery rúrok a to konkrétne vnútorný priemer $d_1=13,2$ [mm] a vonkajší $d_2=16$ [mm].



Obrázok 3.1: Prestup tepla stenou rúrky

Vo vnútri rúrok teplo prešupuje pomocou nútenej konvekcie. Na výpočet prestupu tepla α_1 budú využité kritériálne čísla a to konkrétne Nusseltové, Reynoldsové a Prandltové číslo. Na začiatok je nutné zistiť základné fyzikálne veličiny pre médium v rúrkach a to konkrétne pre vodu primárneho okruhu. Tieto veličiny budú závislé na strednej hodnote teploty v primárnom okruhu, ktorá je vyjadrená v rovnici (3.11) a jej tlaku.

$$t_{st} = \frac{t_{1in} + t_{1out}}{2} = \frac{296.18 + 267.18}{2} = 281,7 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.1)$$

Potrebné fyzikálne veličiny sú zistené pomocou funkcií v programe EES.

Súčiniteľ tepelnej vodivosti média

$$\lambda_M = k(\text{water}; T = t_{st}; P = p_1) = 0,5863 \text{ [W/m} \cdot \text{K]} \quad (3.2)$$

Hustota

$$\rho_M = \rho(\text{water}; T = t_{st}; P = p_1) = 756,1 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (3.3)$$

Dynamická viskozita

$$\eta_M = \text{Visc}(\text{Water}; T = t_{st}; P = p_1) = 9,463 \cdot 10^{-5} \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \quad (3.4)$$

Kinematická viskozita

$$\nu_M = \frac{\eta}{\rho_M} = 1,252 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^2\text{/s]} \quad (3.5)$$

Prandltové číslo

$$Pr = Pr(\text{water}; T = t_{st}; P = p_{p1}) = 0,8358 \quad (3.6)$$

Pre výpočet Reynoldsového čísla je nutné si zvolit' rýchlosť prúdenia v rúrkach. Zvolená hodnota je $w=4$ [m/s]. Táto hodnota bude vystupovať aj v ďalších výpočtoch. Taktiež vo vzťahu (3.17) vystupuje vnútorný priemer rúrok, keďže sa súčiniteľ prestupu tepla vzťahuje k ich vnútornej časti.

Reynoldsové číslo

$$Re = \frac{w \cdot d_1}{\nu_M} = 421867 \quad (3.7)$$

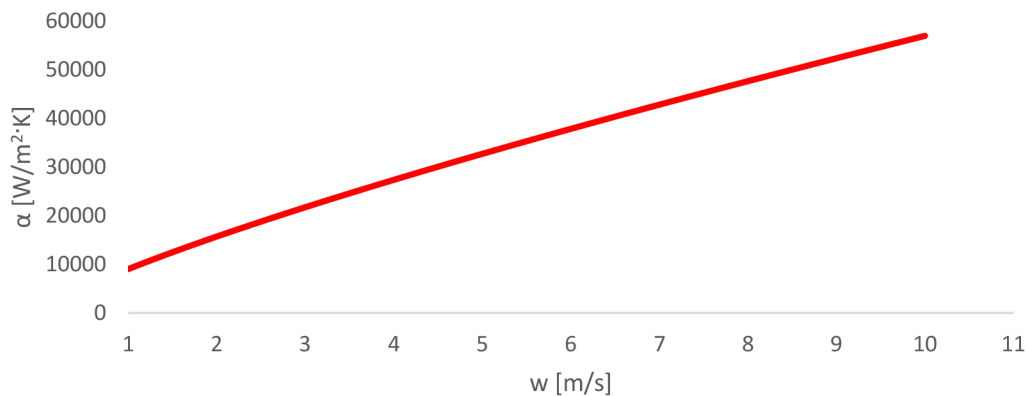
Nusseltové číslo

$$Nus = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} = 615 \quad (3.8)$$

Súčiniteľ prestupu tepla pre vnútornú časť rúrok

$$\alpha_1 = \frac{Nus \cdot \lambda_M}{d_1} = 27317 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]} \quad (3.9)$$

V predošlých vzťahoch môžeme vidieť závislosť súčiniteľa prestupu tepla na rýchlosti prúdenia média. Pri znázornení tejto závislosti v grafe možno vidieť jasné zvýšenie súčiniteľa prestupu tepla pri zvyšujúcej rýchlosti. Čo potvrdzuje vhodnosť voľby toku primárneho média v rúrkach a nie v tlakovej nádobe.



