



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

NÁVRH PAROGENERÁTORU PRO JADERNÉ ELEKTRÁRNY

STEAM GENERATOR DESIGN FOR NUCLEAR POWER PLANTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Škůrek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Radim Škúrek**
Studijní program: Energetika
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh parogenerátoru pro jaderné elektrárny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Srdcem jaderné elektrárny je její primární okruh, který se skládá z reaktoru, kde je generováno teplo a parogenerátoru, ve kterém je teplo předáváno do sekundárního okruhu. Právě návrh parogenerátoru je náplní této bakalářské práce.

Cíle bakalářské práce:

1. popis parogenerátoru a jeho účelu v jaderných elektrárnách, základní umístění a konstrukční varianty, specifika parogenerátorů pro VVER,
2. návrh a tepelný výpočet parogenerátoru,
3. tvorba základní výkresové dokumentace.

Seznam doporučené literatury:

DUBŠEK, František. Jaderná energetika. Brno: PC DIR, 1994, 209 s. ISBN 80-214-0538-4.

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.

STEHLÍK, Petr, Josef KOHOUTEK a Jan NĚMČANSKÝ. Tepelné pochody: výpočet výměníku tepla. Brno: VUT Brno, 1991, 129 s. : obr., tabulky, grafy. ISBN 80-214-0363-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou parogenerátorů v jaderných elektrárnách, konkrétně návrhem parogenerátoru pro reaktory typu VVER 440-213. V první části je čtenář uveden do základních principů fungování jaderných elektráren a typologie reaktorů. Důraz je kladen na úlohu parogenerátoru jako klíčového tepelného výměníku mezi primárním a sekundárním okruhem. Druhá část práce se věnuje detailnímu výpočtu a návrhu parogenerátoru na základě provozních parametrů jaderné elektrárny Dukovany. Výsledkem je termodynamický návrh zahrnující volbu koncepce, výpočet tepelného výkonu, dimenzování výměníku a návrh teplosměnných trubiček, výpočtem celkové teplosměnné plochy a délky trubek, který je zakončen návrhem základních rozměrů a tvorbou výkresu.

Abstract

This bachelor's thesis focuses on the issue of steam generators in nuclear power plants, specifically the design of a steam generator for VVER 440-213 type reactors. The first part introduces the fundamental principles of nuclear power plant operation and reactor typology, with an emphasis on the steam generator as a key heat exchanger between the primary and secondary circuits. The second part presents a detailed calculation and design of the steam generator based on the operating parameters of the Dukovany Nuclear Power Plant. The result is a thermodynamic design that includes the selection of the conceptual approach, thermal output calculation, heat exchanger sizing, and the design of heat transfer tubes. This includes determining the total heat transfer surface area and tube length, concluding with the proposal of the basic dimensions and the creation of a technical drawing.

Klíčová slova

jaderná energetika, parogenerátor, VVER 440, tepelný výměník, návrh zařízení

Keywords

nuclear power engineering, steam generator, VVER 440, heat exchanger, equipment design

Citace

ŠKŮREK, Radim. *Návrh parogenerátoru pro jaderné elektrárny*. Brno, 2025. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

Návrh parogenerátoru pro jaderné elektrárny

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem toto pojednání vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Marka Baláše, PhD. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....
Radim Škúrek
23. května 2025

Poděkování

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Marku Baláši za vedení a čas, který mi během zpracování věnoval. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Vojtěchu Buďovi za poskytnutí podkladů.

Obsah

1	Úvod	2
2	Jaderná elektrárna	3
2.1	Základní princip jaderné elektrárny	3
3	Primární okruh JE (I.O.)	5
3.1	Jaderný reaktor	5
3.1.1	Tlakovodní reaktory (PWR, VVER)	6
3.1.2	Reaktor moderovaný těžkou vodou (HWR)	6
3.1.3	Varné reaktory (BWR)	7
3.1.4	Plynem chlazené reaktory (GCR, Magnox)	7
3.2	Parogenerátor	8
3.2.1	PG reaktorů chlazených plynem	8
3.2.2	PG reaktorů chlazených tekutým kovem	8
3.2.3	PG reaktorů chlazených tlakovou vodou	9
3.3	Hlavní cirkulační čerpadla (HCČ)	10
3.4	Kompenzace objemu	11
4	Sekundární okruh	12
4.1	Parní turbína	13
4.2	Kondenzátor	13
4.3	Napájecí nádrž	13
5	Terciální okruh	14
6	Návrh PG	15
6.1	Volba koncepce	15
6.2	Termodynamické výpočty	15
6.3	Návrh základních rozměrů a tvorba výkresu	21
7	Závěr	23
	Seznam obrázků	26
	Seznam tabulek	27
	Seznam zkratk	28
	Seznam příloh	29

Kapitola 1

Úvod

Žijeme v době, kdy se kvůli klimatickým změnám snažíme stále čím dál tím více omezovat emise oxidu uhličitého do ovzduší. Jedním z nejvýznamnějších producentů oxidu uhličitého je právě sektor energetiky. Hlavním směrováním soudobé energetiky je postupné zajištění uhlíkové neutrality. Toho se snažíme dosáhnout vícero způsoby, např. použitím obnovitelných zdrojů, spalováním biomasy, kde biomasa sice vypouští oxid uhličitý, ale během růstu jej spotřebovává, a poslední dobou se též rozmáhá jaderná energetika, která byla dlouhou dobu spíše na útlumu, co se Evropy týká.

Jaderné elektrárny mají v tomto mixu z mého pohledu nezastoupitelnou roli základního zdroje. Jelikož jsou schopny dodávat velmi stabilně velké množství elektrické energie a nejsou závislé na počasí, jako většina obnovitelných zdrojů.

Parogenerátor je jednou z nejdůležitějších komponent, který využívá většina jaderných elektráren s výjimkou elektráren varnými reaktory. Slouží k oddělení primárního okruhu od sekundárního, přičemž předává teplo z chladícího média do vody sekundárního okruhu, kdy z něj odchází pára. Právě tomuto se věnuje moje bakalářská práce.

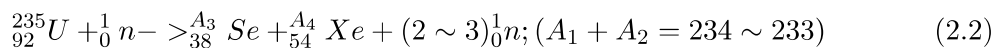
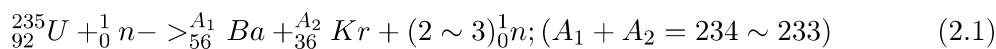
Kapitola 2

Jaderná elektrárna

Jaderná elektrárna je průmyslové zařízení, které využívá štěpnou reakci těžkých kovů (nejčastěji uranu U) pro výrobu tepla a následně elektrické energie. Srdcem celé jaderné elektrárny je reaktor, ve kterém se uskutečňuje samostatně se udržující řízená štěpná reakce. Elektrárna bývá rozdělena do více okruhů, které jsou odděleny teplosměnnými plochami v parogenerátoru. Někdy se sekundární okruh vynechává a pára vznikající přímo v reaktoru je hnána do turbosoustrojí, naopak někdy, zejména u reaktorů chlazených sodíkem nebo tekutými kovy, se z bezpečnostních důvodů přidává ještě o jeden okruh více. [4]

