



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

# NÁVRH VÝMĚNÍKU TEPLA V JADERNÉ ELEKTRárnĚ

DESIGN OF A HEAT EXCHANGER IN A NUCLEAR POWER PLANT

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Kocanda

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Milčák

BRNO 2022

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Tomáš Kocanda**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Energetika, procesy a životní prostředí  
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:

### Návrh 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 úloha ohříváků napájecí vody v tepelném schématu JE,
- bilanční výpočet výměníků tepla v tepelných schématech jaderné elektrárny,
- tepelný výpočet výměníku tepla.

#### 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**

Tato bakalářská práce se zaměřuje na návrh výměníku tepla v jaderné elektrárně, konkrétněji na nízkotlaký ohřívák 2. Úvod bakalářské práce se zabývá představením jaderné energetiky a jaderných elektráren. V dalších kapitolách je popsána nízkotlaká regenerace a nízkotlaké ohříváky. V poslední části práce je proveden výpočet nízkotlakého ohříváku 2 ze zadaných hodnot a hodnot odečtených z celkového tepelného schématu sekundárního okruhu Jaderné elektrárny Dukovany.

### **Klíčová slova**

Jaderná energetika, jaderná elektrárna, nízkotlaká regenerace, nízkotlaký ohřívák

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis focuses on the design of heat exchange in nuclear power plant, more specifically on low-pressure heater 2. The introduction of bachelor's thesis deals with the introduction of nuclear energy and nuclear power plants. The following chapters describe low-pressure regeneration as well as low-pressure heater. In the last part of the work, the heater is calculated from the entered values and values subtracted from the overall thermal scheme of the secondary circuit of the Dukovany nuclear power plant.

### **Key words**

Nuclear energy, nuclear powerplant, low-pressure regeneration, low-pressure heater

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KOCANDA, Tomáš. *Návrh výměníku tepla v jaderné elektrárně* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139870>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Milčák.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem výpočetní práci na téma **Návrh výměníku tepla v jaderné elektrárně** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

-----  
Datum

-----  
*Jméno a příjmení*

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Pavlu Milčákovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

**OBSAH**

ÚVOD .....	10
1 Úvod do jaderné energetiky .....	11
1.1 Historie jaderné energetiky a její budoucnost .....	11
1.2 Jaderná elektrárna .....	12
1.3 Ve světě .....	13
1.4 V České republice .....	14
1.5 Jaderná elektrárna Temelín .....	15
2 Jaderná elektrárna Dukovany .....	17
2.1 Primární okruh (I.O.) .....	18
2.2 Sekundární okruh (II.O) .....	21
2.2.1 Tepelné schéma sekundárního okruhu .....	22
3 Nízkotlaká regenerace .....	24
3.1 Účel systému .....	24
3.2 Zařízení systému a jeho základní části .....	24
3.3 Popis funkce .....	24
3.4 Nízkotlaký ohřívák 2 (NTO2) .....	25
4 Výpočet nízkotlakého ohříváku 2 (NTO2) .....	27
4.1 Zadání .....	27
4.2 Tepelná bilance výměníku a stanovení průtoku topné páry a kondenzátu .....	28
4.3 Logaritmičtý teplotní spád: .....	28
4.4 Stanovení fyzikálních vlastností pro střední teploty médií (voda) .....	29
4.5 Stanovení součinitele přestupu tepla $\alpha_C$ .....	30
4.6 Stanovení součinitele přestupu tepla $\alpha_H$ .....	31
4.7 Stanovení součinitele prostupu tepla $k$ .....	31
4.8 Dopočtení velikosti teplosměnné plochy .....	32
ZÁVĚR .....	33
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	34



SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	36
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	39
SEZNAM TABULEK .....	40

## **ÚVOD**

Jaderné elektrárny patří v dnešní době bez pochyby k nejvýznamnějším zdrojům elektrické energie. K tomuto faktu přispívá to, že jaderná elektrárna takřka nezatěžuje ovzduší. I z tohoto důvodu se neustále plánují další rozšíření a nové stavby. Největším problémem pro tyto plány jsou však velké počáteční investice na výstavbu spojené s velkým důrazem na zabezpečení objektu a technickou bezporuchovost.

V první části práce se stručně zaměřím na jadernou energetiku současnosti a budoucnosti. Dále přiblížím princip funkce jaderné elektrárny a představím jaderné elektrárny provozované u nás, kdy podrobněji popíši Jadernou elektrárnu Dukovany a její sekundární okruh. Jedním z hlavních cílů méjí bakalářské práce je popis a princip nízkotlaké regenerace probíhající v sekundárním okruhu Jaderné elektrárny Dukovany. Nízkotlaká regenerace je systém zařízení, které mají za úkol zvýšení tepelné účinnosti cyklu tím, že ohřívají základní kondenzát čerpaný do tepelné úpravy vody za pomoci páry z odběrů parní turbíny.

V poslední části bakalářské práce provedu výpočet nízkotlakého ohříváku 2 z Jaderné elektrárny Dukovany, kdy budu vycházet ze zadaných hodnot a tepelného schématu sekundárního okruhu.

## **1 Úvod do jaderné energetiky**

Jaderná energetika je sektor zabývající se hlavně výrobou energie. Získávanou energii nazýváme jaderná, která je uložena v jádře nebo jádru atomu. Atomy jsou malé jednotky tvořící veškerou hmotu ve vesmíru a energie je to, co pomáhá udržet jádro pohromadě. Jaderná energie musí být nejprve uvolněna z atomu, aby mohla být použita k výrobě elektřiny. K uvolnění dochází za pomoci jaderného štěpení.

Jaderný reaktor nebo elektrárna jsou řada strojů umožňující jaderné štěpení za účelem výroby elektřiny. Jako palivo se používá obohacený uran, kdy je v jaderném reaktoru nucen se rozpadat. Důsledkem štěpení je vznik řetězové reakce, která vede ke vzniku energie v podobě tepla. Tepelná energie se poté dále přetváří na další typy energií.

Jak již bylo zmíněno, nejrozšířenějším jaderným palivem je uran. Důvodem vysoké míry použití je jeho poměrně snadné oddělování. Výskyt uranu je takřka po celém světě. V jaderných elektrárnách se používá vzácný uran 235, který tvoří méně než 1 % uranu na světě.[13]

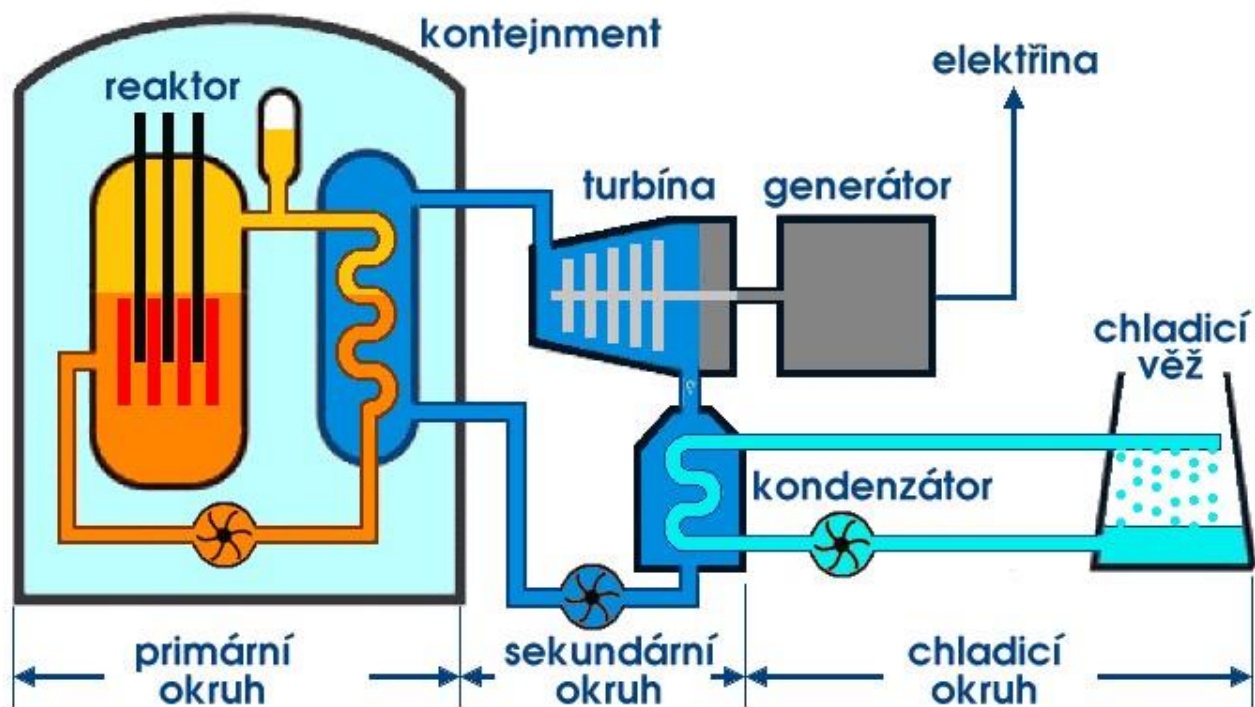
### **1.1 Historie jaderné energetiky a její budoucnost**

