



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

NÁVRH PAROGENERÁTORU PRO JADERNOU ELEKTRÁRNU

DESIGN OF THE STEAM GENERATOR FOR A NUCLEAR POWER PLANT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Hort

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Milčák

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Lukáš Hort**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Milčák**
Akademický rok: 2020/21

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 parogenerátoru pro jadernou elektrárnu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jaderná energetika má v rámci trvalé udržitelnosti nezpochybnitelné místo. V současnosti je ve světě ve fázi výstavby přibližně padesát reaktorů. Parogenerátory jaderných elektráren jsou důležitými komponenty oddělovacími primární a sekundární okruh u tlakovodních reaktorů.

Cíle bakalářské práce:

- stručný úvod do jaderné energetiky,
- rešerše parogenerátorů v jaderných elektrárnách,
- koncepční řešení parogenerátoru pro JE pro zadané parametry,
- tepelný výpočet parogenerátoru a stanovení velikosti zařízení.

Seznam doporučené literatury:

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

KRBEK, Jaroslav, Jan FIEDLER a Bohumil POLESNÝ. Strojní zařízení tepelných centrál: návrh a výpočet. Brno: PC-DIR, 1999, 217 s. ISBN 80-214-1334-4.

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

MURRAY, Raymond LeRoy a Keith E HOLBERT. Nuclear energy: an introduction to the concepts, systems, and applications of nuclear processes. 7th ed. Amsterdam: Elsevier, 2015, xvii, 550 s. : il. ISBN 978-0-12-416654-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

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 pojednává o návrhu parogenerátoru pro jadernou elektrárnu. Úvodní kapitoly jsou čistě teoretické, kdy první z nich pojednává o jaderné energetice jako takové, další pokračuje s rešerší různých druhů parogenerátorů a jejich následným srovnáním. Následuje výpočtová část zabývající se tepelným výpočtem parogenerátoru pro zadané parametry.

Klíčová slova

Parogenerátor, tepelný výměník, tepelný výpočet, pára

ABSTRACT

This bachelor's thesis is about the design of a steam generator for a nuclear power plant. The opening chapters are purely theoretical, with the first one covering nuclear energy as such, the next one continuing with the search for different types of parogenerators and their subsequent comparison. This is followed by a calculation section dealing with the thermal calculation of the parogenerator for the given parameters.

Key words

Steam generator, heat exchanger, thermal calculation, steam

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HORT, Lukáš. *Návrh parogenerátoru pro jadernou elektrárnu*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132729>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Milčák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem *bakalářskou* práci na téma **Návrh parogenerátoru pro jadernou elektrárnu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu Ing. Pavlovi Milčákovi za jeho ochotu a cenné připomínky, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD.....	9
1 Jaderná energetika.....	10
1.1 Princip jaderné elektrárny	11
1.1.1 Jaderná elektrárny Dukovany	11
1.1.2 Jaderná elektrárna Temelín.....	12
2 Parogenerátory v jaderných elektrárnách.....	14
2.1 Horizontální parogenerátory reaktorů VVER	14
2.1.1 VVER 440	15
2.1.2 VVER 1000	16
2.2 Vertikální parogenerátory.....	18
2.2.1 Recirkulační parogenerátor PWR.....	18
2.2.2 Parogenerátor OTSG	19
2.2.3 Parogenerátor reaktoru CANDU	20
3 Koncepční řešení parogenerátoru pro JE pro zadané parametry.....	21
3.1 Zadané parametry	21
3.2 Počet teplosměnných trubek a celková průtočná plocha.....	22
4 Tepelný výpočet parogenerátoru.....	24
4.1 Součinitel přestupu tepla mezi primárním médiem a stěnou trubky	24
4.2 Součinitel přestupu tepla mezi stěnou trubky a parovodní směsí	25
4.3 Součinitel prostupu tepla	25
4.4 Výpočet teplosměnné plochy a střední délky trubky	27
4.5 Parní a tepelný výkon parogenerátoru.....	28
4.6 Návrh hlavních rozměrů parogenerátoru.....	28
5 Závěr	29
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	30
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	32

ÚVOD

Spotřeba elektrické energie každým rokem roste, proto je nutné myslet na budoucnost. Převážná většina elektrické energie je získávána z fosilních paliv, ovšem zásoby těchto paliv se tenčí každým rokem. Z toho důvodu je nutné stále rozvíjet a hledat jiné možnosti.