Obrázok 3.2: Graf závislosti súčiniteľa prestupu tepla na rýchlosti toku média

Na vonkajšej strane rúrok teplo prestupuje pomocou varu vo veľkom objeme. Vzťah pre tento typ konvekcie bol vytvorený experimentálne priamo pre parogenerátor typu PGV-213 a je z Ruskej normy RD 24.035.05-89. Pre výpočet je potrebný tlak v nádobe a merný tepelný tok. Tepelný tok plochou Q_s bude rovnaký ako tepelný tok v sekundárnom okruhu, takže v ňom je započítaná aj tepelná strata parogenerátora.

$$q = \frac{Q_s}{S} \quad (3.10)$$

Vo vzťahu (3.20) je nutné poznať teplovýmennú plochu, ktorá ale má byť výslednou hodnotou tepelného výpočtu. Preto je nutné na začiatok zvolit' približnú hodnotu a následne sa iteráciami dostať k výslednej hodnote. V programe EES nie je nutné túto počiatočnú hodnotu

žadavať. Program automaticky zvolí hodnotu a iteruje výpočty až k výslednej hodnote. Po prebehnutí iterácií v programe je výsledná hodnota $q=92224 \text{ [W/m}^2\text{]}$.

Súčiniteľ prestupu tepla pre var vo veľkom objeme

$$\alpha_2 = 4.34 \cdot q^{0,7} \cdot (p_2^{0,14} + 1,37 \cdot 10^{-2} \cdot p_2^2) = 20203 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]} \quad (3.11)$$

Z vypočítaných hodnôt je teraz možné vyjadriť dĺžkový súčiniteľ prestupu tepla.

$$k_l = \frac{\pi}{\frac{1}{d_1 \cdot \alpha_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{d_2 \cdot \alpha_2}} = 225,8 \text{ [W/m} \cdot \text{K]} \quad (3.12)$$

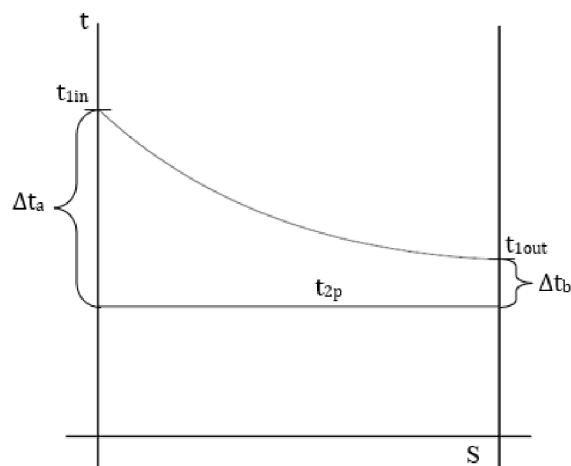
Pre výpočet teplovýmennej plochy je však nutné prepočítať dĺžkový súčiniteľ prestupu tepla na plošný. Na to slúži jednoduchý vzťah, z ktorého je možné vyjadriť potrebný súčiniteľ. Kde d je stredný priemer rúrky.

$$k_s \cdot S \cdot \Delta t = k_l \cdot l \cdot \Delta t \quad (3.13)$$

$$d_{st} = \frac{d_1 + d_2}{2} = 14,6 \text{ mm} \quad (3.14)$$

$$k_s = \frac{k_l}{\pi \cdot d_{st}} = 5578 \text{ [W/m} \cdot \text{K]} \quad (3.15)$$

Ďalšou dôležitou premennou je stredný teplotný logaritmickej spád, ktorý vychádza z rozdielu teplôt v jednotlivých okruhoch a je hnacou silou pre prenos tepla. Pri výpočte pre parogenerátor je možné zanedbať predohrev vody pred bodom varu v sekundárnom okruhu, takže bude brať do úvahy len teplota pary. To je možné vidieť na obrázku 3.3. Graf vykresľuje priebeh zmien teplôt v primárnom (vrchná krivka) a sekundárnom okruhu (spodná priamka) parogenerátora. Je možné vidieť, že pokles teploty sa premieňa na energiu zmeny skupenstva v sekundárnom okruhu.



Obrázok 3.3 Priebeh teploty v parogenerátore

$$\Delta t_a = t_{1in} - t_p = 35,07 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.16)$$

$$\Delta t_b = t_{1out} - t_p = 6,07 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.17)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_a - \Delta t_b}{\ln\left(\frac{\Delta t_a}{\Delta t_b}\right)} = 16,53 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.18)$$

Výpočet teplovýmennej plochy je možný pomocou rovnice pre tepelný tok plochou, v ktorej vystupujú parametre dopočítané vyššie. Kde plocha je vypočítaná pomocou iterácii v programe EES.

$$Q_s = k_s \cdot S \cdot \Delta t_{ln} \rightarrow S = 2452 \text{ [m}^2\text{]} \quad (3.19)$$

Počet rúrok je vypočítaný pomocou vzťahu, ktorý vychádza z rovnice kontinuity. Kde vystupuje S_1 – vnútorný prierez rúry, w – zvolená rýchlosť prúdenia, m_1 – hmotnostný tok v primárnom okruhu a ρ_M – hustota vody.

$$S_1 = \pi \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 = 136,8 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.20)$$

$$m_1 = S_1 \cdot w \cdot \rho_M \cdot n_{tr} \rightarrow n_{tr} = 3675 \quad (3.21)$$

Výsledný počet rúrok je menší než bol uvedený v popise samotného parogenerátora. Dôvodom je, že v reálnom parogenerátore sa nachádza viac rúrok než je potrebné minimum. Toto predimenzovanie slúži ako rezerva pre prípad ak by niektorá z rúrok začala presakovať alebo by praskla. V tom prípade je ju možné upchať bez závažného vplyvu na funkčnosť parogenerátora. Zvyčajne sa pridáva 10 až 25 % rúrok navyše. Odchýlku v počte rúrok mohlo spôsobiť aj zvolenie rýchlostí prúdenia, ktoré nebolo pevne dané.