Radioaktivita jako taková byla objevena Henrim Becquerelem roku 1896. Dalšímu výzkumu radioaktivity se aktivně věnovala Marie Curie-Sklodovská, která společně se svým manželem Pierrem objevila nové radioaktivní prvky polonium a rádium. Dalším velkým krokem pro jadernou energetiku bylo rozštěpení jádra uranu skupinou německých vědců Meitnerovou, Hahnem a Strassmannem. V roce 1942 tým Enrica Fermiho postavil první jaderný reaktor Chicago Pile-1. V roce 1951 následovalo první získání elektrické energie za pomoci jaderného reaktoru. [11]

Budoucnost jaderné energetiky se v současnosti spojuje s jadernou fúzí nebo spojováním atomů dohromady. Například i slunce neustále prochází jadernou fúzí, když se atomy vodíku slučují za vzniku hélia. Dá se tedy říci, že jaderná fúze umožňuje život na Zemi. V současnosti je to však spíše otázka výzkumů a není tedy jisté, jestli někdy bude možno využívat jaderné fúze k výrobě elektrické energie. [13]

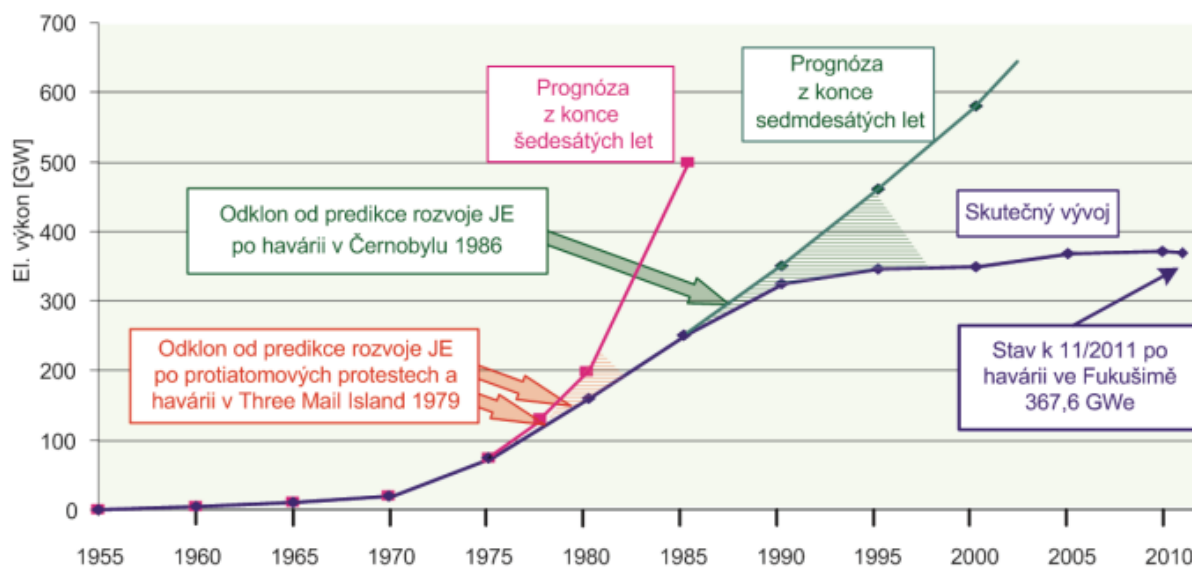
## 1.2 Jaderná elektrárna

Jaderné elektrárny jsou zařízení pro výrobu elektrické energie založené na štěpné reakci. Jsou to v podstatě uhelné elektrárny, které se liší teoreticky pouze v primárním okruhu, kdy se tepelná energie získává štěpením těžkých jader v jaderných reaktorech, a ne v kotlech, jak je tomu u elektráren uhelných. Následná získaná energie je odváděna z reaktoru k tepelnému výměníku (parogenerátoru), kde se tvoří pára pro pohon parní turbíny. Ta je spojena s elektrickým generátorem, který vyrábí elektrickou energii. Jde tedy vidět, že v jaderných elektrárnách dochází k několikanásobné přeměně energie, kdy se nejprve v reaktoru mění z jaderné na energii tepelnou, poté se transformuje v parní turbíně z tepelné na mechanickou, a nakonec v generátoru na energii elektrickou. Každá z přeměň má určitou účinnost, kdy výsledná účinnost v jaderné elektrárně je 33-35 %. [12]



Obrázek 1 Schéma jaderné elektrárny [5]

Jaderné elektrárny nebo spíše jaderná energie je relativně nový zdroj elektřiny, u kterého došlo k významnému rozvoji v posledních 70 letech. Mnoho lidí k ní však nemá dostatečnou důvěru. Velkou roli v nedůvěře k jaderným zdrojům hráli havárie jaderných elektráren Černobyl, Three Mile Island a Fukušima. Lidé mají strach, že se to může v budoucnu zopakovat a také se obávají zneužití jádra k výrobě zbraní. [1]



Obrázek 2 Graf predikovaného vývoje jaderných elektráren proti skutečnosti [1]

### 1.3 Ve světě

Ve světě je aktuálně v provozu 445 jaderných reaktorů. V Evropské Unii jaderné elektrárny tvoří zhruba jednu třetinu vyrobené elektřiny. Nejvíce jaderných reaktorů se nachází v USA (93), ve Francii (56) a Číně (55). Nejpoužívanějším reaktorem v zemích EU je tlakovodní reaktor PWR.[5][15] EU je také světadílem s největším zastoupením jaderných reaktorů. Podle podílu jaderné energie na výrobě elektřiny v daném státu vede Francie (okolo 75 %). V České republice, podle dostupných údajů z minulého roku, je to zhruba 37 %. Ve světě se v dnešní době staví 50 jaderných bloků, kdy je většina v Asii.

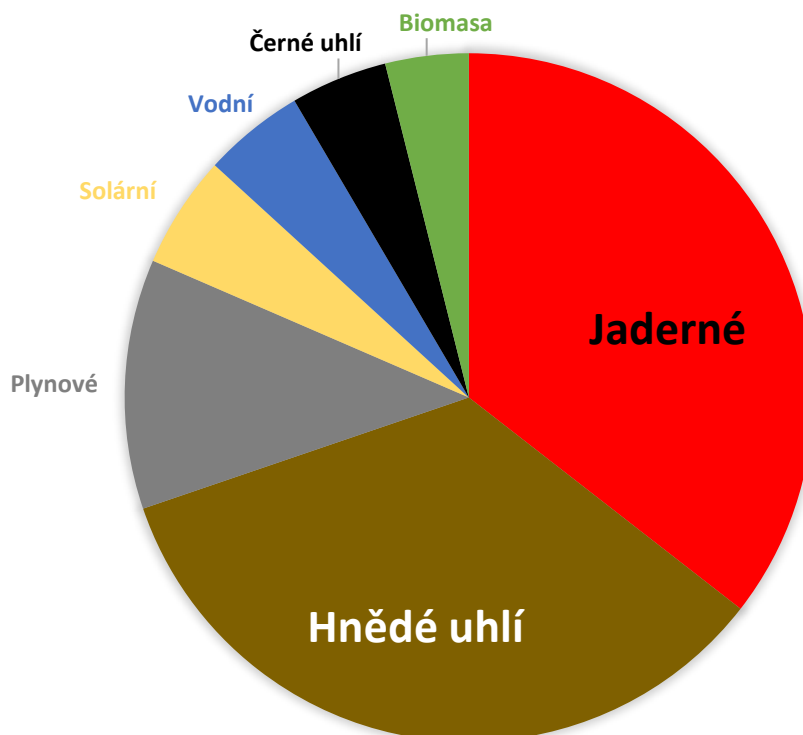
Mnoho zemí také po havárii ve Fukušimě přistoupilo k odstavení jaderných elektráren. Německo již v minulém roce odstavilo 3 jaderné elektrárny a další 3 plánuje odstavit během roku 2022. Své jaderné zdroje začalo postupně odpojovat také Švýcarsko. Naopak například Belgie prodloužila provoz jaderných elektráren až do roku 2025. [18]