Jaderná energie je proto jedním z nejdůležitějších zdrojů elektrické energie na světě. Zároveň se nesmí opomenout fakt, že při výrobě elektrické energie v jaderné elektrárně dochází k velmi malému zatížení ovzduší emisemi, což v dnešní době s vzrůstajícím vlivem klimatických změn je považováno za zásadní faktor. Velmi aktuálním tématem je proto, nejen na území České republiky, výstavba nových jaderných bloků. Ovšem jaderné elektrárny mají i své nevýhody, jednou z nich je vysoký počáteční vklad a přísné technické požadavky na provoz a zabezpečení.

Celkem je nyní v provozu více než 450 jaderných reaktorů ve zhruba třiceti zemích světa a dalších 50 jich je ve fázi výstavby. Největší počet jaderných elektráren na světě mají Spojené státy americké (95 reaktorů).

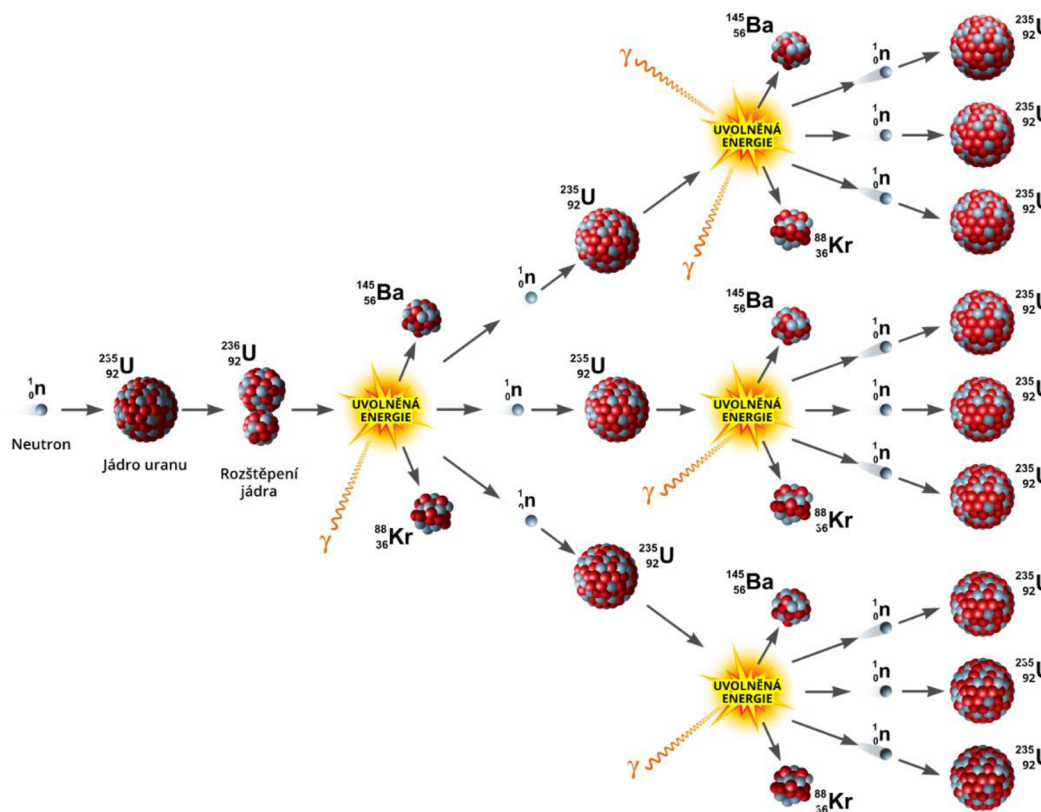
Chod jaderné elektrárny závisí na správném chodu každé její části. Jednou z těchto částí je i parogenerátor. Parogenerátory v jaderných elektrárnách oddělují primární okruh od sekundárního. Zároveň slouží k ohřevu sekundární vody primární vodou přes stěny teplosměnných trubek, následně se voda sekundárního okruhu vypařuje a vzniklá pára roztáčí turbínu, která pohání generátor.