4 Vplyv zmeny prevádzkových podmienok na parogenerátor

Táto kapitola sa venuje výpočtom, ktoré popisujú správanie parogenerátora pri zmenách výkonov reaktora. Výpočty opäť prebehli vo výpočtovom programe EES. Pri týchto výpočtoch je zafixovaná hodnota teplovýmennnej plochy a počtu rúrok z výpočtov v predošlej kapitole, ktoré vychádzali z hodnôt pri 100% výkone reaktora. Kvôli predimenzovaniu parametrov parogenerátora sa počíta s hodnotami zvýšenými o 10 %. Takže teplovýmenná plocha bude $S = 2770 [m^2]$ a počet rúrok bude rovný $n_{tr} = 4042$. V tabuľke 2 je možné vidieť vstupné hodnoty. Výpočty prebiehajú pri konkrétnych hodnotách výkonu reaktora. V tabuľke sú uvedené už prepočítané hodnoty výkonu na jeden zo šiestich parogenerátorov. Cieľom výpočtov je zistenie hodnôt teploty a tlaku pary v sekundárnom okruhu, a zároveň overenie funkčnosti parogenerátora pri rôznych výkonoch reaktora.

Tabuľka 2: Vstupné hodnoty pre výpočet zmien prevádzkových podmienok

Výkon PG [%]	50	75	100	105	107	108
Tepelný tok PG [MW]	114,6	171	229	240	246	247
Teplota primárneho média na vstupe do PG [°C]	277,9	286,5	296,2	296,7	297,4	301,2
Teplota primárneho média na výstupe z PG [°C]	263	264,4	267,9	266,3	266,5	269,9
Tlak primárneho média [MPa]	12,08	12,08	12,08	12,08	12,8	12,33

Pri výpočtoch boli použité rovnaké vzťahy ako v predchádzajúcej kapitole pre tepelný výpočet parogenerátora. Vďaka funkciám programu EES nebolo nutné vyjadrovať z rovníc iné premenné, keďže program počas numerických iterácií automaticky dopočítava všetky neznáme v jednotlivých rovniciach. Dôležité však bolo zadanie limitných hodnôt pre výpočet, aby sa znížil počet iterácií vedúcich k správne výpočtu. Pri väčšine hodnôt bolo postačujúce zadať ako spodný limit 0. Pri hodnotách vychádzajúcich z termodynamických tabuliek bolo nutné čo najviac znížiť rozptyl hodnôt, aby sa program nedostával k nekonečným iteráciám. Ako je vidieť na obrázku 4.1, najviac ohraňovaná hodnota je pre tlak pary, ktorý je určovaný z tabuliek programu.

Variable	Guess	Lower	Upper	Variable	Guess	Lower	Upper
alpha_1	25137	1,0000E+00	infinity	nu	1,244E-07	0,0000E+00	infinity
alpha_2	20212	1,0000E+00	infinity	nus	570,6	0,0000E+00	infinity
d	0,0146	0,0000E+00	infinity	n_TR	4042	0,0000E+00	infinity
DELTA_a	1	0,0000E+00	1,0000E+02	p	12,08	1,0000E+00	infinity
DELTA_b	1	0,0000E+00	1,0000E+02	Pr	0,8403	0,0000E+00	infinity
DELTA_in	32,2	-infinity	infinity	p_2	4,988	4,5000E+00	5,5000E+00
DELTA_In	16,34	1,0000E+00	infinity	p_para	4,5	4,0000E+00	5,5000E+00
d_1	0,0132	0,0000E+00	infinity	q	89380	1,0000E+00	infinity
d_2	0,016	0,0000E+00	infinity	Qr	1,486E+09	-infinity	infinity
e	2,718	-infinity	infinity	Q_s	2,476E+08	1,0000E+00	infinity
eta	0,00009327	-infinity	infinity	Re	383027	1,0000E+00	infinity
h_2in	948455	-infinity	infinity	rho	749,9	1,0000E+00	infinity
h_2out	1	-infinity	infinity	S	2770	1,0000E+00	infinity
k_l	251	0,0000E+00	infinity	t_1in	301,2	1,0000E+00	infinity
k_s	5471	0,0000E+00	infinity	t_1out	269	1,0000E+00	infinity
lambda	15	0,0000E+00	infinity	t_2in	220,9	-infinity	infinity
lambda_M	0,5815	0,0000E+00	infinity	t_p_1	1	-infinity	infinity
m	1497	0,0000E+00	infinity	t_st	285,1	1,0000E+00	infinity
m_2	1	-infinity	infinity	w	3,609	0,0000E+00	infinity
nu	1,244E-07	0,0000E+00	infinity	x_2out	1	-infinity	infinity