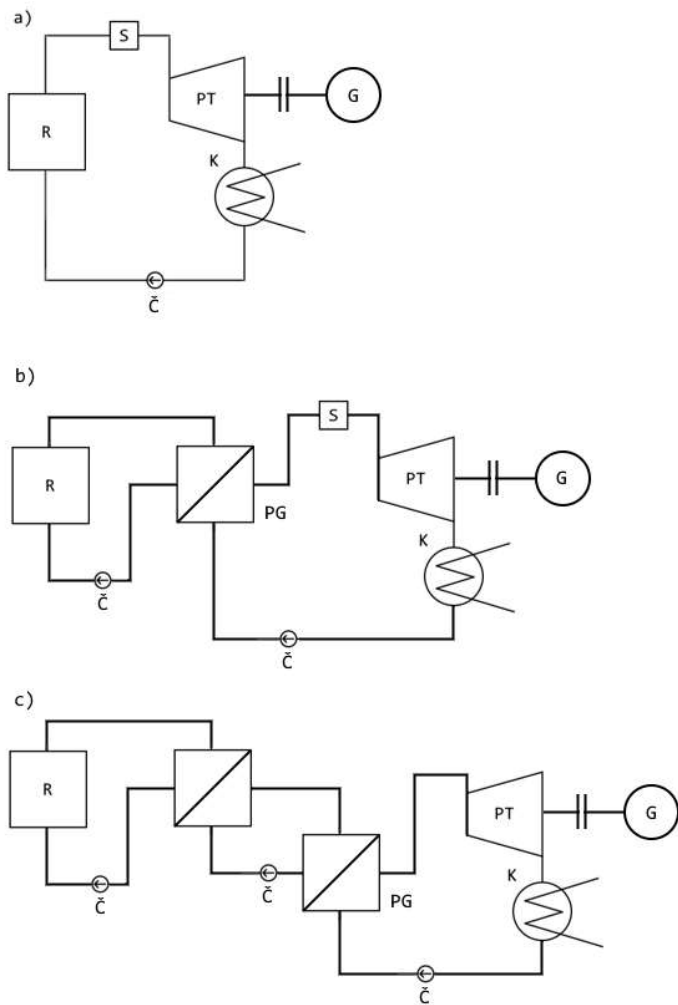
2.1 Základní princip jaderné elektrárny

Základní odlišností JE je způsob získávání tepla do pracovního cyklu. Zatímco v konvenční parní elektrárně je teplo přiváděno z chemického slučování atomů (hoření), při kterém se atomy zejména uhlíku slučují s atmosférickým kyslíkem za vzniku oxidu uhličitého a tepla. Tímto způsobem získáme z 1 kg uhlí $2,53 \cdot 10^7$ J. [16] Kdežto u JE je teplo získáváno zejména zpomalováním neutronů v aktivní zóně reaktoru, kdy dochází k přeměně kinetické energie neutronů na energii tepelnou. Tímto způsobem se při úplném rozštěpení jaderného paliva může uvolnit přibližně $7,9 \cdot 10^{13}$ J/kg. [4] Tato hodnota je však pouze teoretická a v běžné praxi se u tlakovodních reaktorů dosahuje energetického výtěžku $2,9 \cdot 10^{12}$ J/kg. [4]. Tyto neutrony jsou produkty řetězové štěpné reakce, při které dochází ke štěpení jader těžkých atomů. U reaktorů VVER 440 je palivem uran s obohacením až 3,6% U 235. [7] Štěpení probíhá primárně podle dvou rozpadových řad a to:



Z rovnic výše vyplývá, že při štěpné reakci vzniká více neutronů než do rovnice vstupuje, což umožňuje udržet štěpnou reakci v chodu bez vnějšího neutronového zdroje. [7]

Tyto neutrony se dále dělí podle jejich energie na neutrony rychlé $E > 0,1$ MeV, neutrony středních rychlostí $E = 1$ keV - $0,1$ MeV, pomalé $E < 1$ eV a tepelné $0,025 \sim 0,1$ eV. [7]



Obrázek 2.1: Schéma hlavních okruhů jaderné elektrárny
 a) jednookruhová, b) dvouokruhová, c) tříokruhová

R - reaktor, PG - parogenerátor, Č - cirkulační čerpadlo, S - separátor páry, PT - parní turbína, G - generátor, K - kondenzátor

[4]

Kapitola 3

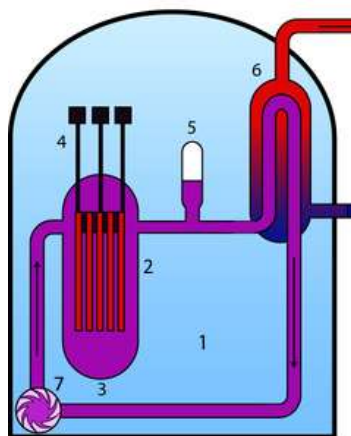
Primární okruh JE (I.O.)

Jedná se o jadernou část elektrárny, která je uzavřena v hermeticky izolované budově. Jedná se o systém, který za pomoci chladicího média zajišťuje odvod tepla z aktivní zóny reaktoru (AZ) do parních generátorů (PG) kdy se teplo předává do okruhu sekundárního (II.O.). V PG ochlazené chladivo je hnáno hlavním cirkulačním čerpadlem (HCČ) zpět do AZ, kde se znovu ohřívá na požadovanou teplotu. [6]

3.1 Jaderný reaktor

Jaderný reaktor je tlaková nádoba, ve které se nachází samotná aktivní zóna, ve které dochází k samostatně se udržující jaderné reakci. Jeho hlavním úkolem je zajišťovat rozmístění paliva, zpomalování neutronů ze štěpné reakce, řízení jaderné reakce, odstínění nebezpečného zařízení, aby neunikalo do okolí, a zajistit správnou cirkulaci chladicího média pro odvod tepla z aktivní zóny. [4]

Jaderné reaktory můžeme dělit podle několika kritérií. Jedním ze způsobů dělení je podle používaných neutronů, a to na reaktory s rychlými neutrony, které se v současnosti velice snaží rozvíjet ve formě malých modulárních reaktorů. Naproti tomu reaktory s tepelnými neutrony jsou dnes velmi rozšířené. Tento typ reaktorů má mnoho různých koncepcí, které se dělí podle chladicího média na reaktory tlakovodní (PWR - pressurized water reactor, VVER - Vodo-Vodnjanyj Energetičeskij Reaktor), reaktory těžkovodní (HWR - heavy water



Obrázek 3.1: Schéma primárního okruhu VVER

1 - kontejnment, 2 - aktivní zóna, 3 - jaderný reaktor, 4 - regulační tyče, 5 - kompenzátor objemu, 6 - parogenerátor, 7 - hlavní cirkulační čerpadlo

[12]

reactor), varný reaktor (BWR - boiling water reactor) a reaktory chlazené plynem (GCR - gas cooled reactor). [7]

3.1.1 Tlakovodní reaktory (PWR, VVER)

Historicky vychází koncepce reaktorů PWR z reaktorů používaných na ponorkách. První jadernou elektrárnou byla elektrárna Shippingport v USA v roce 1957 a první komerční elektrárnou s PWR byla Yankee v roce 1961.

PWR a VVER se je v současné době nejrozšířenějším typem reaktoru, protože spojuje skvělou bezpečnost s rozumnými investičními nároky. V současnosti je v provozu 312 tlakovodních reaktorů [2] a 55 je ve výstavbě. [3]

Hlavními rysy tlakovodních reaktorů jsou:

- obohacé palivo ve formě UO_2 , nebo mox
- malá aktivní zóna
- jednoduchý chladicí systém
- levný moderátor a chladivo
- potenciální problémy s korozí v důsledku tlaku a teploty
- nutné odstávky kvůli výměně paliva
- vysoká stabilita reaktoru

Reaktory typu PWR mají však i své nedostatky. Prvním je nutnost používat obohacené palivo, kdy se palivo obohacuje na 3 - 5% $^{235}_{92}U$. Další nevýhoda vyplývá z vysokého tlaku, tlaková nádoba reaktoru musí být v celku, aby zvládla vysoký tlak chladicí vody. Přeprava je tudíž velmi náročná. [7]

3.1.2 Reaktor moderovaný těžkou vodou (HWR)

Vzhledem ke skvělým vlastnostem těžké vody jako moderátoru se o tomto typu reaktoru uvažovalo jako o prvním. V dnešní době můžeme za hlavní provozovatele těžkovodních reaktorů považovat Kanadu s jejich reaktorem CANDU, který se rozšířil do Indie. [4] V provozu je 47 těžkovodních reaktorů [2] a 1 ve výstavbě [3]

Těžká voda, která slouží k moderaci neutronů, je kvůli dobrým vlastnostem udržována na 60 °C a je oddělena od vody chladicí. Chladivo protéká tlakovými kanály, které jsou odizolovány vrstvou oxidu uhličitého. Tyto kanály jsou v reaktoru uloženy horizontálně. [7]