## 1.4 V České republice

V České republice jsou v provozu 2 jaderné elektrárny: Dukovany a Temelín. Obě tyto elektrárny spadají pod společnost ČEZ. [8] Minulý rok jaderné elektrárny vyrobily 36,6 % z celkového podílu elektrické energie, což je zařadilo na první místo ve výrobě. [5]

Jelikož jsou jaderné elektrárny tak významným zdrojem elektrické energie, plánují se na našem území další projekty pro rozšíření. Tomuto faktu pomohlo, že jaderná energie byla zařazena do tzv. zelené taxonomie, když byla označena za neškodlivý zdroj a naopak za zdroj napomáhající k omezování klimatických změn. Největší naděje do budoucna se nyní vkládají do malých modulárních reaktorů, které mají elektrický výkon do 300 MWe. Česká republika se již delší dobu snaží podílet na vývoji těchto reaktorů a napomáhat jejich výzkumu. [2] Dalším významným tématem v jaderné energetice je rozšíření Dukovanské elektrárny, které je však nyní v procesu schvalování. Blok by měl být hotov kolem roku 2036. [17]

### PODÍL ZDROJŮ NA VÝROBĚ ELEKTŘINY V ČR 2021



Obrázek 3 Podíl zdrojů na výrobě elektřiny [19]



<b>Základní údaje o jaderné elektrárně Temelín</b>	
Typ reaktoru	Heterogenní, tlakovodní energetický reaktor VVER 1000 typ V 320
Nominální výkon reaktoru	3000 MWt
Palivo	Uran 235
Instalované bloky	2
Instalovaný výkon	2 × 1125 MWe
Roční výroba el. energie	15,86 TWh
Plánovaná životnost	30 let (prodloužení až na 60)
Náklady na výstavbu	98 mld. Kč
Provozovatel	ČEZ

Tabulka 1 Základní údaje o JE Temelín [7][8]

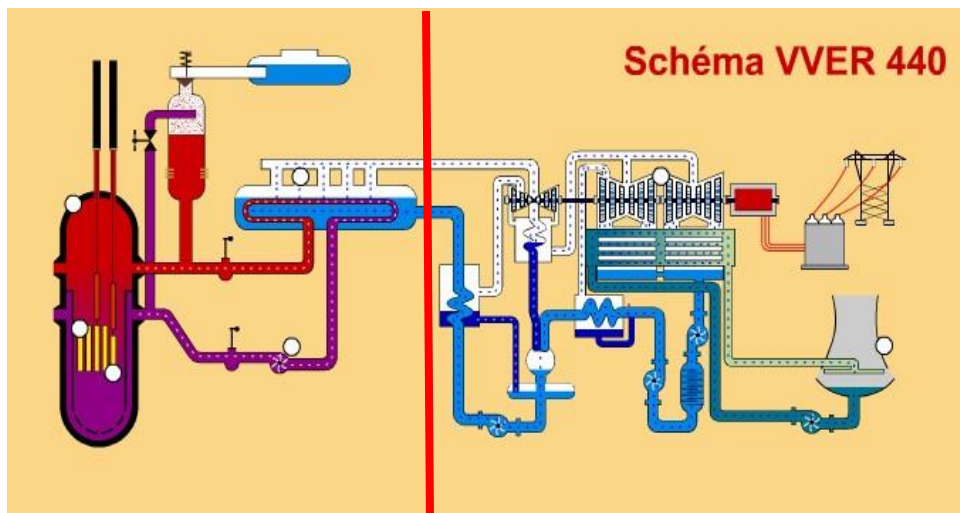


Obrázek 5 Letecká fotografie Jaderné elektrárny Temelín [3]



## 2 Jaderná elektrárna Dukovany

Jaderná elektrárna Dukovany se nachází asi 30 km od Třebíče nedaleko obce Dukovany. V elektrárně jsou 4 tlakovodní reaktory typu VVER 440 model V-213. Jednotlivé bloky mají elektrický výkon 510 MW. Ročně Dukovany vyrobí zhruba 14 TWh, což činí okolo 20 % z celkové spotřeby elektřiny v ČR. Bloky elektrárny byly zprovozněny mezi lety 1985 až 1988. [6]



Obrázek 6 Schéma jaderné elektrárny Dukovany [14]

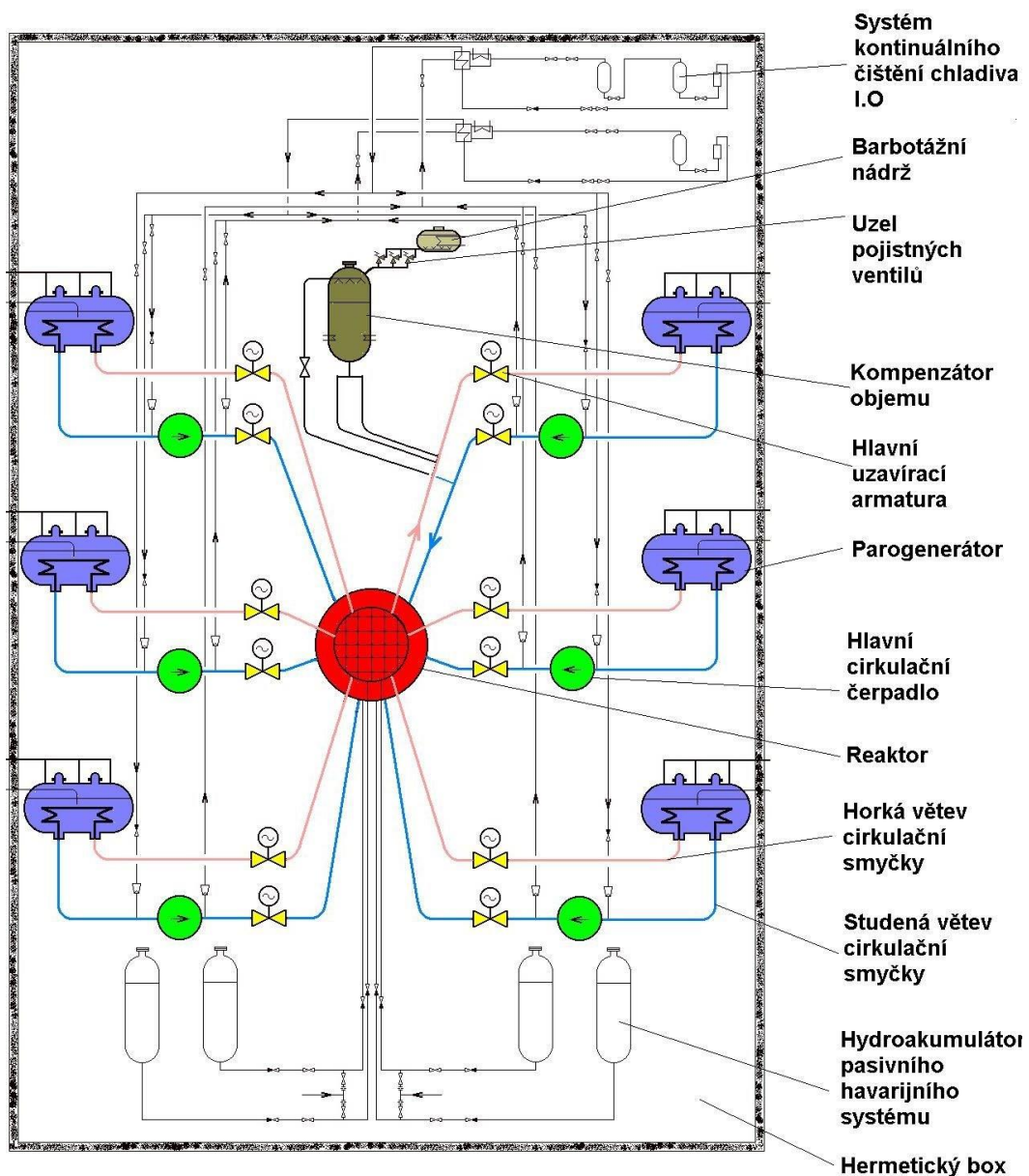


Obrázek 7 Letecká fotografie Jaderné elektrárny Dukovany [4]

## 2.1 Primární okruh (I.O.)

V primární části dochází k přeměně jaderné energie na energii tepelnou. Následně zde také probíhá přenos vyrobené energie na sekundární část. Důležitou součástí primárního okruhu jsou pomocné systémy, které zajišťují společně s havarijními systémy bezpečnost a bezproblémový provoz okruhu.