Obrázok 4.1: Limitné hodnoty EES

```

"teplosmenná plocha"
S=2770 [m^2]
n_TR=4042
e=2,718281828459
"tepelný výkon reaktoru"
Qr=1485,5e6 [W]
"tepelný tok"
Q_s=Qr/6
"tlak v 1. okruhu"
p=12,08[MPa]
p_2=4,988 [MPa]
"teplota napajacej vody"
t_2in=220,9 [°C]
"merný tepelný tok"
q=Q_s/S
"teplota na vstupe"
t_1in=301,2 [°C]
"tplota na vstupe"
t_1out=269
"stredná teplota"
t_st=(t_1in+t_1out)/2
"suciniteľ tepelnej vodivosti materialu"
lambda=15[W/m*k]
"vnútorný priemer"
d_1=0,0132[m]
"vonkajší priemer"
d_2=0,016[m]
"suciniteľ tepelnej vodivosti vody"
lambda_M=conductivity(Steam_IAPWS;T=t_st;P=p)
"hustota"
rho=density(Steam_IAPWS;T=t_st;P=p)
"dynamická viskozita"
eta=viscosity(Steam_IAPWS;T=t_st;P=p)
"kinematická viskozita"
nu=eta/rho

"Prandtlovo číslo"
Pr=prandtl(Steam_IAPWS;T=t_st;P=p)
"hmotnostný tok"
m=1497
"rovnica kontinuity"
m=((pi*d_1^2)/4)*w*rho*n_tr
{w=4[m/s]}
"Reynoldsovo číslo"
Re=(w*d_1)/nu
"Nusseltovo číslo"
nus=0,021*Re^(0,8)*Pr^(0,43)
"suciniteľ prestupu tepla vo vnútri trubky"
alpha_1=(nus*lambda_M)/d_1
"suciniteľ prestupu tepla pre var vo veľkom objeme"
alpha_2=4,34*q^0,7*(p_2^0,14+1,37*1e-2*p_2^2)
"dĺžkový suciniteľ prestupu tepla"
k_l=pi/(1/(alpha_1*d_1)+1/(2*lambda)*ln(d_2/d_1)+1/(alpha_2*d_2))
"stredný priemer"
d=(d_1+d_2)/2
"suciniteľ prestupu tepla"
k_s=k_l/(pi*d)
"tepelný tok plochou"
DELTA_t_In=Q_s/(k_S*S)
"stredný tepelný logaritmický spád"
DELTA_t_a/DELTA_t_b=e^((DELTA_t_a-DELTA_t_b)/DELTA_t_In)
DELTA_t_a=t_1in-t_p_1
DELTA_t_b=t_1out-t_p_1
DELTA_t_in=t_1in-t_1out
"bilančný výpočet"
p_para=p_sat(Steam_IAPWS;T=T_p_1)
h_2in=enthalpy(Steam_IAPWS;T=t_2in;P=p_2)
h_2out=enthalpy(Steam_IAPWS;x=x_2out;P=P_para)
x_2out=1
Q_s=m_2*(h_2out-h_2in)

```

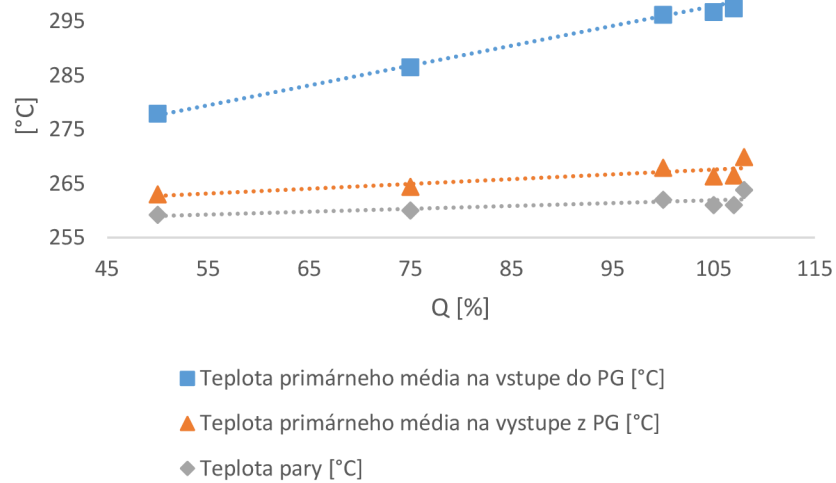
Obrázok 4.2 Ukážka výpočtu v programe EES

V tabuľke 3 sú uvedené výsledné hodnoty tlaku, teploty a hmotnostného toku pary v sekundárnom okruhu a taktiež hodnoty stredného teplotného logaritmického spádu.