Hlavní rysy varných reaktorů

- palivem je přírodní uran
- velké vyhoření paliva
- kompaktní uspořádání aktivní zóny
- udržování moderátoru kolem 60 °C
- relativně drahý moderátor a chladivo
- možnost výměny paliva za plného výkonu

[7]

3.1.3 Varné reaktory (BWR)

Ve varných reaktorech, jak již název napovídá, dochází k varu chladicího média (vody) přímo v aktivní zóně reaktoru, díky tomu se velmi zjednodušuje koncept elektrárny, jelikož není potřeba sekundárního okruhu jako u reaktorů tlakovodních. Další předností je nižší tlak v reaktorové nádobě okolo 7 MPa oproti např. VVER 1000 15,7 MPa, díky čemuž jsou kladeny mnohem nižší nároky na tlakovou nádobu reaktoru. [7]

V současnosti jsou reaktory BWR čistě západní koncepcí rozvíjenou zejména ve USA a Japonsku. V provozu je 60 reaktorů typu BWR [2], 2 jsou ve výstavbě v Japonsku. [3]

Hlavní rysy varných reaktorů

- obohacé palivo ve formě UO_2 , nebo MOX
- nižší tlak v nádobě reaktoru než u PWR
- velká stabilita, díky zvýšenému počtu parních bublin se snížila reaktivita
- levný moderátor a chladivo
- nutné odstávky kvůli výměně paliva
- radioaktivní látky se dostávají do turbíny a parovodů

Mezi hlavní nevýhody varných reaktorů patří zejména radioaktivita turbíny v důsledku unášení radioaktivních částic z aktivní zóny reaktoru. Další nevýhodou je nutnost regulačních tyčí zasouvaných ze spodu reaktoru, protože nad aktivní zónou jsou separátory a sušiče páry. [7]

Specifickou skupinou varných reaktorů jsou reaktory RBMK (reaktor bolšoj moščnosti kanalnyj) sovětské konstrukce, kde je reaktor složen z tlakových kanálů, ve kterých dochází k varu. U starších reaktorů RBMK o výkonu 530 MW_e docházelo i k přehřívání páry. U novějších reaktorů s výkonem 1000 MW_e k přehřevu již nedochází. Tento typ reaktoru se v dnešní době již nestaví, jelikož má fatální nedostatky v bezpečnosti, kdy reaktor při nízkých výkonech má velmi nestabilní reaktivitu a může dojít k velmi těžké nehodě, jako to bylo v Černobylské jaderné elektrárně. [7] V současnosti je v provozu 10 reaktorů. [2]

3.1.4 Plynem chlazené reaktory (GCR, Magnox)

Plynem chlazené reaktory jsou historicky nejstarším typem jaderných reaktorů. První experiment s jaderným reaktorem (Chicago pile, 1942) byl grafitem moderovaný plynem chlazený reaktor. Jako chladivo se ze začátku používal vzduch, později oxid uhličitý. Jejich rozvoj poháněla jednoduchost a spolehlivost, díky čemuž byly ve Velké Británii, Francii, Itálii, Japonsku a Španělsku rozvíjeny do energetických reaktorů. [4]

V současnosti je v provozu 8 plynem chlazených reaktorů [2] a ve výstavbě není žádný. [3]

Hlavní rysy plynem chlazených reaktorů

- palivo ve formě kovového uranu nebo obohacené UO_2
- velké rozměry aktivní zóny
- extrémně nízký specifický výkon
- vysoká bezpečnost

- malé požadavky na ochrany obal
- velký podíl čerpací práce

[7]

3.2 Parogenerátor

Parní generátor je tepelný výměník sloužící k ohřevu a výrobě páry. Dochází v něm k předávání tepla z chladícího média reaktoru do vody sekundárního okruhu. Parogenerátor tvoří rozhraní mezi primárním a sekundárním okruhem.

U parních generátorů sledujeme charakteristiky jako: parní výkon, tlak, teplota a vlhkost páry a teplotu napájecí vody. Je zvykem, že parní generátory mají velmi malé tepelné ztráty většinou kolem 1 - 2%, které jsou způsobeny únikem tepla přes izolaci do okolí parního generátoru.

V parním generátoru můžeme nalézt následující části: ekonomizér (ohřev vody na teplotu sytosti), výparník, přehřívák, ten se však nepoužívá příliš často, a separátor kapiček a vlhkosti z páry, který bývá ve formě lamel nebo několika děrovaných plechů.

Na parní generátor jsou kladeny speciální nároky. Například nesmí být zdrojem jakékoli kontaminace korozivních látek v primárním okruhu, musí být zajištěna dokonalá pevnost, aby nedošlo k úniku primárního média do média sekundárního. Musí být dosaženo velké čistoty páry, aby mohla být turbína provozována ekonomicky a bezpečně. [15, 7, 4]

3.2.1 PG reaktorů chlazených plynem

Nejčastějším médiem, které proudí v I.O. elektráren s reaktory chlazenými plynem, jsou oxid uhličitý a hélium. Tyto plyny bez větších problémů snesou i vysoké teploty běžně 400 °C u CO_2 a až 600 °C u hélia. Jelikož jde o plyny, tak se parní generátory těchto elektráren liší od elektráren na biomasu a uhlí nejméně. Jde o svazkový výměník, kde plyn I.O. proudí okolo svazku trubek, ve kterých proudí médium sekundárního okruhu (nejčastěji voda). Tyto parní generátory bývají obvykle v bubnovém provedení a je možný i přehřev páry. Trubky výparníku bývají obvykle vybaveny žebry, aby byla plocha na straně plynu co možná nevyšší. Druhou možností provedení parogenerátoru na plyn je ho integrovat přímo do tlakové nádoby reaktoru. V tomto případě však není užít bubne, ale parní generátor je průtočný. Plyny jsou méně korozivní než tlaková voda (zejména hélium), což má za následek menší nároky na oceli, ze kterých je výměník vyroben. [4, 8]

3.2.2 PG reaktorů chlazených tekutým kovem

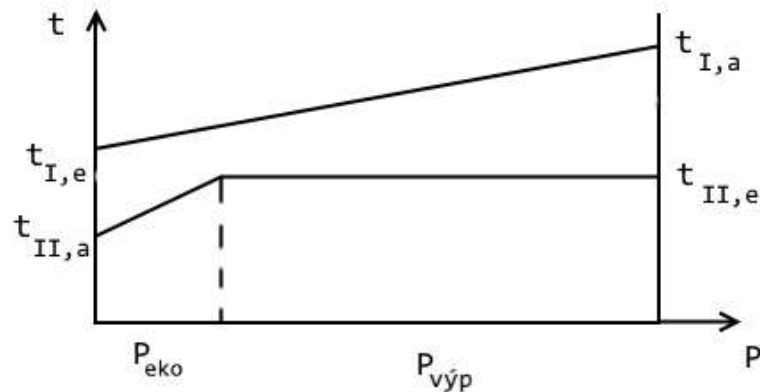
Reaktory chlazené tekutým kovem jsou většinou v tříokruhové konfiguraci, kdy v primárním okruhu se téměř výhradně používá sodík, který má velmi výhodné absorpční a termodynamické vlastnosti. V druhém okruhu (mezi okruhu) se také používá sodík, popřípadě směs sodíku s draslíkem. Mezi druhým a třetím okruhem se nachází parogenerátor, ve kterém jsme schopni docílit přehřáté páry o velmi vysokých parametrech, jelikož má sodík teplotu přes 500 °C. Elektrárny používající sodík jako chladící médium mají oproti PWR či BWR vyšší účinnost.[4, 8]