Primární okruh se skládá z následujících základních zařízení a systémů, jako jsou: reaktor, hlavní cirkulační potrubí, hlavní uzavírací armatury (HUA), hlavní cirkulační čerpadla (HCČ), parogenerátory (PG). [14]



Obrázek 8 Uspořádání základních zařízení a systému v primárním okruhu [14]

V Dukovanském primárním okruhu se nachází tlakovodní reaktor typu VVER 440 V-213, který je tvořen hermeticky utěsněnou ocelovou nádobou. Tato nádoba musí odolat vysokému tlaku chladiva. Aktivní zóna reaktoru je složena z 312 palivových a 37 regulačních kazet. Palivová kazeta jsou vlastně trubičky, ve kterých jsou hermeticky uzavřeny palivové keramické tablety vylisované z oxidu uraničitého. V těchto tabletách je obsažen štěpný izotop uranu s obohacením do 5 %  $^{235}\text{U}$ . Regulační kazety jsou v reaktorech použity za účelem stabilizace výkonu na zadané hodnotě kompenzací krátkodobých změn reaktivity, přechod z jedné výkonové hladiny na druhou a rychlé odstavení reaktoru. Kazety se skládají z dolní palivové části a horní absorpční části. Palivová část je složena z palivových článků, které produkují neutrony, absorpční část je složena z oceli s přidavkem bóru, který naopak neutrony pohlcuje. [14]



*Obrázek 9 Jaderný reaktor [14]*

Teploto vytvořené v reaktoru štěpením uranu ohřívá palivový článek a přestupuje přes jeho pokrytí do chladiva. Teplota chladiva na vstupu do aktivní zóny je zhruba  $267\text{ }^{\circ}\text{C}$  a v aktivní zóně dochází k jeho ohřátí o dalších  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  na  $297\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Chladivo je chemicky upravená lehká voda, která slouží zároveň i jako moderátor a obsahuje kyselinu boritou. [14]

Parogenerátor slouží jako tepelný výměník, který je tvořen válcovým pláštěm a teplosměnnou plochou složenou z trubek, která je umístěna uvnitř pláště. Teplosměnnou plochu tvoří více jak 5500 trubek, které jsou spojeny s vstupním a výstupním kolektorem primárního chladiva. Do horní části parogenerátoru je přiveden parovod. Tepelná energie získaná štěpením uranu je chladivem předána pracovní látce sekundárního okruhu přestupem přes stěny trubek teplosměnné plochy. Parogenerátor tedy slouží k přenosu tepla z primárního okruhu na sekundární a oddělení primární radioaktivní části od sekundární neradioaktivní části. Největší nároky jsou kladeny na jeho těsnost. [14]



*Obrázek 10 Parogenerátor [14]*

## **2.2 Sekundární okruh (II.O)**

V sekundární části jaderné elektrárny se nachází velká spousta zařízení a systémů sloužících pro řadu úkolů. Z pravidla se sekundární část rozděluje do dvou skupin. První skupinou uvažujeme taková zařízení, která jsou zapojena do transformace tepelné energie na mechanickou a následně i elektrickou. Tato skupina má také za úkol zabezpečit vysokou účinnost přeměny energií a dále dochlazování bloku při odstávce. Druhou skupinu bereme jako zařízení, která jsou umístěna v dalších objektech a mají za úkol zabezpečení dodávky určitých médií a zpracování vedlejších výstupů z produkce. [14]



*Obrázek 11 Strojovna jaderné elektrárny Dukovany [14]*

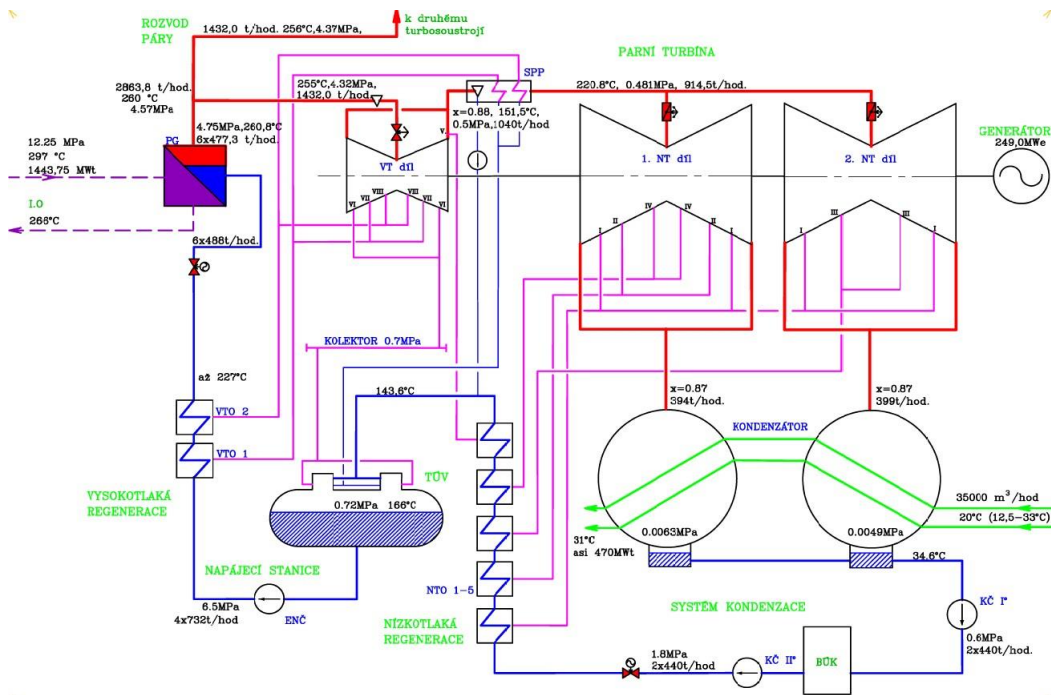
### 2.2.1 Tepelné schéma sekundárního okruhu

Bloky VVER 440 MW v Jaderné elektrárně Dukovany jsou postaveny tak, že každý z nich je zpracováván v sekundárním okruhu pomocí dvou turbosoustrojí. Pokud je provoz bloku vykonáván na 100 %, tak se do sekundárního okruhu předává 1444 MW tepelné energie. Díky tomuto množství lze v parogenerátoru vyrobit zhruba 477 tun syté páry za hodinu. Teplota této páry dosahuje 260 °C a tlaku 4,7MPa. Pára je k turbosoustrojí dopravována dvojicí parovodů.