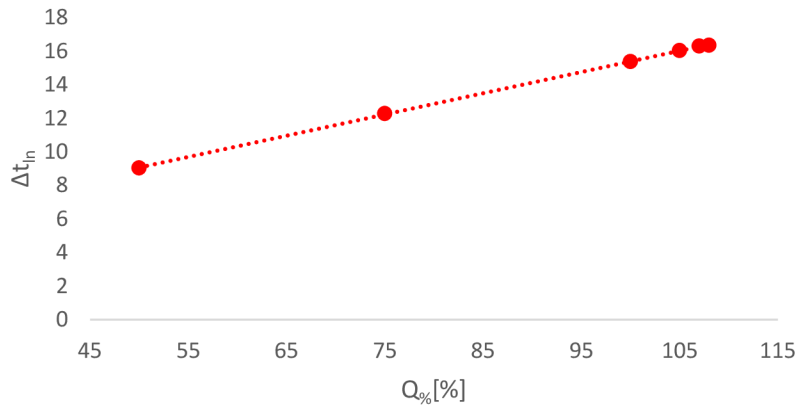
Tabuľka 3: Výsledné hodnoty

Teplota pary [°C]	259,2	260	262	261	261	263,8
Tlak pary [MPa]	4,635	4,695	4,847	4,767	4,773	4,988
Hmotnostný tok primárneho média [kg/s]	1536	1531	1520	1524	1524	1497
Hmotnostný tok pary [kg/s]	57,06	89,7	124,8	130,2	133	134,2
Stredný teplotný logaritmický spád [°C]	9,03	12,27	15,37	16,02	16,29	16,34

Nasledujúce grafy vychádzajú z hodnôt výsledkov uvedených v tabuľke. Na obrázku 4.2 je znázornená zmena teplôt médií v parogenerátore. Je vidieť, že pri rastúcom výkone má teplota primárneho média na vstupe vyšší gradient než ostatné teploty. Zatiaľ čo teplota pary zostáva takmer nezmenená. To má za následok zvyšovanie stredného logaritmického teplotného spádu ako je znázornené na obrázku 4.3.

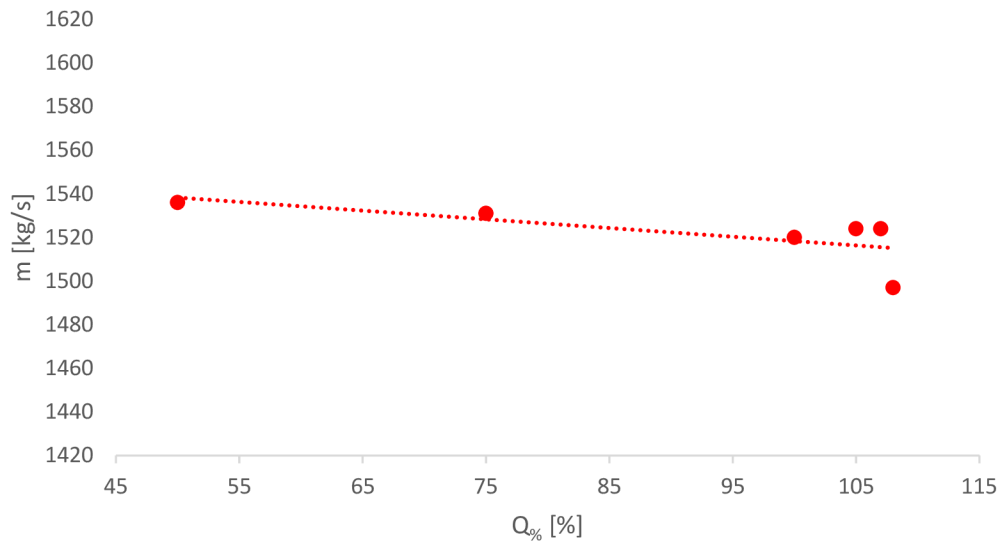


Obrázok 4.3: Graf závislosti teplôt na tepelnom toku v PG



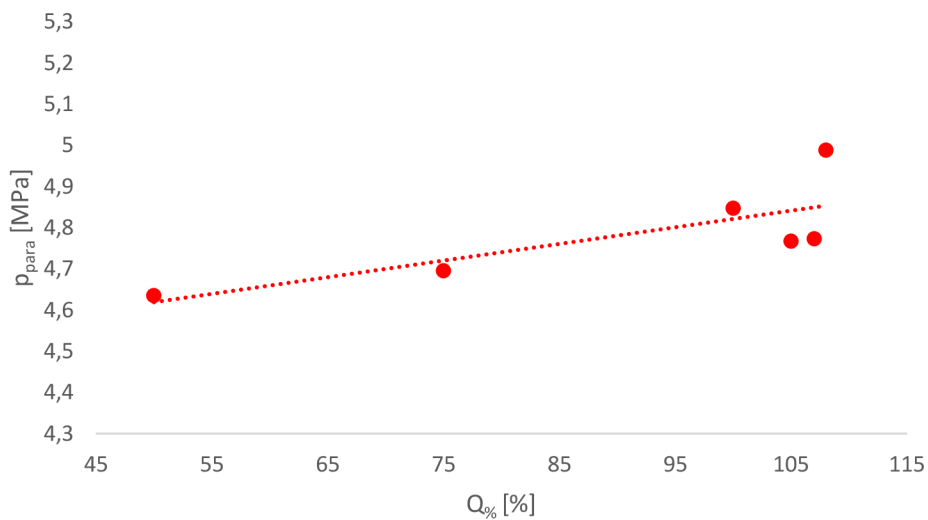
Obrázok 4.4: Graf závislosti stredného logaritmickeho tepelného spádu na tepelnom toku v PG

Vďaka zvyšujúcemu sa strednému logaritmickeému teplotnému spádu sa môže znižovať hmotnostný tok primárneho média, keďže pri vyššom rozdiel teplôt už nie je potrebné také množstvo primárnej vody na vytváranie pary v sekundárnom okruhu.