Cílem této bakalářské práce je udělat návrh parogenerátoru pro jadernou elektrárnu s rešerší parogenerátorů a tepelným výpočtem pro zadané parametry.

1 Jaderná energetika

Všechno kolem nás je tvořeno atomy, které se skládají z jádra a elektronového obalu. Atomové jádro se skládá z kladně nabitých protonů a neutrálních neutronů. Od vzájemného odpuzování brání protonům tzv. jaderné síly. Tyto síly jsou tisíckrát větší než síly elektromagnetické, ale mají velmi krátký dosah. Jejich působení začíná tehdy, když jsou nukleony těsně u sebe, že se téměř dotýkají.

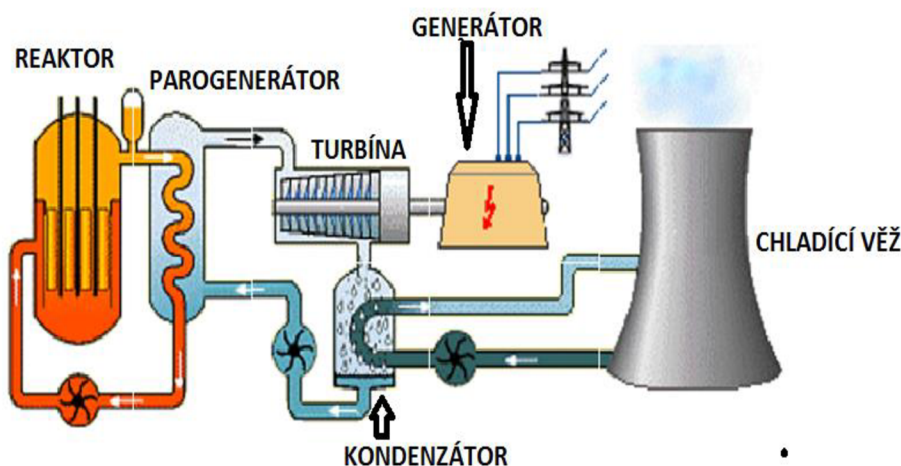
Většina atomů nacházejících se na Zemi jsou stabilní, nemění se. Ovšem u některých prvků se jádra atomů přeměňují a uvolňují při tom energii ve formě záření. Tento jev se nazývá radioaktivita. Počáteční impuls štěpení jádra je interakce s neutronem. Štěpící se jádro se deformuje, až odpudivé elektrické síly převáží a kladná dceřiná jádra se od sebe s odporem vysokou rychlostí rozletí a narážejí do ostatních jader, z čehož mají obrovskou kinematickou energii. Postupně se uklidňují a jejich energie přechází do formy tepelné energie. Pro štěpení v jaderných elektrárnách se používá prvek uran. Při štěpení uranu vylétne vždy i několik neutronů, které mohou narazit do dalších jader uranu a vyvolat další štěpení. Vzniká tzv. řetězová reakce. [1] [3]



Obrázek 1 Schéma řetězové štěpné reakce [2]

Proces výroby energie v praxi probíhá zjednodušeně takto: palivo (nejčastěji uran ^{235}U nebo plutonium ^{238}Pu), ve kterém probíhá štěpení, uvolňuje tepelnou energii, která je předávána chladivu (převážně voda). Moderátory slouží ke zpomalení rychlých neutronů vzniklých při štěpení, čímž zvyšují pravděpodobnost dalšího štěpení. Pokud reakci necháme volný průběh, bude takzvaně neřízená. Proto ji omezují regulační tyče vyrobené z materiálu, které zachytávají velké množství neutronů. Díky čemuž je jadernou reakci možné omezit, respektive ji i plně zastavit. [1] [3]