Na parogenerátory používající sodík na primární straně jsou kladeny obzvlášť velké nároky na odolnost vůči teplotám a také těsnost. Sodík je totiž velmi reaktivní s vodou a za vyšších teplot se při jejich reakci separuje vodík, který díky vysokým teplotám může

až vybuchnout. Další věcí, na kterou si musíme dávat pozor, je, aby legury obsažené v používané oceli nebyly rozpustné v sodíku, jelikož by pak mohlo dojít k narušení struktury a pevnosti trubek a armatur. Sodík také taje až při teplotách blízcích se 100 °C (záleží na jeho čistotě), což znamená, že při odstavení reaktoru může v trubkách zatvrdnout a veškerý potrubní systém musí být nahříván. [4, 8]

3.2.3 PG reaktorů chlazených tlakovou vodou

Parní generátory reaktorů chlazených tlakovou vodou jsou nejrozšířenějším typem parních generátorů u jaderných elektráren. Do parního generátoru vstupuje na primární straně voda a velmi vysokém tlaku až 17 MPa, abychom v reaktoru vodu mohli zahřát na co nejvyšší teplotu a stále zůstala v kapalném stavu. Z tohoto důvodu se voda primárního okruhu dává do malých trubiček, které díky malému průměru umožní, aby síla jejich stěn nebyla příliš velká a „nebrzdila“ přestupu tepla z primární vody do vody sekundární. Sekundární voda se nachází v tělese parogenerátoru a má nižší tlak okolo 5 MPa. Tímto způsobem se v parním generátoru vyrábí právě sytá pára, ze které je následně odseparována vlhkost. U těchto parogenerátorů nedochází k přehřívání páry.



Obrázek 3.2: P-T diagram parogenerátoru s primárním teponosičem tlakovou vodou vyrábějícím sytou páru

[8]

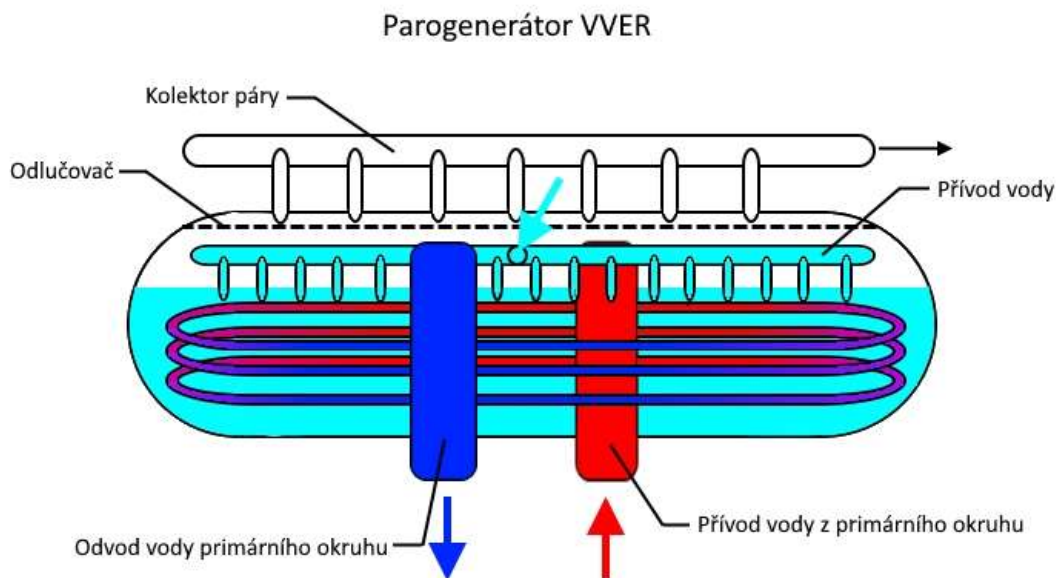
Trubičky jsou vyrobeny z vysoce legovaných austenitických ocelí nebo nikl-chromových slitin. Kvůli těmto materiálům je důležité trubičky konstruovat do tvaru písmene U, aby mohly volně dilatovat.

Horizontální PG

Horizontální parní generátory na tlakovou vodu jsou doménou zejména elektráren s reaktory typu VVER sovětské konstrukce.

Primární voda proudí uvnitř trubiček, ty vycházejí z kolektoru, který je umístěn vertikálně a prochází tělesem parního generátoru. Z něj vycházejí horizontálně do obou směrů a mají tvar písmene U. Následně jsou opět svedeny do kolektoru, odkud je voda opět odvedena do reaktoru. Svazek těchto trubiček je ponořen pod hladinu sekundární vody.

Sekundární voda je rozváděna rozdělovacím kolektorem po tělese parního generátoru. Odpřená voda sekundárního okruhu poté prochází skrze děrovaný plech a žaluziový odlučovač přes sběrné trubky do přívodníku k hlavnímu parnímu kolektoru.[4, 8, 13]



Obrázek 3.3: Schéma horizontálního parogenerátoru VVER

Vertikální PG

Jde o druh parních generátorů, které se vyrábějí v bývalém západním bloku.

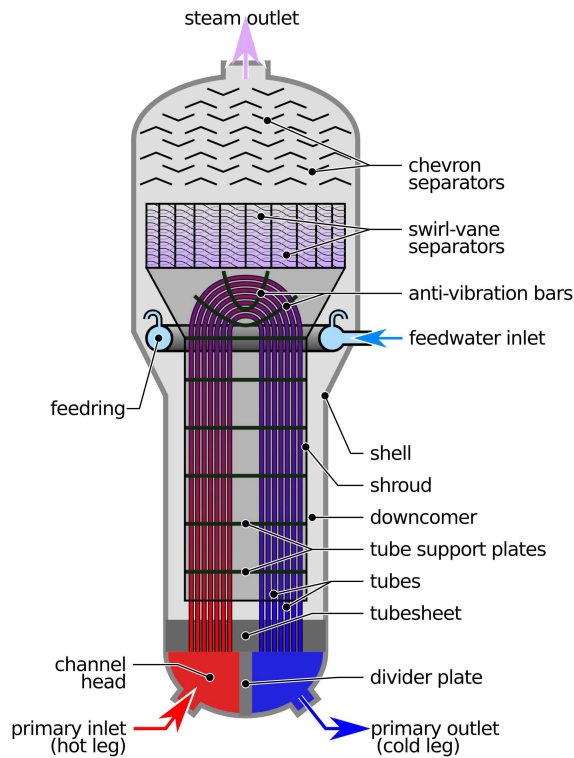
V parním generátoru se nachází vertikálně postavené U trubice, ve kterých proudí primární voda. Nátok i výtok primární vody je řešen ve spod, kde se nachází trubkovnice, ve které jsou U trubice uchyceny.

Sekundární voda do parního generátoru proudí skrze děrovaný prsteneček, který se nachází nad svazkem U trubic. Z něj voda protéká mezi vnějším pláštěm a opláštěním U trubic do spod, odkud začíná proudit zpět vzhůru kolem teplosměnných trubic. Nad svazkem U trubic se nacházejí odlučovače vlhkosti, které páru čistí na suchost blízkou 1.[4, 8, 13]

3.3 Hlavní cirkulační čerpadla (HCČ)

Hlavním úkolem HCČ je kompenzovat tlakovou ztrátu v primárním okruhu. V zásadě jde o jednostupňová radiální odstředivá čerpadla, která jsou uložena vertikálně. Počet čerpadel je stejný jako počet cirkulačních smyček primárního okruhu. Řízení čerpadel je zajištěno za pomoci frekvenční modulace napájecího proudu. [7]

Jako příklad HCČ uvádím čerpadlo typu GCN 317, které se nachází na cirkulačních smyčkách reaktoru VVER 440. Čerpadlo je poháněno asynchronním motorem s 1500 ot/min na 6 kV a 50 Hz. Kdy za provozu má výkon 1,4 MW. [13]



Obrázek 3.4: Schéma vertikálního PG
[14]