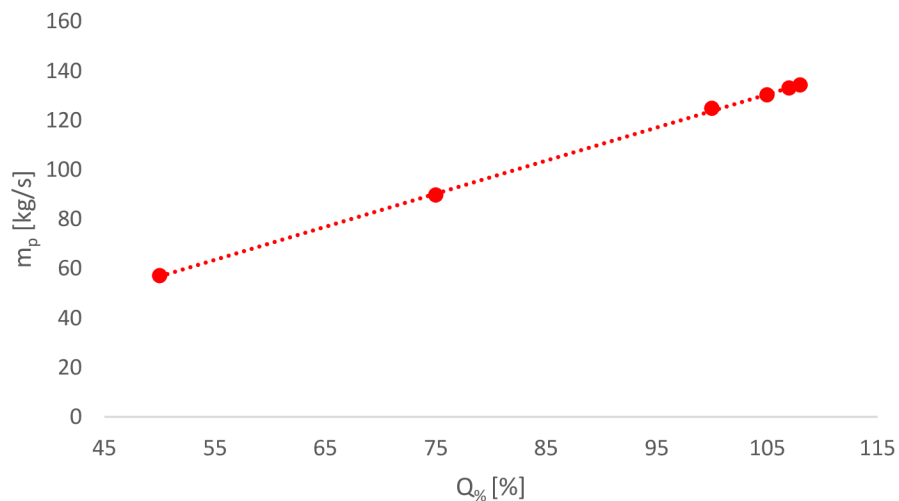


Obrázok 4.5: Graf závislosti hmotnostného toku primárneho média na tepelnom toku v PG

Tlak aj hmotnostný tok pary sa zvyšujú takmer lineárne so stúpajúcim výkonom.



Obrázok 4.6: Graf závislosti tlaku pary na tepelnom toku v PG



Obrázok 4.7: Graf závislosti hmotnostného toku pary na tepelnom toku v PG

Výpočty pri rôznych výkonoch reaktora dokazujú funkčnosť a flexibilitu parogenerátora v prevádzke.

ZÁVER

Prvým cieľom práce bolo stručne popísať jadrovú energetiku. Pre deskripciu fungovania samotnej elektrárne bola vybraná jadrová elektráreň Dukovany. Popísané boli všetky základné komponenty aj s ich hlavnými parametrami dôležitými pre správne fungovanie elektrárne. Taktiež bol vysvetlený priebeh Clausiov-Rankynovho cyklu v jadrovej elektrárni. Ďalšou časťou bola charakteristika parogenerátorov v elektrárňach typu PWR a VVER, kde boli rozobraté výhody a nevýhody použitia dvoch druhov parogenerátorov a to horizontálnych a vertikálnych. Poslednou súčasťou rešerše bol popis parogenerátora typu PGV 213, ktorý je používaný v jadrovej elektrárni Dukovany.

Pomocou bilančného výpočtu boli zistené hodnoty hmotnostných tokov v jednotlivých okruhoch. Následný tepelný výpočet bol zameraný na stanovenie dostatočnej teplovýmennej plochy a počtu rúrok v parogenerátore, ktoré zaručujú tepelný tok medzi primárnym a sekundárnym okruhom. Po porovnaní vypočítaných hodnôt s reálnym počtom rúrok je zjavné predimenzovanie parametrov parogenerátora. Vďaka tomu je zaistená dostatočná bezpečnosť a spoľahlivosť parogenerátora a taktiež aj jeho dostatočná životnosť. Výpočty opisujúce správanie parogenerátora pri zmene výkonu reaktora dokazujú jeho spoľahlivosť pri vyšších ako aj pri znížených výkonoch.