1.1 Princip jaderné elektrárny



Obrázek 2 Schéma jaderné elektrárny [4]

Na obrázku 2 můžeme vidět uspořádání jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem, což je nejrozšířenější typ reaktorů. Postup výroby v těchto elektrárnách je následující. Hlavním místem jaderné elektrárny je reaktor, kde dochází k řízenému štěpení. Štěpením se uvolňuje obrovské množství tepelné energie, které je předáváno chladivu, zde vodě. Tato voda, cirkulující v primárním okruhu, předává tepelnou energii vodě cirkulující v sekundárním okruhu. Tento proces probíhá v parogenerátoru. V sekundárním okruhu se voda mění na páru putující na turbínu, která roztáčí generátor. V generátoru se mění mechanická energie na energii elektrickou. Pára z turbíny přichází do kondenzátoru, kde se mění ve vodu a vrací se zpátky do parogenerátoru. Teplo vzniklé v kondenzátoru je odváděno vodou terciálního okruhu, která je ochlazována v chladicí věži. V České republice pracují dvě jaderné elektrárny. [3] [5] [6]

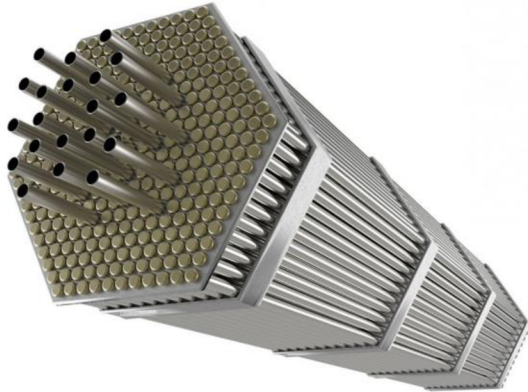
1.1.1 Jaderná elektrárna Dukovany

Jaderná elektrárna Dukovany se nachází na hranici dvou krajů – Vysočiny a Jihomoravského kraje. Dukovany jsou první jaderná elektrárna u nás. Výstavba začala v 70. letech spolu s výstavbou přečerpávací vodní elektrárny Dalešice, která slouží jako další zásobárna výkonu. Plánovaná životnost jaderné elektrárny Dukovany byla 30 let. Ale po rekonstrukcích a úpravách se zvýšila až na 60let. Celkové náklady na výstavbu byly 25 miliard Kčs. Jako zdroj technologické vody slouží vodní nádrž Mohelno.

Postavili se celkem čtyři reaktory VVER 440/V213, každý z nich o výkonu 440 MWe. VVER znamená Vodou chlazený, Vodou moderovaný Energetický Reaktor. Ovšem po modernizacích je celkový elektrický výkon elektrárny 2040 MWe. Elektrárna je rozdělena do dvou hlavních výrobních bloků. Ke každému z těchto bloků náleží dva reaktory. Každý reaktor má šest parogenerátorů, z nichž každý vyrobí 452t/h páry, kterou pohání generátor.

Jako palivo se používá obohacený uran (na 2,5 až 5 % obsahu ^{235}U) ve formě oxidu uraničitého UO_2 , který se lisuje do malých pelet. Pelety se následně vsunují do hermeticky uzavřených trubek ze zirkoniové slitiny a vytvářejí palivové proutky. Svazek palivových proutků tvoří palivovou kazetu. Jedna kazeta má výdrž 10 až 11 měsíců, kdy už není v palivu dostatečná zásoba reaktivity, která se snižuje štěpením a výkon bloku postupně klesá o 0,7 % denně po dobu 2 až 4 týdnů. Následuje odstavení bloku a dochází k výměně paliva a pravidelné revizi. Použité palivo obsahuje v průměru 95% uranu, převážně ^{238}U , 1% nově vytvořeného plutonia Pu a 4 % štěpných produktů. Pouze tato 4 % lze skutečně považovat za jaderný odpad,

jelikož zbytek lze po přepracování znovu použít. Avšak přepracování je v této době stále poměrně nákladné. Proto se počítá, že po několika letech ležení v bazénu a po několika desítkách let skladování bude trvale uloženo do hlubinného úložiště, které má být postaveno do roku 2065. [7] [8]