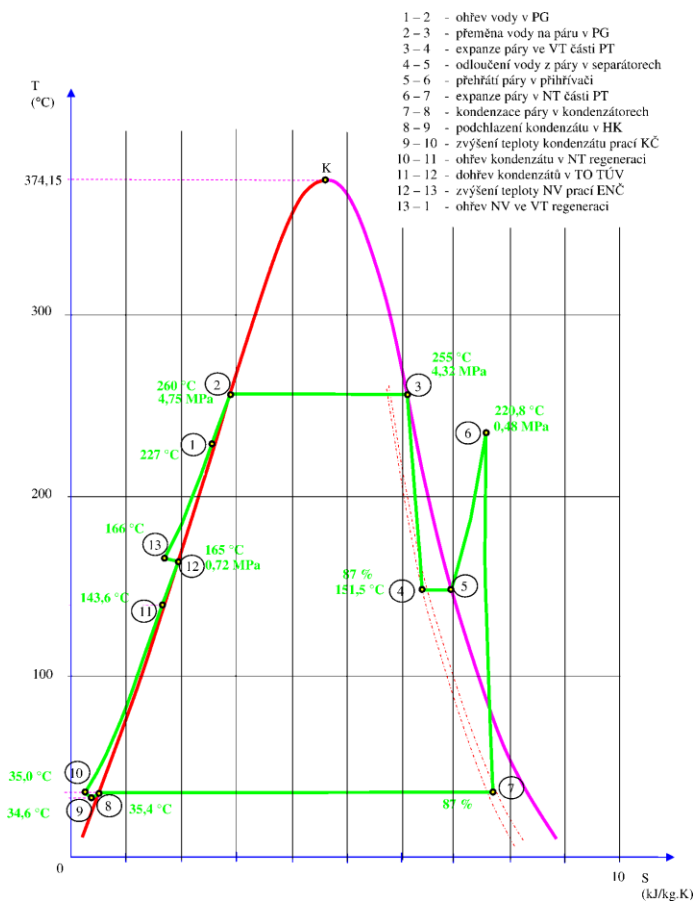
V Jaderné elektrárně Dukovany jsou používány turbíny od společnosti ŠKODA typu K 220-44, které jsou třítělesové. Skládají se z jednoho vysokotlakého dílu (VT) a dvou nízkotlakých dílů (NT). Vysokotlaký díl je tzv. dvou Proudý, což v podstatě znamená to, že pracovní pára do něj vstupuje čtyřmi přívody a vystupuje na konci vždy jedním hrdlem. U VT dílu je v každém proudě šest pracovních stupňů, které mají za úkol zpracovávat tepelný spád. Stupeň parní turbíny je dvojice lopatek kol, které jsou složeny z jednoho rozváděcího kola a jednoho oběžného kola. Nízkotlaký díl je stejně jako VT dvou Proudý. V každém proudě NT dílu je pět pracovních stupňů. [14]



Obrázek 12 Parní turbína Škoda typu K220-44 [14]



Obrázek 14 Tepelné schéma sekundárního okruhu [14]



Obrázek 13 T-s diagram R-C cyklu [14]

### **3 Nízkotlaká regenerace**

#### **3.1 Účel systému**

Účelem nízkotlaké regenerace je ohřívání základního kondenzátu, který je čerpán do tepelné úpravy vody za pomoci páry z odběrů parní turbíny na požadovanou teplotu (okolo 130 °C). U nízkotlaké regenerace využíváme také pomocných zařízení, které mají zvyšovat účinnost předávání tepla z kondenzátu z topné páry do hlavního kondenzátu a zabránit poškozování zařízení při dopravě kondenzátu. Díky tomuto způsobu ohřevu dosahujeme navýšení účinnosti cyklu. [15]

#### **3.2 Zařízení systému a jeho základní části**

Nízkotlaká regenerace v Jaderné elektrárně Dukovany je složena z nízkotlakých ohříváků, podchlazovačů kondenzátu z topné páry, expandérů a podávacích čerpadel kondenzátu. [15]

#### **3.3 Popis funkce**

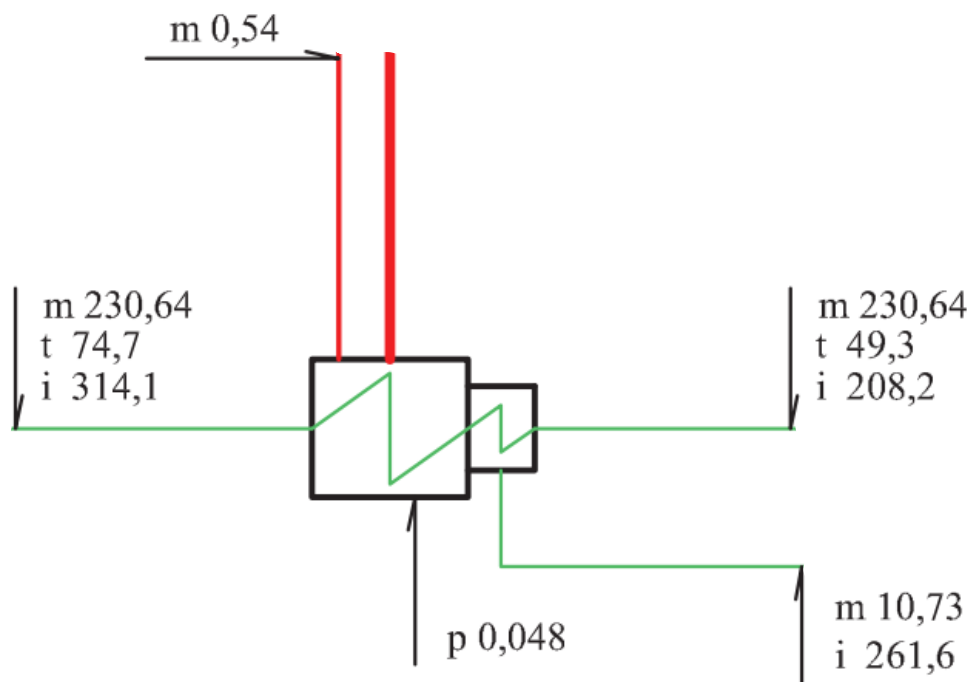
Nejprve se kondenzát z kondenzátoru dostane do sběrných vakuových nádob. Z nich následně pokračuje za pomoci kondenzačního čerpadla přes blokovou úpravnu vody až na sání druhého kondenzačního čerpadla. Odtud je následně dopravován přes nízkotlakou regeneraci dále. Kondenzát celkově projde přes 5 nízkotlakých ohříváků.

Nízkotlaké ohříváky bývají nejčastěji zapojovány sériově, avšak bez příslušných úprav by mohlo docházet ke zvýšení poruchovosti a celkovému klesání spolehlivosti systému. Na nízkotlaké regeneraci závisí celý blok, jelikož při jeho odstavení by se nedal provozovat. Kvůli tomuto je nízkotlaká regenerace udělána jako 3 samostatné skupiny, které na sobě nikterak nezávisí. Při nastání poruchy v některé skupině, je ihned odstavena a pomocí uzavření armatur a ventilů je kondenzát přiveden do další skupiny. Pro provoz bloku je zapotřebí mít v provozu alespoň 2 skupiny nízkotlakých ohříváků. První skupiny tvoří NTO1 a NTO2, druhou NTO3 a NTO4, třetí NTO5. U nízkotlakých ohříváků dochází k ohřevu z neregulovaných odběrů parní turbíny. Kondenzát z topné páry, který vzniká v ohřívácích předáním tepelné energie z páry do kondenzátu, je používám k predehřívání hlavního kondenzátu před vstupem do NTO. Díky tomu dochází ke zvyšování účinnosti celého oběhu. [15]



### 3.4 Nízkotlaký ohřívák 2 (NTO2)

Tento nízkotlaký ohřívák ohřívá kondenzát na teplotu zhruba 76 °C pomocí odběru páry ze 2. odběru parní turbíny a ucpávkovou parou odsávanou z vnitřní komory labyrintové ucpávky vysokotlakého dílu parní turbíny. U NTO2 vstupuje odběrová topná pára do mezi trubkového parního prostoru vstupním potrubím, které je připojeno na spodní klenuté dno. Trubkovým svazkem ohříváku proudí hlavní kondenzát, který je přivedený z NTO1. Nejprve je část kondenzátu odvedena před clonou do podchlazovače 2, kde dojde k jeho přehřátí a následně je zaveden zpět do hlavní trasy za clonu. Po průchodu trubkovým svazkem odchází z NTO2 a vstupuje do NTO3. [15]



Obrázek 15 NTO2 z celkového tepelného schématu [15]