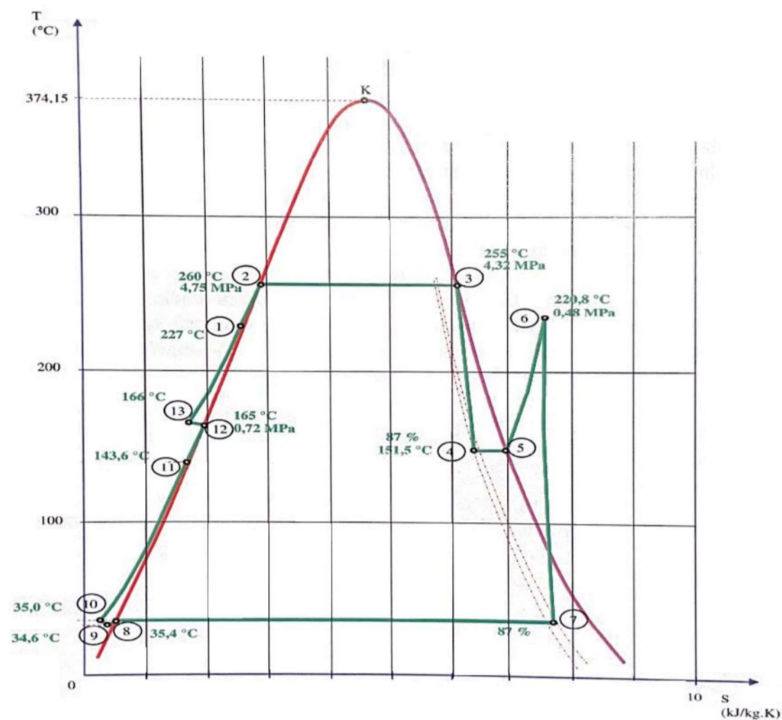
3.4 Kompenzace objemu

Kvůli změnám výkonu reaktoru je v I.O. nestálá střední teplota chladiva. Tato změna teploty způsobuje objemovou roztažnost chladiva, což se projevuje změnou tlaku v I.O. Tyto změny tlaku jsou pro provoz elektrárny nežádoucí, tudíž se k I.O. přidává zařízení, které tyto změny kompenzuje, aby se udržel stálý tlak v I.O. Nejpoužívanějším způsobem kompenzace objemu v I.O. je systém s přidanou nádrží, který se tlakuje za pomoci plynu.
[4]

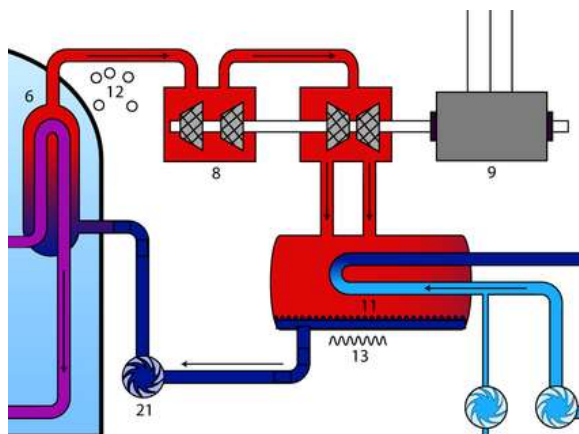
Kapitola 4

Sekundární okruh

Hlavním úkolem sekundárního okruhu (II.O.) je přeměna tepelné energie na energii elektrickou. Jaderná elektrárna využívá Rankin-Clausiova cyklu. Pára v něm proudí z PG do turbíny, kde předá svoji energii turbogenerátoru. Následně tato pára proudí do kondenzátoru, kde zkondenzuje a kondenzát je kondenzátním čerpadlem odveden do napájecí nádrže, kde je zbaven nežádoucích příměsí plynů. Následně je napájecím čerpadlem znovu odveden do parního generátoru, kde se z něj stane pára a cyklus se opakuje. [15, 4, 7]



Obrázek 4.1: T-S diagram Jaderné elektrárny Dukovany [17]



Obrázek 4.2: Sekundární okruh jaderné elektrárny [12]

4.1 Parní turbína

Parní turbína je rotační stroj, který slouží k přeměně tepelné energie na energii mechanickou. Jelikož jde o axiální stroj, je práce předávána kontinuálně. Specifikem parních turbín na jaderných elektrárnách je, že u nejrozšířenějších reaktorů (PWR, BWR,) vstupuje do turbíny právě sytá pára. Dále jsou turbíny v jaderných elektrárnách děleny na vysokotlaký a nízkotlaký díl. Kdy vysokotlaký díl operuje pouze v mokré páře, a to do sytosti cca. 0,87. Poté se pára přihřeje a jde na nízkotlaký díl, kde opět expanduje a koná práci.[4, 15]

4.2 Kondenzátor

Hlavním úkolem kondenzátoru je kondenzace vyexpandované páry za nízkotlakým dílem parní turbíny. Pára zde kondenzuje za velmi nízkého tlaku okolo 4 kPa. Jde o dělicí díl mezi sekundárním okruhem a okruhem terciálním. Tímto způsobem se z pracovního cyklu odvádí až dvě třetiny celkového tepla dodaného jaderným reaktorem. Kondenzát je následně odveden do napájecí nádrže.

Existuje více druhů kondenzátorů, ale v praxi se u jaderných elektráren používají převážně kondenzátory chlazené vodou. Pokud se však elektrárna nachází v oblasti s omezeným přístupem k vodě, dají se kondenzátory chladit i vzduchem. [7, 4, 15]

4.3 Napájecí nádrž

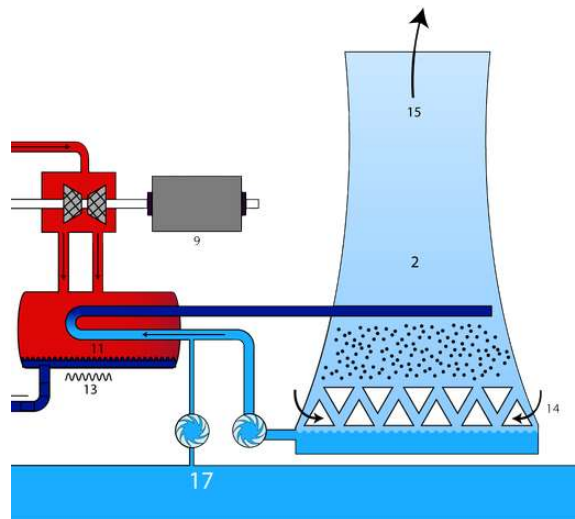
Napájecí nádrž má dva základní účely. První účel je, že slouží jako zásobárna napájecí vody, když by došlo k úniku, je schopna několik minut dodávat chladivo a tím chladit primární okruh. Druhým hlavním účelem je termické odplynění. Při tomto procesu se rozprašuje kondenzát do malých kapiček, kolem kterých proudí pára, tímto se zvýší teplota kondenzátu a sníží se obsah rozpuštěných plynů. [15, 4]

Kapitola 5

Terciální okruh

Terciální okruh slouží k odvodu tepla z kondenzátoru, pokud je chlazen vodou. Pokud se elektrárna nachází u moře nebo u řeky s dostatečným průtokem, můžeme chladit průtočně a vodu vracet zpět do řeky nebo moře. Pokud tento způsob není možný a chladíme vodou, můžeme využít chladicí věže, ve kterých dochází pouze k částečnému odparu vody. Tímto způsobem jsme schopni ušetřit i více jak 90% vody. [15, 7]

Důležitou součástí terciálního okruhu jaderné elektrárny jsou turbonapáječky. Jde o velká axiální jednostupňová čerpadla, která často mývají natáčecí lopatky. Například v JE Temelín je průtok terciálním okruhem $61\,920\text{ m}^3/\text{hod}$, a v chladicích věžích se odpaří $1440\text{ m}^3/\text{hod}$. [15]



Obrázek 5.1: Terciální okruh jaderné elektrárny [12]

Kapitola 6

Návrh PG

6.1 Volba koncepce

Základní parametry primárního a sekundárního okruhu vycházejí z reálných parametrů EDU a jejich VVER 440-213. Tyto parametry mám z provozního předpisu PG. [5]

Tabulka 6.1: Zadané hodnoty pro výpočet PG

	Značka	hodnota	jednotka
I. Okruh			
Teplota na vstupu do PG	t_{Ia}	298	[°C]
Teplota na výstupu z PG	t_{Ie}	268	[°C]
Tlak I.O.	p_I	12,2	[MPa]
II. Okruh			
Teplota napájecí vody	t_{IIa}	228	[°C]
Tlak II. O.	p_{II}	4,85	[MPa]
Požadovaný výkon	Q	468	[t/hod]

Koncepci volím horizontálního stylu, jelikož jde o návrh pro reaktory VVER 440, kde jsou PG horizontální. V systému bude zapojeno 6 PG. Následné vzorce a postup řešení vycházejí ze zdroje [8], pokud není uvedeno jinak. Hodnoty používám z mobilní aplikace parních tabulek. [1]

6.2 Termodynamické výpočty

Jako první spočítáme tepelný výkon PG.

$$P_{pg} = P_{eko} + P_{vyp}[W] \quad (6.1)$$

Kde P_{pg} je celkový tepelný výkon parogenerátoru, P_{eko} je výkon ekonomizéru a P_{vyp} je výkon výparníku. [8] Pro spočítání budeme potřebovat entalpie vody v I.O. a II.O. z parních tabulek.