Obrázek 3 Palivová kazeta [9]

1.1.2 Jaderná elektrárna Temelín

Jaderná elektrárna Temelín leží v Jihočeském kraji. S výstavbou se začalo v 80. letech, takřka ihned po dokončení elektrárny v Dukovanech. Původní projekt byl naplánovaný se čtyřmi reaktorovými bloky VVER 1000/V320, ale v roce 1990 vláda rozhodla, že se dokončí pouze první dva. Třetí a čtvrtý byly ponechány rozestavěné pro možné využití do budoucna. Elektrárna tedy pracuje na výkonu 2×1082 MWe. Stejně jako jaderná elektrárna Dukovany, tak i Temelín má zdroj technologické vody, kterým je vodní nádrž Hněvkovice na Vltavě.

Modernizací reaktorů, která probíhá téměř neustále, se reaktory VVER1000 řadí mezi nejlépe fungující reaktory II. generace na světě, jak po stránce technické, tak po stránce bezpečnostní. Na každý blok jsou zde pouze 4 parogenerátory, což je o dva méně, než v Dukovanech. Ovšem množství vyrobené páry jednoho parogenerátoru je 1470t/h.

K ochraně primárního okruhu jsou zde vybudovány dva kontejnmenty, obrovské železobetonové stavby, které tvoří bezpečnostní bariéru mezi jadernou částí elektrárny a okolím. Jde o 56 metrů vysoké stavby, na jejichž vnitřním povrchu je osmimilimetrová vrstva nerezové oceli, která brání úniku radionuklidů do okolí. Uvnitř je vytvářen podtlak pro případ netěsnosti, aby nedocházelo k úniku látek do okolí, ale nasávání vzduchu z okolí. [10] [11]



Obrázek 4 Kontejnment JE Temelín [12]

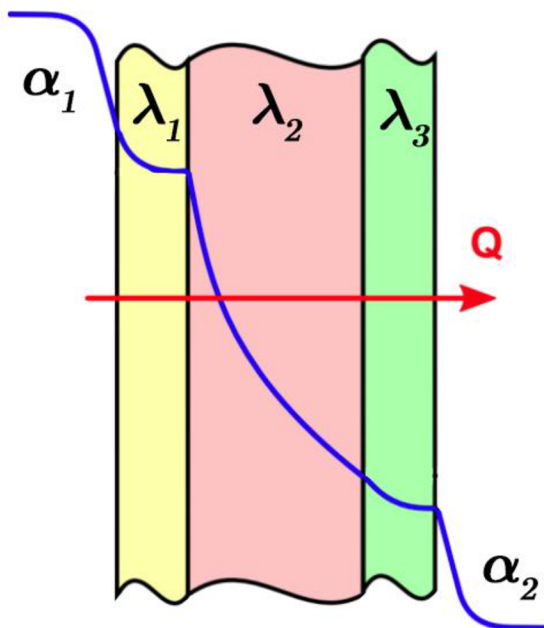
Tab. 1 Porovnání parametrů jaderné elektrárny Dukovany a Temelín [7] [10] [13]