<b>Nízkotlaký ohřívák NTO2</b>	
<b>TECHNICKÝ POPIS ZAŘÍZENÍ</b>	
Umístění	Strojovna 0 m (+7,5 m)
Teplosměnná plocha	680 m <sup>2</sup>
Hmotnost (prázdný)	20345 kg
Nejvyšší hmotnost včetně nádrže	41795 kg
Vnější rozměry	Ø2100/1900 mm, výška 8145 mm
Počet tahů na straně topné odběrové páry	1
Počet tahů na straně hlavního kondenzátu	4
<b>MEZITRUBKOVÝ PROSTOR</b>	
Objem	16,1 m <sup>3</sup>
Pracovní tlak (abs.)	2,9 – 394 kPa
Maximální provozní teplota	110 °C
Médium	Pára – kondenzát topné páry
Materiál	Svarek
<b>TRUBKOVÝ PROSTOR</b>	
Objem	5,35 m <sup>3</sup>
Maximální pracovní tlak (abs.)	3,04 MPa
Maximální pracovní teplota	105 °C
Médium	Hlavní kondenzát
Materiál	17 248.4
Rozměr trubek	Ø16 × 1,5 mm
Délka vlásenky	7250 mm
Počet trubek	1860

Tabulka 2 Parametry NTO2 [15]

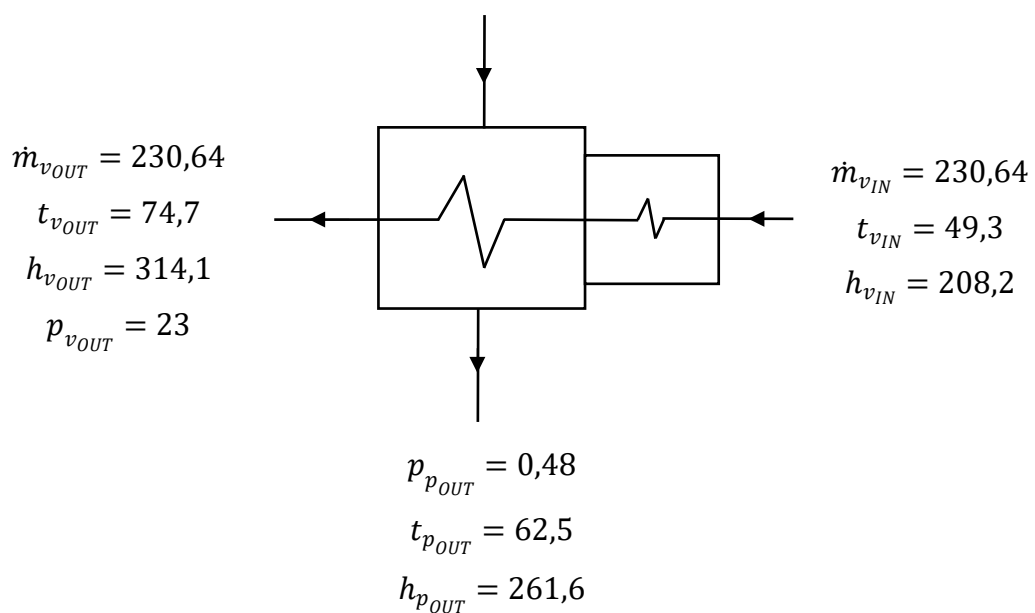
## 4 Výpočet nízkotlakého ohříváku 2 (NTO2)

### 4.1 Zadání

$$p_{p_{IN}} = 0,49$$

$$t_{p_{IN}} = 81,1$$

$$h_{p_{IN}} = 2644,95$$



$$\dot{m} [kg/s]$$

$$t [^{\circ}C]$$

$$p [bar]$$

$$h [kJ/kg]$$

Rozměr trubek:  $\varnothing 16 \times 1,5$  mm

Tepelná vodivost materiálu trubek:  $\lambda_{TR} = 15 W/m \cdot K$

(1)

## 4.2 Tepelná bilance výměníku a stanovení průtoku topné páry a kondenzátu

Výkon pro ohřátí topné vody na požadovanou teplotu:

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_v \cdot (h_{v_{OUT}} - h_{v_{IN}}) = 230,64 \cdot (314,10 - 208,20) = 24424,78 \text{ kW} \quad (2)$$

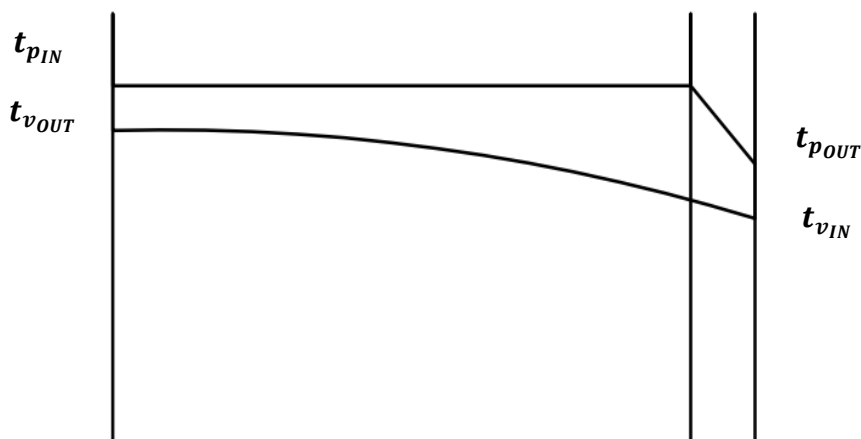
Dopočet hmotnostního průtoku páry z podmínky  $\dot{m}_p = \dot{m}_v$ :

$$\dot{m}_p = \dot{m}_v = \frac{\dot{Q}_v}{(h_{v_{IN}} - h_{p_{OUT}})} = \frac{24424,78}{(2644,95 - 261,60)} = 10,25 \text{ kg/s} \quad (3)$$

Podmínka  $\dot{Q}_p \geq \dot{Q}_v$ : splněna

$$\dot{Q}_p = \dot{m}_p \cdot (h_{p_{IN}} - h_{p_{OUT}}) = 10,25 \cdot (2644,95 - 261,60) = 24429,34 \text{ kW} \quad (4)$$

## 4.3 Logaritmický teplotní spád:



Rozdíly teplot a následný dopočet logaritmického teplotního spádu:

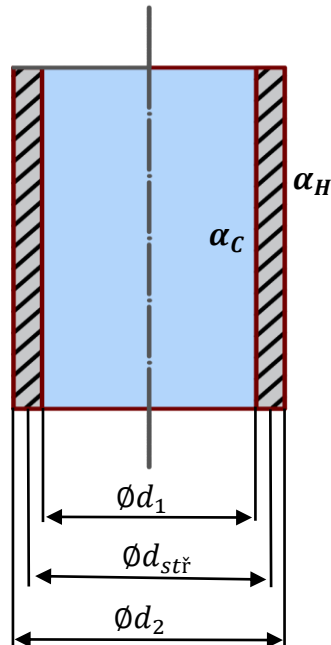
$$\Delta t_1 = t_{p_{IN}} - t_{v_{OUT}} = 81,1 - 74,7 = 6,4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

$$\Delta t_2 = t_{p_{OUT}} - t_{v_{IN}} = 62,5 - 49,3 = 13,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{13,2 - 6,4}{\ln \frac{13,2}{6,4}} = 9,4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7)$$

Prostor uvnitř trubky, střední teplota:

$$t_v = \frac{t_{vOUT} + t_{vIN}}{2} = \frac{74,7 + 49,3}{2} = 62,0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8)$$



#### 4.4 Stanovení fyzikálních vlastností pro střední teploty médií (voda)

Fyzikální vlastnosti jsem stanovil za pomoci parních tabulek XSteam

$$\text{Hustota: } \rho_v = 982,14 \text{ kg/m}^3 \quad (9)$$

$$\text{Tepelná vodivost: } \lambda_v = 0,652 \text{ W/m} \cdot \text{K} \quad (10)$$

$$\text{Kinematická viskozita: } \nu_v = 0,457 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (11)$$

$$\text{Dynamická viskozita: } \mu_v = 449,3 \times 10^{-6} \text{ Pa/s} \quad (12)$$

$$\text{Prandtlovo číslo: } Pr = 2,9 \quad (13)$$

Dopočet Nusseltova čísla:

$$Nu = \frac{\alpha_c \cdot l}{\lambda_K} \rightarrow l \quad (14)$$

$$l = \frac{4 \cdot S_o}{o} = \frac{4 \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}}{\pi \cdot d_1} = d_1 \quad (15)$$