Prínosom tejto práce je zhrňujúci popis parogenerátora, ako jednej z najdôležitejších súčastí jadrovej elektrárne. Preukazuje jeho dômyselné navrhnutie a spoľahlivosť, čo je nevyhnutné pre bezpečné fungovanie jadrových elektrární u nás aj vo svete.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] Outline History of Nuclear Energy. *World Nuclear Association* [online]. London: World Nuclear Association, 2020 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx>
- [2] The Fission Process. *Massachusetts Institute of Technology Nuclear Reactor Laboratory* [online]. Cambridge (Massachusetts): Massachusetts Institute of Technology, c2022 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://nrl.mit.edu/reactor/fission-process>
- [3] Nuclear Fission. In: *Atomicarchive.com* [online]. San Diego: AJ Software & Multimedia, c1998-2020 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.atomicarchive.com/science/fission/index.html>
- [4] HARMAN, Sarah. Pressurized water reactor. In: *Office of Nuclear Energy* [online]. Washington DC: Office of Nuclear Energy, 2021 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work>
- [5] PUCHNAR, Jiří. Svět jaderných reaktorů: Rozdíly mezi PWR a VVER. In: *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions s.r.o, 2015 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/svet-jadernych-reaktoru-rozdily-mezi-pwr-a-vver>
- [6] RBMK Reactors. *World Nuclear Association* [online]. London: World Nuclear Association, 2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/appendices/rbmk-reactors.aspx>
- [7] Základní typy jaderných reaktorů. *Skupina ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, a. s, c2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/zakladni-typy-jadernych-reaktoru>
- [8] Schematické znázornění parního kondenzátoru. In: *Svět Energie* [online]. Praha: ČEZ, a. s, c2020 [cit. 2022-0-4200]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderna-elektrany/jaderna-elektrarna-podrobne/kondenzator/vyklad>
- [9] The five worst nuclear disasters in history. *Process Industry Forum* [online]. Burscough: Process Industry Forum [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.processindustryforum.com/energy/five-worst-nuclear-disasters-history>
- [10] BOECHLER, Ethan, Jordan HANANIA, Kailyn STENHOUSE, Luisa Vargas SUAREZ a Jason DONEV. CANDU reactor. *Energy education* [online]. Calgary: The University of Calgary, 2021 [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: https://energyeducation.ca/encyclopedia/CANDU_reactor
- [11] Virtuální prohlídka Dukovany. *Skupina ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, a. s, c2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <http://virtualniprohlidky.cez.cz/cez-dukovany/>

- [12] Turbína. In: *Facebook* [online]. 2010 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/109431345742258/photos/turb%C3%ADna/114333625252030> Oficiální facebook Jaderných elektráren Dukovany.
- [13] Uhelná elektrárna podrobně. *Skupina ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, a. s, c2020 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/uhelne-elektrarny/uhelna-elektrarna-podrobne/charakteristika-zdroje/parametry>
- [14] EES. *F-Chart Software* [online]. Madison: F-Chart Software, c2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://fchartsoftware.com/ees/>
- [15] RAČEK, Jiří. *Energetická zařízení: stroje a zařízení jaderných elektráren*. Brno: Zdeněk Novotný, 2004. ISBN 80-214-2735-3.
- [16] RAČEK, Jiří. *Jaderná zařízení*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2009. ISBN ISBN978-80-214-3961-0.
- [17] MATAL, Oldřich. *Konstrukční cvičení: (vybrané komponenty jaderně energetických zařízení)*. Brno: Vysoké učení technické, 1988. Učební texty vysokých škol
- [18] ÇENGEL, Yunus, Afshin Jahanshahi GHAJAR a Mehmet KANOGLU. *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. 4th ed. in SI units. New York: McGraw-Hill, 2011. ISBN 978-0-07-131112-0.
- [19] KUSÝN, L. *Výkresová dokumentace PG 440 JE Dukovany*, VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s.
- [20] HLOUŠEK, Jiří. *Termomechanika*. 2. vyd. Brno: VUT v Brně, 2000, ISBN 80-214-1720-X.
- [21] BEČVÁŘ, Josef. *Jaderné elektrárny*. 2. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1981
- [22] MICHELE, František, František DUBŠEK a Josef TRUBÁČEK. *Strojní zařízení jaderných elektráren*. Praha: STNL-Nakladatelství technické literatury, 1974.
- [23] Rankine Cycle – Steam Turbine Cycle. *Nuclear Power* [online]. Nuclear Power for Everybody, c2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-cycles/rankine-cycle-steam-turbine-cycle/>
- [24] Effect of the steam generator on temperature fluctuations of the primary circuit coolant in VVER-440 reactors. KISS, Sándor a Sándor LIPCSEI. *Annals of Nuclear Energy* [online]. 2014, s. 166-172 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454914002345>
- [25] GREEN, S. J. a G HETSRONI. *PWR Steam generators*. Great Britain: Elsevier Science, 1995.