	Dukovany	Temelín
Reaktor		
Počet	4	2
Typ reaktoru	VVER 440/V213	VVER 1000/V320
Nominální tepelný výkon	1 444 MWt	3 120 MWt
Výška tlakové nádoby	11,85 m	10,9 m
Vnější průměr tlakové nádoby	3,840 m	4,5 m
Počet palivových kazet	312	163
Počet palivových proutků v kazetě	126	312
Hmotnost palivové kazety	220 kg	766 kg
Hmotnost paliva v jedné kazetě	120 kg	563 kg
Parogenerátor		
Počet na blok	6	4
Množství páry vyrobené v jednom PG	452 t/h	1 470 t/h
Tlak páry na výstupu	4,61 MPa	6,3 MPa
Teplota páry na výstupu	260 °C	278,5 °C
Hmotnost parogenerátoru	165 t	416 t
Kondenzátor		
Počet trubek v jednom kondenzátoru	31 716	32 000
Množství chladicí vody	35 000 m ³ /h	36 500 m ³ /h
Délka trubek	8,4 m	12 m
Materiál	titan	titan
Chladicí věže		
Počet na blok	2	2
Výška věže	125 m	154,8 m
Průměr v koruně věže	60 m	82,6 m
Patní průměr	90 m	130,7 m
Průtok vody jednou věží	17,2 m ³ /s	17,2 m ³ /s
Odpar z jedné věže	125 l/s	413 l/s

2 Parogenerátory v jaderných elektrárnách

Parogenerátory patří mezi největší a nejdůležitější výměníky tepla v jaderných elektrárnách. Zabraňují promíchání primární radioaktivní vody přicházející z reaktoru s vodou sekundárního okruhu. Používají teplo z vody v primárním okruhu na přeměnu vody sekundárního okruhu na páru. Parou se poté pohání turbína připojené ke generátoru. Ve většině elektráren se vyrábí sytá pára, z toho důvodu musí před stupem do turbíny projít separátory a snížit tak svou vlhkost na maximálně 0,25%. Pára následně kondenzuje a vrací se zpátky do parogenerátoru (tzv. uzavřený okruh). Obvykle jaderná elektrárna má dva až šest parogenerátorů na reaktor, ovšem některé jednotky mohou mít až dvanáct parogenerátorů.

Primární voda prochází několika tisíci teplosměnnými trubkami, ze kterých je parogenerátor tvořen, a ohřívá sekundární vodu nacházející se na vnější straně trubek. Tyto trubky musí být vyrobeny z nerezových ocelí a nebo z vysoce legovaných nikl-chromových ocelí. Tloušťka stěn těchto trubek se pohybuje mezi 1,2 až 1,8 mm. Voda primárního okruhu je pod větším tlakem, než voda sekundárního, tudíž pokud by došlo k defektu trubky, jednalo by se o závadu z primární strany na sekundární. Pokud se některá z trubek poškodí, je třeba tuto netěsnost vyřešit při nejbližší odstávce. Celá trubka se dálkově pomocí ovládaného manipulátoru zaslepí a tím se vyřadí z provozu. Při projektování parogenerátoru se s určitým procentem zaslepených trubek počítá. Proto jsou také prováděny kontroly a je kladen důraz na kvalitu svarů jednotlivých trubek. Těsnost těchto svarů ovlivňuje životnost nejen parogenerátoru, ale i celé jaderné elektrárny. Teoretická životnost parogenerátoru se pohybuje kolem 30 – 35 let.[15]



Obrázek 5 Prostup tepla válcovou stěnou [14]

Parogenerátory se dělí na dva hlavní typy: **horizontální** a **vertikální**. [15]

2.1 Horizontální parogenerátory reaktorů VVER

Tyto parogenerátory používané u ruských reaktorů typu VVER jsou horizontální tepelné výměníky, které tvoří bariéru mezi primárním a sekundárním okruhem. Jsou nejvíce rozšířeny v Rusku a Evropě. Základní údaje o těchto parogenerátorech jsou uvedeny v tab. 2. [16]