Charakteristickým rozměrem je vnitřní průměr  $d_1$ .

$$d_1 = d_2 - 2 \cdot 1,5 = 16 - 2 \cdot 1,5 = 13 \text{ mm} = 13 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (16)$$

Reynoldsovo číslo:

$$\text{Vydeme z rovnice kontinuity } \dot{m} = S \cdot v \cdot \rho \cdot n \quad (17)$$

$$\text{Proto platí: } v = \frac{\dot{m}}{S \cdot \rho \cdot n} \quad (18)$$

$$Re = \frac{v \cdot d_1}{\nu_v} \quad (19)$$

$$\text{Průřez: } S_o = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot (13 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 1,33 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (20)$$

$$\text{Hustota: } \rho_v = 982,14 \text{ kg/m}^3 \quad (21)$$

$$\text{Hmotnostní tok: } \dot{m}_v = 230,64 \text{ kg/s} \quad (22)$$

Počet trubek: 1860 ks (zvoleno podle parametrů NTO2)

$$v = \frac{\dot{m}}{S \cdot \rho \cdot n} = \frac{230,64}{1,33 \times 10^{-4} \cdot 982,14 \cdot 1860} = 0,949 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (23)$$

$$Re = \frac{v \cdot d_1}{\nu_v} = \frac{0,949 \cdot 13 \times 10^{-3}}{0,457 \times 10^{-6}} = 26995,62 \quad (24)$$

Výsledek Reynoldsova čísla porovnááme s hodnotou  $10^4$  pro rozhodnutí typu proudění.

$26995,62 > 10^4 \rightarrow$  *turbulentní proudění*

Nusseltovo číslo:

Pro  $0,7 \leq Pr \leq 160$ ;  $Re > 10^3$

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 0,023 \cdot 26995,62^{0,8} \cdot 2,9^{0,4} = 123,52 \quad (25)$$

#### 4.5 Stanovení součinitele přestupu tepla $\alpha_c$

$$Nu = \frac{\alpha_c \cdot l}{\lambda_K} \rightarrow \alpha_c = \frac{Nu \cdot \lambda_K}{d_1} = \frac{123,52 \cdot 0,652}{13 \times 10^{-3}} = 6195,00 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (26)$$

Mezitrubkový prostor a výpočet součinitele přestupu tepla  $\alpha_H$

$$t_p = \frac{t_{PIN} - t_{POUT}}{2} = \frac{81,1 + 62,5}{2} = 71,8 \text{ }^\circ\text{C} \quad (27)$$

Opět pro stanovení parametrů vycházíme z parních tabulek XSteam

Výparné teplo:

$$h_{fg} = 2328,6 \text{ kJ/kg} \quad (28)$$

**Pára**

$$\text{Hustota } \rho_p = 0,3 \text{ kg/m}^3 \quad (29)$$

**Voda**

$$\text{Hustota } \rho_v = 976,7 \text{ kg/m}^3 \quad (30)$$

$$\text{Saturační teplota } t_{sat} = 80,3 \text{ }^\circ\text{C} \quad (31)$$

$$\text{Teplota filmu } t_f = \frac{t_{sat} + t_p}{2} = \frac{80,3 + 71,8}{2} = 76,05 \text{ }^\circ\text{C} \quad (32)$$

$$\text{Dynamická viskozita } \mu_l = 394,13 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (33)$$

$$\text{Měrná tepelná kapacita } c_{pl} = 4,19 \text{ kJ/kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C} \quad (34)$$

$$\text{Tepelná vodivost } \lambda_l = 0,661 \text{ W/m} \cdot \text{K} \quad (35)$$

Korigované výparné teplo:

$$\begin{aligned} h_{fg}^* &= h_{fg} + 0,68 \cdot c_{pv} \cdot (t_{sat} - t_p) = 2328,6 \times 10^3 + 0,68 \cdot 4,19 \times 10^3 \cdot (80,3 - 71,8) = \\ &= 2352818,20 \text{ J/kg} \end{aligned} \quad (36)$$

#### 4.6 Stanovení součinitele přestupu tepla $\alpha_H$

$$\begin{aligned} \alpha_H &= 0,943 \cdot \left[ \frac{g \cdot \rho_v \cdot (\rho_v - \rho_p) \cdot h_{fg}^* \cdot \lambda_v^3}{\mu_v \cdot (t_{sat} - t_p) \cdot L} \right]^{\frac{1}{4}} = \\ &= 0,943 \cdot \left[ \frac{9,81 \cdot 976,7 \cdot (976,7 - 0,3) \cdot 2352818,20 \cdot 0,661^3}{394 \times 10^{-6} \cdot (80,3 - 71,8) \cdot 0,3} \right]^{\frac{1}{4}} = 8409,68 \text{ W/m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (37)$$

#### 4.7 Stanovení součinitele prostupu tepla $k$

$$\begin{aligned} k &= \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_C \cdot d_1} + \frac{1}{\lambda_{TR}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_H \cdot d_2}} = \\ &= \frac{\pi}{\frac{1}{6195,0 \cdot 13 \times 10^{-3}} + \frac{1}{15} \cdot \ln \frac{16 \times 10^{-3}}{13 \times 10^{-3}} + \frac{1}{8409,68 \cdot 16 \times 10^{-3}}} = 93,25 \text{ W/m} \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (38)$$

#### 4.8 Dopčtení velikosti teplosměnné plochy

Velikost teplosměnné plochy:

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_v = k \cdot L_T \cdot \Delta t_{ln} \rightarrow L_T = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{24424,76 \times 10^3}{93,25 \cdot 9,4} = 27864,65 \text{ m} \quad (39)$$

Délka 1 trubky:

$$L_{TR} = \frac{L_T}{n} = \frac{27864,65}{1860} = 14,98 \text{ m} \quad (40)$$

Celková teplosměnná plocha trubek:

$$S_T = \pi \cdot d_{stř} \cdot L \cdot n = \pi \cdot 14,5 \times 10^{-3} \cdot 14,98 \cdot 1860 = \mathbf{1269,24 \text{ m}^2} \quad (41)$$



## ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo se seznámit s jadernou energetikou a jadernými elektrárnami jako takovými. Dále podrobněji přiblížit Jadernou elektrárnu Dukovany a její sekundární okruh. V poslední řadě bylo cílem přiblížit nízkotlakou regeneraci a provést výpočet nízkotlakého ohřívačku 2 ze zadaných hodnot a hodnot odečtených z celkového tepelného schématu sekundárního okruhu.

Nejprve jsem vypracoval úvod do jaderné energetiky. V něm jsem uvedl historii, budoucnost, provoz jaderných elektráren v České republice a ve světě a také princip funkce jaderných elektráren. V další části jsem podrobněji popsal jaderné elektrárny Temelín a především Dukovany, u kterých jsem přiblížil princip nízkotlaké regenerace s následným výpočtem nízkotlakého ohřívačku 2.

Výpočet vycházel z celkového tepelného schématu a doplňujících zadaných hodnot. Výsledkem pak měla být především vypočtená celková teplosměnná plocha trubek v NTO2. Nejprve jsem provedl výpočet délky 1 trubky, kterou jsem stanovil postupným výpočtem na  $L_{TR} = 14,98 \text{ m}$ . Posledním výsledkem výpočtu pak byla celková teplosměnná plocha, kterou jsem stanovil pro 1860 trubek na  $S_T = 1269,24 \text{ m}^2$ .