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A ZKRATIEK

Symbol	Veličina	Jednotka
<i>PWR</i>	Tlakovodný reaktor- západný typ	
<i>VVER</i>	Tlakovodný reaktor- východný typ	
<i>BWR</i>	Varný reaktor	
<i>RBMK</i>	Vysokorýchlostný kanálový reaktor	
<i>CANDU</i>	CANada Deuterium Uranium	
<i>PGV</i>	Typ parogenerátoru	
<i>PG</i>	Parogenerátor	
<i>EES</i>	Engineering Equation Solver	
p_1	Tlak v primárnom okruhu	[MPa]
p_2	Tlak v sekundárnom okruhu	[MPa]
t_{1in}	Teplota primárnej vody na vstupe do PG	[°C]
t_{1out}	Teplota primárnej vody na výstupe z PG	[°C]
t_{2in}	Teplota napájacej vody	[°C]
t_p	Teplota pary na výstupe z PG	[°C]
η_{PG}	Efektivita PG	–
Q	Tepelný výkon reaktoru	[MW]
Q_1	Tepelný tok v primárnom okruhu PG	[MW]
Q_2	Tepelný tok v sekundárnom okruhu PG	[MW]
Q_s	Tepelný tok teplovýmennou plochou PG	[MW]
h_{1in}	Entalpia primárnej vody na vstupe do PG	[kJ/kg]
h_{1out}	Entalpia primárnej vody na výstupe z PG	[kJ/kg]
h_{2in}	Entalpia napájacej vody	[kJ/kg]
h_p	Entalpia pary na výstupe z PG	[kJ/kg]
m_1	Hmotnostný tok v primárnom okruhu PG	[kg/s]
m_2	Hmotnostný tok v sekundárnom okruhu PG	[kg/s]
α_1	Súčiniteľ prestupu tepla vo vnútornej strane rúrky	[W/m ² · K]
α_2	Súčiniteľ prestupu tepla na vonkajšej strane rúrky	[W/m ² · K]
λ	Súčiniteľ tepelnej vodivosti	[W/m · K]
λ_M	Súčiniteľ tepelnej vodivosti primárnej vody	[W/m · K]
ρ_M	Hustota primárnej vody	[kg/m ³]
η_M	Dynamická viskozita primárnej vody	[Pa · s]
ν_M	Kinematická viskozita primárnej vody	[m ² /s]
<i>Pr</i>	Prandltové číslo	–
<i>Re</i>	Reynoldsové číslo	–
<i>Nus</i>	Nusseltové číslo	–
d_1	Vnútorný priemer rúrky	[mm]

d_2	Vonkajší priemer rúrky	[mm]
q	Merný tepelný tok	[W/m ²]
S	Teplovýmenná plocha	[mm ²]
k_l	Dĺžkový súčiniteľ prestupu tepla	[W/m · K]
k_s	Plošný súčiniteľ prestupu tepla	[W/m · K]
Δt	Rozdiel teplôt	[°C]
l	Dĺžka rúrok	[m]
Δt_a	Rozdiel teplôt na vstupe do PG	[°C]
Δt_b	Rozdiel teplôt na výstupe z PG	[°C]
Δt_{ln}	Stredný teplotný logaritmickej spád	[°C]
w	Rýchlosť prúdenia primárnej vody	[m/s]
n_{tr}	Počet rúrok v PG	—
$Q\%$	Tepelný výkon v %	[%]
d_{st}	Stredný priemer rúrky	[mm]

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1.1: Štiepna reakcia [3]	11
Obrázok 1.2: Reaktor typu PWR/VVER [4]	12
Obrázok 1.3: Reaktor typu BWR [7]	13
Obrázok 1.4 : Reaktor typu RBMK [6]	13
Obrázok 1.5: Reaktor typu CANDU	14
Obrázok 1.6: Parná turbína v Dukovanoch [12]	16
Obrázok 1.7: Kondenzátor [8]	16
Obrázok 1.8: Chladiace veže Dukovany	17
Obrázok 1.9: Clausiov-Rankinov cyklus v T-s diagrame	18
Obrázok 1.10: Porovnanie cyklov so sýtou parou a prehriatou [15]	18
Obrázok 1.11: Tepelná schéma jadrovej elektrárne Dukovany [19]	19
Obrázok 2.1: Napravo schéma prvého parogenerátoru v Obninsku, Naľavo parogenerátor elektrárne Shippingport v USA. 1-výparník, 2-vstup primárnej vody, 3-výstup prehriatej pary, 4-prehrievač, 5-ekonomizér, 6 vstup napájacej vody, 7-výstup primárnej vody [23]	20
Obrázok 2.2: Vertikálny parogenerátor [25]	21
Obrázok 2.3: Parogenerátor typu PGV 213 [24]	21
Obrázok 2.4: Tlaková nádoba parogenerátoru [17]	22
Obrázok 3.1: Prestup tepla stenou rúrky	26
Obrázok 3.2: Graf závislosti súčiniteľa prestupu tepla na rýchlosti toku média	27
Obrázok 3.3: Pribeh teploty v parogenerátore	28
Obrázok 4.1: Limitné hodnoty EES	30
Obrázok 4.2: Ukážka výpočtu v programe EES	31
Obrázok 4.3: Graf závislosti teplôt na tepelnom toku v PG	32
Obrázok 4.4: Graf závislosti stredného logaritmickeho tepelného spádu na tepelnom toku v PG	32
Obrázok 4.5: Graf závislosti hmotnostného toku primárneho média na tepelnom toku v PG	33
Obrázok 4.6: Graf závislosti tlaku pary na tepelnom toku v PG	33
Obrázok 4.7: Graf závislosti hmotnostného toku pary na tepelnom toku v PG	34

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1: Zadané hodnty	24
Tabuľka 2: Vstupné hodnoty pre výpočet zmien prevádzkových podmienok.....	30
Tabuľka 3: Výsledné hodnoty	31