P_{eko} spočítáme pomocí vztahu:

$$P_{eko} = (i_{II,eko} - i_{II,a}) \cdot Q_{mII}[W] \quad (6.2)$$

$$P_{eko} = (1145 - 981,3) \cdot 130 = 21,281[MW] \quad (6.3)$$

Tabulka 6.2: Hodnoty získané z parních tabulek

Entalpie vstupující vody II.O.	$i_{II,a}$	981,3	[kJ/kg]
Entalpie syté kapaliny II.O.	$i_{II,eko}$	1145	[kJ/kg]
Entalpie syté páry II.O.	$i_{II,e}$	2795,4	[kJ/kg]
Teplota vystupující páry	$t_{II,e}$	262	[°C]
Entalpie vstupující vody I.O.	$i_{I,a}$	1329,6	[kJ/kg]
Entalpie vystupující vody I.O.	$i_{I,e}$	1173,3	[kJ/kg]

P_{vyp} spočítáme pomocí vztahu:

$$P_{vyp} = (i_{II,e} - i_{II,eko}) \cdot Q_{mII} [W] \quad (6.4)$$

$$P_{vyp} = (2795,4 - 1145) \cdot 130 = 214,552 [MW] \quad (6.5)$$

Výsledný výkon PG je $P_{pg} = 235,833 [MW]$.

Z vypočteného výkonu jsme schopni vypočítat průtok primární vody Q_{mI} . K výpočtu je potřeba účinnost parního generátoru η_{pg} , kterou volím podle literatury $\eta_{pg} = 0,98$. Ke ztrátám dochází přestupem tepla z PG přes izolaci do okolí. [8] Průtok potřebujeme později k výpočtu průtočné plochy. Průtok spočteme ze vzorce:

$$Q_{mI} = \frac{P_{pg}}{(i_{Ia} - i_{Ie}) \cdot \eta_{pg}} = \frac{235,833 \cdot 10^6}{(1329,6 \cdot 10^3 - 1173,3 \cdot 10^3) \cdot 0,98} [kg/s] \quad (6.6)$$

Výsledný průtok primární vody je: $Q_{mI} = 1539,6 [kg/s]$

Dále musíme určit fyzikální vlastnosti vody v I.O. Tyto vlastnosti zjistíme z tabulek za pomoci tlaku I.O. a střední teploty v I.O. Střední teplotu spočteme ze vzorce:

$$t_{I,str} = \frac{t_{I,a} + t_{I,e}}{2} = \frac{298 + 268}{2} [°C] \quad (6.7)$$

Tabulka 6.3: Tabulka fyzikálních vlastností pro střední teplotu primární vody

	Značka	Hodnota	Jednotka
Střední teplota vody v I.O.	$t_{I,str}$	283	[°C]
Tlak v I.O.	p_I	12,2	[MPa]
Měrný objem	v	$1,3265 \cdot 10^{-3}$	$[m^3/kg]$
Hustota	ρ	753,966	$[kg/m^3]$
Dynamická viskozita	η	$9,423 \cdot 10^{-5}$	$[Pa \cdot s]$
Kynematická viskozita	ν	$1,2498 \cdot 10^{-7}$	$[m^2/s]$
Tepelná vodivost	λ	0,5828	$[W/m \cdot K]$
Prandlovo číslo	Pr	0,839893	[-]

Průtočnou plochu spočítáme z rovnice kontinuity. V té se nachází ještě proměnná rychlosti, kterou neznáme. Rychlost tudíž volím podle literatury, která doporučuje $v = 2,5$ až 5 m/s, proto volím rychlost $3,5$ m/s, která se nachází v prostředí tohoto intervalu.

$$S_t = \frac{Q_{m,I}}{w \cdot \rho} = \frac{1539,6}{3,5 \cdot 753,966} = 0,5834 [m^2] \quad (6.8)$$

Nyní zvolím rozměry a materiál teplosměnných trubiček. Dle literatury se průměr trubiček pohybuje mezi 16 až 22 mm, s tloušťkou stěny 1,2 - 1,6 mm. Já volím průměr trubiček 16 mm s tloušťkou stěny 1,5 mm, což jsou standardní rozměry trubek. Jako materiály se používají vysoce legované austenitické oceli bez obsahu kobaltu. Já volím jako materiál ocel Inconel 600.

Tabulka 6.4: Tabulka teplosměnných trubiček

	Značka	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr	d_{out}	16	[mm]
Vnitřní průměr	d_{in}	13	[mm]
Tloušťka stěny	t_s	1,5	[mm]

Nyní určíme počet teplosměnných trubiček. Nejdříve musíme určit průtočnou plochu jedné trubičky S_{tr} .

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot d_{in}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 13 \cdot 10^{-3}}{4} = 0,00013[m^2] \quad (6.9)$$

Počet teplosměnných trubiček určíme ze vzorce:

$$n = \frac{S_t}{S_{tr}} = \frac{0,5834}{0,00013} = 4395,65 \quad (6.10)$$

Jelikož jde o počet trubiček, zaokrouhlíme nahoru na celé číslo $n = 4396$. Toto je však pouze teoretická hodnota, ke které se přidává 10% navíc, aby v důsledku zanesení a zaslepení některých trubiček měl parní generátor dostatečný výkon.

$$n_r = n \cdot 1,1 = 3142 \cdot 1,1 = 4836 \quad (6.11)$$

Nyní chceme vypočítat teplosměnnou plochu parního generátoru. Začneme z rovnic pro prostup tepla. Nejprve určíme plochu výparníku.

$$P_{pg} = k \cdot \Delta t_{log} \cdot S_{pg} \quad (6.12)$$

Pro výpočet potřebujeme znát součinitele k . Ten se skládá ze součinitele přestupu tepla prouděním na straně I.O. α_I , součinitele prostupu tepla vedením λ , který je materiálovou konstantou trubiček, a součinitele přestupu tepla prouděním na straně II.O. α_{II} .

Součinitel α_{II} je funkcí plošné hodnoty tepelného toku q , který závisí na rozdílu teplot Δt a součiniteli prostupu tepla k . Podle vzorce:

$$q = k \cdot \Delta t \quad (6.13)$$

Tudíž musíme napřed určit tyto hodnoty.

Vypočteme rozdíl teploty na vstupu:

$$\Delta t_z = t_{I,a} - t_{II,e} = 298 - 262 = 36[^\circ C] \quad (6.14)$$

dále rozdíl na výstupu I.O. vody ze svazku:

$$\Delta t_k = t_{I,e} - t_{II,e} = 268 - 262 = 6[^\circ C] \quad (6.15)$$

dále otestujeme, jestli je potřeba výpočet plochy rozdělit na více paralelních výpočtů. Spočteme $\Delta t_z / \Delta t_k > 2$

$$\frac{t_z}{t_k} = \frac{36}{6} = 6 > 2 \quad (6.16)$$

Tabulka 6.5: Tabulka teplot pro výpočet středních logaritmičeských spádů jednotlivých úseků

$t_{I,a}$	298	[°C]
$t_{I,e}$	268	[°C]
$t_{II,e}$	262	[°C]
$t_{1/3}$	278	[°C]
$t_{2/3}$	288	[°C]

Následný výpočet rozdělím na tři části, které budou předávat stejný tepelný výkon.