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DOLEŽAL, Jaroslav, Jiří ŠŤASTNÝ, Jan ŠPETLÍK, Stanislav BOUČEK a Zbyněk BRETTSCHEIDER. *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [2] FALTUSOVÁ, Eva. Česká budoucnost jaderné energetiky. *EURACTIV* [online]. EURACTIV.cz, 2021, 30.6.2021 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://euractiv.cz/section/energetika/news/ceska-budoucnost-jaderne-energetiky-by-se-mohla-nest-ve-znameni-malych-reaktoru/>
- [3] Infocentrum. In: *Kudyznudy.cz* [online]. Czechturism, 2020 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.kudyznudy.cz/akce/infocentrum-temelin-opet-otevreno-pro-exkurze>
- [4] Infocentrum Jaderné elektrárny Dukovany. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/infocentra/dukovany-135065>
- [5] Jaderné elektrárny. *České noviny* [online]. ČT, 2022, 20.3.2022 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.ceskenoviny.cz/zpravy/jaderne-elektrarny-loni-vyrobily-zhruba-tretinu-ceske-elektriny/2180281>
- [6] Jaderná elektrárna Dukovany. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2022-02-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/edu>
- [7] Jaderná elektrárna Temelín. *Svět energie* [online]. Tábor: Simopt, 2020 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderne-elektrarny-cez/jaderna-elektrarna-temelin>
- [8] Jaderné elektrárny v ČR. *Jaderné elektrárny.cz* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.jaderne-elektrarny.cz/princip-fungovani-jaderne-elektrarny/>
- [9] Jaderná energetika v České republice. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice>
- [10] Jaderná energetika ve světě. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete>
- [11] KUSALA, RNDr. Jaroslav. Z historie jaderné fyziky. *Cez.cz* [online]. 2004 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k41.htm>

- [12] MLYNÁŘ, Jan a Vladislav POULEK. *JADERNÁ ENERGIE*. Praha: Ilsa, 2012. ISBN 978-80-904311-6-4.
- [13] Nuclear energy. *National Geographic Society* [online]. Washington [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/nuclear-energy/>  
<https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/nuclear-energy/>
- [14] Skripta ČEZ (Letní univerzita na EDU)
- [15] Skripta ČEZ (Učební skripta ČEZ)
- [16] Skripta ČEZ (Vstupní školení do Jaderné elektrárny Temelín)
- [17] ŠVEHEL, Petr. ČEZ zahájil tendr. *Seznam Zprávy* [online]. ČTK [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/ekonomika-firmy-cez-zahajil-tendr-na-stavbu-noveho-bloku-v-dukovanech-194167>
- [18] Ve světě. *Ekolist.cz* [online]. Brusel: ČTK, 2022, 2022 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/ve-svete-funguje-pres-440-jadernych-reaktoru-nejvice-je-jich-v-evrope>
- [19] Více než třetina elektřiny. *O energetice.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2021, 5.8.2021 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/energetika-v-cr/vice-nez-tretina-elektřiny-vyrobene-v-cesku-pochazi-i-v-lete-stale-z-uhli>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<i>SYMBOL</i>	<i>VELIČINA</i>	<i>JEDNOTKY</i>
ČR	Česká republika	
$c_{pl}$	Měrná tepelná kapacita kapalné části vodní páry	$\frac{J}{kg \cdot K}$
$d_1$	Vnitřní průměr trubky	$m$
$d_2$	Vnější průměr trubky	$m$
$d_{stř}$	Střední průměr trubky	$m$
EU	Evropská unie	–
HCC	Hlavní cirkulační čerpadlo	–
$h_{fg}$	Výparné teplo	$\frac{kJ}{kg}$
$h_{fg}^*$	Korigované výparné teplo	$\frac{J}{kg}$
$h_{pIN}$	Vstupní entalpie páry	$\frac{J}{m^3}$
$h_{pOUT}$	Výstupní entalpie páry	$\frac{J}{m^3}$
HUA	Hlavní uzavírací armatura	$\frac{J}{m^3}$
$h_{vIN}$	Vstupní entalpie vody	$\frac{J}{m^3}$
$h_{vOUT}$	Výstupní entalpie vody	$\frac{J}{m^3}$
JE	Jaderná elektrárna	
$k$	Součinitel prostupu tepla	$\frac{W}{m \cdot K}$
$L_T$	Velikost teplosměnné plochy trubek	$m$
$L_{TR}$	Délka 1 trubky	$m$
$\dot{m}_p$	Hmotnostní tok páry	$\frac{kg}{m^2 \cdot s}$
$\dot{m}_v$	Hmotnostní tok vody	$\frac{kg}{m^2 \cdot s}$

$\dot{m}_{vIN}$	Vstupní hmotnostní tok vody	$\frac{kg}{m^2 \cdot s}$
$\dot{m}_{vOUT}$	Výstupní hmotnostní tok vody	$\frac{kg}{m^2 \cdot s}$
$n$	Počet trubek	—
$NT$	Nízkotlaký	—
$NTO$	Nízkotlaký ohřívák	—
$Nu$	Nusseltovo číslo	—
$PG$	Parogenerátor	—
$p_{pIN}$	Vstupní tlak páry	Pa
$Pr$	Prandtlovo číslo	—
$p_{vOUT}$	Výstupní tlak vody	Pa
$PWR, VVER$	Lehkovodní tlakový reaktor	—
$\dot{Q}_p$	Tepelný výkon páry	W
$\dot{Q}_v$	Tepelný výkon vody	W
$S$	Entropie	$\frac{J}{K}$
$S_T$	Celková teplosměnná plocha trubek	$m^2$
$t_f$	Teplota filmu	$^{\circ}C$
$t_p$	Střední teplota páry	$^{\circ}C$
$t_{pIN}$	Vstupní teplota páry	$^{\circ}C$
$t_{pOUT}$	Výstupní teplota páry	$^{\circ}C$
$t_{sat}$	Saturační teplota	$^{\circ}C$
$t_v$	Střední teplota vody	$^{\circ}C$
$t_{vIN}$	Vstupní teplota vody	$^{\circ}C$
$t_{vOUT}$	Výstupní teplota vody	$^{\circ}C$
$v$	Rychlost vody	$\frac{m}{s}$
$VT$	Vysokotlaký	—
$\Delta t_{ln}$	Logaritmický teplotní spád	$^{\circ}C$

---

$\lambda_{TR}$	<i>Tepelná vodivost materiálu trubek</i>	$\frac{W}{m \cdot K}$
$\lambda_l$	<i>Tepelná vodivost kapalné části vodní páry</i>	$\frac{W}{m \cdot K}$
$\lambda_v$	<i>Tepelná vodivost vody</i>	$\frac{W}{m \cdot K}$
$\nu_v$	<i>Kinematická viskozita vody</i>	$\frac{m^2}{s}$
$\alpha_C$	<i>Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně trubky</i>	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$\alpha_H$	<i>Součinitel přestupu tepla na vnější straně trubky</i>	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$\mu_l$	<i>Dynamická viskozita kapalné části</i>	$Pa \cdot s$
$\mu_v$	<i>Dynamická viskozita vody</i>	$Pa \cdot s$
$\rho_p$	<i>Hustota páry</i>	$\frac{kg}{m^3}$
$\rho_v$	<i>Hustota vody</i>	$\frac{kg}{m^3}$
$\rho$	<i>Hustota</i>	$\frac{kg}{m^3}$

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma jaderné elektrárny [5] .....	12
Obrázek 2 Graf predikovaného vývoje jaderných elektráren oproti skutečnosti [1] .....	13
Obrázek 3 Podíl zdrojů na výrobě elektřiny [19] .....	14
Obrázek 4 Schéma jaderné elektrárny Temelín [16] .....	15
Obrázek 5 Letecká fotografie Jaderné elektrárny Temelín [3] .....	16
Obrázek 6 Schéma jaderné elektrárny Dukovany [14] .....	17
Obrázek 7 Letecká fotografie Jaderné elektrárny Dukovany [4] .....	17
Obrázek 8 Uspořádání základních zařízení a systému v primárním okruhu [14] .....	18
Obrázek 9 Jaderný reaktor [14] .....	19
Obrázek 10 Parogenerátor [14] .....	20
Obrázek 11 Strojovna jaderné elektrárny Dukovany [14] .....	21
Obrázek 12 Parní turbína Škoda typu K220-44 [14] .....	22
Obrázek 13 T-s diagram R-C cyklu [14] .....	23
Obrázek 14 Tepelné schéma sekundárního okruhu [14] .....	23
Obrázek 15 NTO2 z celkového tepelného schématu [15] .....	25

## **SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Základní údaje o JE Temelín [7][8].....	16
Tabulka 2 Parametry NTO2 [15].....	26