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_z - \Delta t_k}{\ln \frac{\Delta t_z}{\Delta t_k}} [^{\circ}C] \quad (6.17)$$

kde za Δt_z dosadíme $t_{I,a} - t_{II,e}$ pro první část, $t_{2/3} - t_{II,e}$ pro druhou část a $t_{1/3} - t_{II,e}$ pro třetí část, za Δt_k dosadíme $t_{2/3} - t_{II,e}$ pro první část, $t_{1/3} - t_{II,e}$ pro druhou část a $t_{I,e} - t_{II,e}$ pro část třetí. Vyjde nám $\Delta t_l = 27,8 [^{\circ}C]$ a $\Delta t_2 = 12 [^{\circ}C]$. Nyní určíme plošné hustoty tepelných toků v první a druhé části q_1 , q_2 a q_3 . Kde součinitele k_1 , k_2 a k_3 volíme.

Tabulka 6.6: Tabulka středních logaritmičeských teplot pro výpočet teplosměné plochy

První úsek	hodnota	jednotka
t_z	36	[°C]
t_k	26	[°C]
t_{log1}	30,7	[°C]
Druhý úsek		
t_z	26	[°C]
t_k	16	[°C]
t_{log2}	20,6	[°C]
Třetí úsek		
t_z	16	[°C]
t_k	6	[°C]
t_{log2}	10,2	[°C]

$$q_1 = k_1 \cdot \Delta t_1 \quad (6.18)$$

$$q_2 = k_2 \cdot \Delta t_2 \quad (6.19)$$

$$q_3 = k_3 \cdot \Delta t_3 \quad (6.20)$$

Nyní si na příkladu prvního úseku ukážeme postup iterativního výpočtu koeficientu k . Jako první si zvolím plošný tepelný tok q . Pro první úsek nám vychází hodnota $q_{zvol} = 198000 W/m^2$. Tato hodnota je potřeba pro výpočet přestupu tepla na straně II.O., kde $\alpha_{II,1}$ se vypočítá ze vztahu:

$$\alpha_{II,1} = \frac{5,1146 \cdot P_{nas}^{0,18}}{1 - 0,045 \cdot P_{nas}} \quad (6.21)$$

kde P_{nas} je tlak nasycených par a dosazuje se v MPa. V našem případě se $P_{nas} = P_{II}$. Vyšlo nám, že $\alpha_{II,1} = 29712,9 W/m^2K$. Dalším krokem je zjistit koeficient přestupu tepla na straně I.O., který spočteme ze zvolených trubiček a rychlosti proudění. Zde jako první vypočteme Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{3,5 \cdot 0,013}{1,2498 \cdot 10^{-7}} = 364058 \quad (6.22)$$

[10] Re nám vyšlo větší než 2300, tudíž můžeme s jistotou prohlásit, že jde o plně rozvínuté turbulentní proudění. Následně vybereme rovnici pro výpočet Nusseltova čísla, která odpovídá našim podmínkám, já volím rovnici:

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} \cdot (Re - 10000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (6.23)$$

[10] kde f je koeficient tření získaný z rovnice:

$$f = (0,79 \ln(Re) - 1,64)^2 \quad (6.24)$$

[10] tyto vztahy platí pro nucené, turbulentní proudění v trubce za podmínek:

$$0,5 \leq Pr \leq 2000 \quad (6.25)$$

[10]

$$3000 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6 \quad (6.26)$$

[10] Teď jsme již schopni vypočítat koeficient $\alpha_{I,1}$ ze vztahu:

$$\alpha_{I,1} = \frac{\lambda \cdot Nu}{d_{in}} = 25254 [W/m^2 K] \quad (6.27)$$

[10]

Nyní nám již chybí pouze součinitel prostupu tepla pro samotnou trubku, ta je z materiálu Inconel 600, jehož λ při 283 °C je 18,6 W/m · K. [9]

Následně vypočteme součinitele prostupu tepla k_1 . K tomu budeme ještě potřebovat výpočtový průměr trubičky, který stanovíme následovně:

$$d = \frac{d_{in} + d_{out}}{2} = \frac{13 + 16}{2} = 14,5 mm \quad (6.28)$$

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{II,1}} \cdot \frac{d}{d_{out}} + \frac{d}{2\lambda} \cdot \ln\left(\frac{d_{out}}{d_{in}}\right) + \frac{1}{\alpha_{I,1}} \cdot \frac{d}{d_{in}}} \quad (6.29)$$

Součinitel k_1 následně dosadíme do rovnice

$$q_1 = k_1 \cdot \Delta t_1 \quad (6.30)$$

Nyní porovnáme q_{zvol} s q_1 z rovnice 6.30. Tímto způsobem iterujeme, dokud jejich rozdíl nebude pod 0,1%. Odchylku spočteme na základě následující rovnice:

$$odch = \left(\frac{q_{zvol} - q_1}{q_1}\right) \cdot 100 = \left(\frac{198000 - 197871}{197871,2667}\right) \cdot 100 = 0,065\% \quad (6.31)$$

Tímto způsobem jsme se dostali ke koeficientu $k_1 = 6439 W/m^2 \cdot K$.

Podle tohoto postupu jsme schopni vypočítat koeficienty k pro druhý a třetí úsek. Ty nám následně vyjdou:

Nyní se můžeme pustit do výpočtu koeficientu k_{eko} pro ekonomizér. Jako první si určím střední teplotu vody II.O., podle které určím fyzikální vlastnosti pro výpočet.

$$t_{II,str} = \frac{t_{II,a} + t_{II,a}}{2} = 245 [^\circ C] \quad (6.32)$$

Tabulka 6.7: Tabulka koeficientů k pro jednotlivé úseky výparníku

k_1	6 439	$W/m^2 \cdot K$
k_2	6 004	$W/m^2 \cdot K$
k_3	4 994	$W/m^2 \cdot K$

Tabulka 6.8: Tabulka fyzikálních vlastností pro střední teplotu napájecí vody

	Značka	hodnota	jednotka
Střední teplota vody v II.O.	$t_{II, str}$	245	$[^{\circ}C]$
Tlak v II.O.	p_{II}	4,85	$[MPa]$
Měrný objem	v	$1,2383 \cdot 10^{-3}$	$[m^3/kg]$
Hustota	ρ	807,54	$[kg/m^3]$
Dynamická viskozita	η	$1,0897 \cdot 10^{-4}$	$[Pa \cdot s]$
Kynematická viskozita	ν	$1,3494 \cdot 10^{-7}$	$[m^2/s]$
Tepelná vodivost	λ	0,5828	$[W/m \cdot K]$
Prandlovo číslo	Pr	0,836719	$[-]$

Pro výpočet koeficientu k budeme potřebovat koeficienty α_{in} , α_{out} a λ pro námi zvolený materiál trubiček. Začneme koeficientem α_{in} , který vypočítáme stejným způsobem jako u výparníku, tudíž vyjde stejně $\alpha_{in} = 25254 [W/m^2K]$. λ zůstane taky stejná jako u výparníku, jelikož se i materiál trubiček nezměnil. Posledním koeficientem, co nám chybí, je tudíž α_{out} , kterou vypočteme následovně. Jako první musíme zjistit Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{w \cdot d_{out}}{\nu} = 55875 \quad (6.33)$$

Můžeme prohlásit, že se jedná o plně rozvinuté turbulentní proudění. Následně musíme vhodně zvolit rovnici pro výpočet Nusseltova čísla.

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} \quad (6.34)$$

kde Pr_s je Prandlovo číslo na povrchu trubky a $Pr_s = 0,965953$. Po dosazení nám Nusseltovo číslo vyjde $Nu = 239,1$. [11]

Nyní spočteme koeficient α_{out} ze vzorce:

$$\alpha_{out} = \frac{\lambda \cdot Nu}{d_{out}} \quad (6.35)$$

Nyní jsme již schopni vypočíst koeficient k_{eko} .

$$k_{eko} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{in}} \cdot \frac{d}{d_{in}} + \frac{d}{2\lambda} \cdot \ln\left(\frac{d_{out}}{d_{in}}\right) + \frac{1}{\alpha_{out}} \cdot \frac{d}{d_{out}}} \quad (6.36)$$

kde d je stejný výpočtový průměr jako u výparníku. Koeficient $k_{eko} = 4370$. Poslední potřebnou věcí je střední logaritmická teplota $t_{log,eko}$, kterou spočteme následovně:

$$t_{log,eko} = \frac{\Delta t_z - \Delta t_k}{\ln \frac{\Delta t_z}{\Delta t_k}} \quad (6.37)$$

kde $\Delta t_z = 36$ a $\Delta t_z = 40$. Výsledná $t_{log,eko} = 37,96$.

Nyní jsme již schopni spočítat teplosměnnou plochu parogenerátoru a z ní následně střední délku trubiček.

$$S_{pg} = S_1 + S_2 + S_3 + S_{eko} = \frac{P_1}{k_1 \cdot t_{log1}} + \frac{P_2}{k_2 \cdot t_{log2}} + \frac{P_3}{k_3 \cdot t_{log3}} + \frac{P_{eko}}{k_{eko} \cdot t_{log,eko}} \quad (6.38)$$

Výsledná teplosměnná plocha parogenerátoru je $2472,6m^2$. Tato plocha je však pouze teoretická a v praxi se přidává 10% navíc, aby z důvodu zanášení měl PG dostatečný výkon. Tudíž jsme výslednou plochu parogenerátoru určili jako $S_{pg} \doteq 2700m^2$.

Posledním krokem je určit střední průměrnou délku teplosměněné trubky. Tu určíme následovným způsobem:

$$l = \frac{S_{pg}}{\pi \cdot d_{in} \cdot n} [m] \quad (6.39)$$

Střední průměrná délka trubky ve svazku vyšla na 13,67 m.

6.3 Návrh základních rozměrů a tvorba výkresu

Na základě tepelného výpočtu jsem věděl kolik a jak dlouhé by měli být teplosměněné trubičky. Návrh provádím podle skript Konstrukční cvičení [13] Jako první jsem navrhoval uspořádání utrubicek v rámci tělesa parogenerátoru, a následně výsledný průměr tělesa. Následně jsem narhl délku tělesa parního generátoru na základě střední délky teplosměněné trubky a rozměrů kolektorů primárního okruhu. Dalším úkolem bylo navrhnout počet a pozice trubek odvádějících páru do hlavního parního kolektoru. Hlavním pravidlo podle kterého jsem se řídil je, že by pára neměla proudit rychleji než 25 m/s. Výkresy jsem tvořil v programu Autodesk AutoCAD.

Tabulka 6.9: Rozložení trubiček v parogenerátoru

počet trubek v řadě	počet řad	počet trubek
18	1	18
22	1	22
26	1	26
28	1	28
32	1	32
34	2	68
36	1	36
38	1	38
40	1	40
42	1	42
44	1	44
46	2	92
48	1	48
50	2	100
52	2	104
54	2	108
56	2	112
58	2	116
60	2	120
62	2	124
64	3	192
66	3	198
68	46	3128
celkový počet trubek		4836

Kapitola 7

Závěr

V první části jsem se věnoval uvedení čtenáře do tématu, základním rozdělení jaderné elektrárny a různým typům jaderných reaktorů. Dále jsem zjednodušeně popsal základní součásti primárního a sekundárního okruhu a trochu více podrobněji parogenerátorům.

Druhým úkolem byl tepelný výpočet parogenerátoru, pro který jsem měl parametry pro blok VVER 440-213, co se nachází v jaderné elektrárně Dukovany. Z toho mi vyplynula jasná koncepce parního generátoru, který se dělí na ekonomizér a výparník, a nenachází se v něm žádný přehřívák. V rámci návrhu jsem určil počet teplosměných trubiček a jejich střední délku.

Na základě předchozích výpočtů jsem se následně navrhl základní rozměry a vytvořit výkres parního generátoru.

Literatura

- [1] Chemical Applications. *Steam Tables v 6.2*. 2025. URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=chemical.applications.steam.tables>.
- [2] World Nuclear Association. *Nuclear power reactors*. Přístup: 9.4.2025. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors>.
- [3] World Nuclear Association. *Plans For New Reactors Worldwide*. Přístup: 9.4.2025. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide>.
- [4] Josef Bečvář. *Jaderné elektrárny*. cze. 2., opr. vyd. Praha: SNTL, 1981.
- [5] Vojtěch Buda. *Provozní předpis, Parní generátor PG V213*. 2022.
- [6] ČEZa.s. *Jaderná elektrárna*. Přístup: 8.4.2025. URL: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k33.htm>.
- [7] František Dubšek. *Jaderná energetika*. cze. Vyd. 2., dopl. Vysoké učení technické v Brně. Učební texty vysokých škol. Brno: PC-DIR, 1997. ISBN: 80-214-0833-2.
- [8] Radko Hejzlar. *Stroje a zařízení jaderných elektráren. Díl 2*. cze. 3. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN: 80-01-03189-6.
- [9] Inc High Temp Metals. *INCONEL 600 TECHNICAL DATA*. Přístup: 16.4.2025. URL: <https://www.hightempmetals.com/techdata/hitempInconel600data.php>.
- [10] Frank P. Incropera a David P. DeWitt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 4th Edition. New York City, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [11] Kimberly Ramroop Krishpersad Manohar. „A Comparison of Correlations for Heat Transfer from Inclined Pipes“. In: *Internatinal Journal of Engineering* 4, Issue: 4 (), s. 268–278.
- [12] Steffen Kuntoff. *PWR plant Schematic*. Přístup: 8.4.2025; Upraveno. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nuclear_power_plant-pressurized_water_reactor-PWR.png.
- [13] Oldřich Matal. *Konstrukční cvičení (Vybrané komponenty jaderně energetických zařízení)*. cze. 1. vyd. Brno: VUT, 1988.
- [14] Mliu92. *PWR Steam Generator*. Přístup: 22.5.2025. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Generic_Nuclear_PWR_Steam_Generator.svg.
- [15] JE Temelín. *Sborník přednášek pro jadernou maturitu*. Přístup: 19.4.2025. 2014. URL: https://ivana.stdin.cz/_media/sbornikjm2014.pdf.

- [16] TNO. *Phyllis2 database*. Přístup: 8.4.2025. 2025. URL: <https://phyllis.nl/Biomass/View/3049>.
- [17] Jakub Zimmermann. „Návrh parogenerátoru jaderné elektrárny“. <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/148588>. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2023.

Seznam obrázků

2.1	Schéma hlavních okruhů jaderné elektrárny a) jednookruhová, b) dvouokruhová, c) tříokruhová R - reaktor, PG - parogenerátor, Č - cirkulační čerpadlo, S - separátor páry, PT - parní turbína, G - generátor, K - kondenzátor	4
3.1	Schéma primárního okruhu VVER 1 - kontejnment, 2 - aktivní zóna, 3 - jaderný reaktor, 4 - regulační tyče, 5 - kompenzátor oběhu, 6 - parogenerátor, 7 - hlavní cirkulační čerpadlo . . .	5
3.2	P-T diagram parogenerátoru s primárním teplotním nosičem tlakovou vodou vy- rábějícím sytou páru	9
3.3	Schéma horizontálního parogenerátoru VVER	10
3.4	Schéma vertikálního PG	11
4.1	T-S diagram Jaderné elektrárny Dukovany	12
4.2	Sekundární okruh jaderné elektrárny	13
5.1	Terciální okruh jaderné elektrárny	14