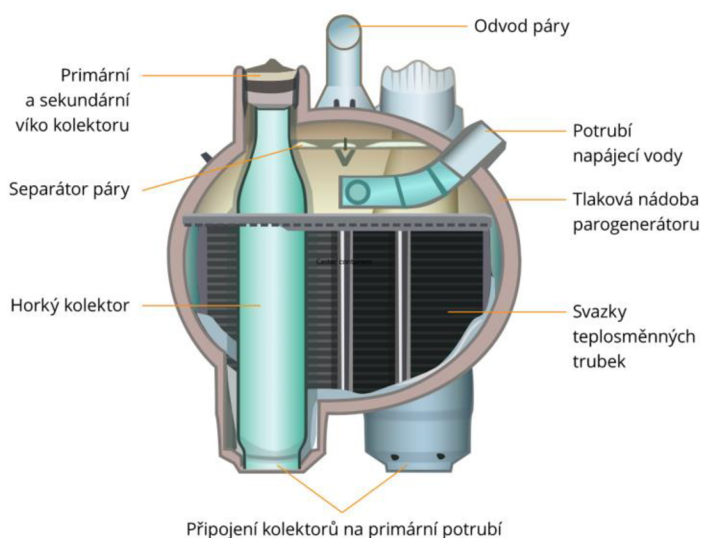
2.1.1 VVER 440

Tento typ se používá například v Jaderné elektrárně Dukovany, kde je šest horizontálně uspořádaných parogenerátorů na jeden reaktorový blok. Skládají se z tlakové nádoby, horizontálního svazku trubek sloužící pro tepelnou výměnu, dvou vertikálních primárních kolektorů, potrubního systému napájecí vody, separátorů vlhkosti a parního kolektoru. Tento typ parogenerátorů je dlouhý 11,8 m o průměru 3,2 m.

Primární médium (voda) je přiváděna do parogenerátoru napájecím potrubím, které se až uvnitř rozděluje na dvě části (kolektory), dále proudí svazkem U – trubek o vnějším průměru 16 mm a vychází druhým vertikálním kolektorem. Konce trubek pronikají stěnou kolektoru, kde jsou zaválcovány výbuchem a jsou svařeny na vnitřní stěně kolektoru. Uspořádání těchto svazků trubek je v řadě za sebou. Kolektory VVER – 440 jsou vyrobeny z austenitické nerezové oceli (08Ch18N10T). V novějších typech těchto parogenerátorů došlo k výrazné změně u vstupního a výstupního kolektoru vody. Původně se nacházeli uvnitř tělesa parogenerátoru, ovšem u aktuálních konstrukcí prochází horní částí pláště, tudíž je do nich umožněn přístup shora.

Vlhkost páry na výstupu nesmí překročit hodnotu 0,25 % a tudíž je zbavována nadbytečné vlhkosti v žaluziových separátorech. Předepsaná kvalita páry je dosažena pomocí trvalých a periodických odluhů a odkalů, pomocí kterých se z tělesa parogenerátoru odvádí zahuštěná voda. Odluhy odvádí vodu pomocí dvou nátrubků, z nichž jeden je vyveden ze dna parogenerátoru a druhý odvádí zahuštěnou vodu v prostoru mezi horkým kolektorem a bočním průřezem cca 200mm pod úrovní hladiny vody. Systém odkalů slouží k odvodu zahuštěné vody z meziprostoru primárních kolektorů a jeho pláštěm.

Pro odzdušnění parogenerátoru jsou při napouštění používány odzdušňovací trubky. Parogenerátor vyrovnává teplotní dilataci primárního a sekundárního potrubí kýváním, proto bývá zavěšen přes podpěry na strop. Pro měření hladiny při plnění a vypouštění je parogenerátor osazen dvěma hladinoměry velkého rozsahu a pro měření střední hladiny pěti malého rozsahu. Pro kontrolu správné funkce parogenerátor dále obsahuje přístroje pro měření teploty, průtoku a tlaku. K zabránění zvýšení tlaku v tělese nad přípustnou hodnotu slouží parogenerátoru pojišťovací ventily. [16] [18] [19]



Obrázek 6 Příčný řez tělesem parogenerátoru VVER 440 [17]

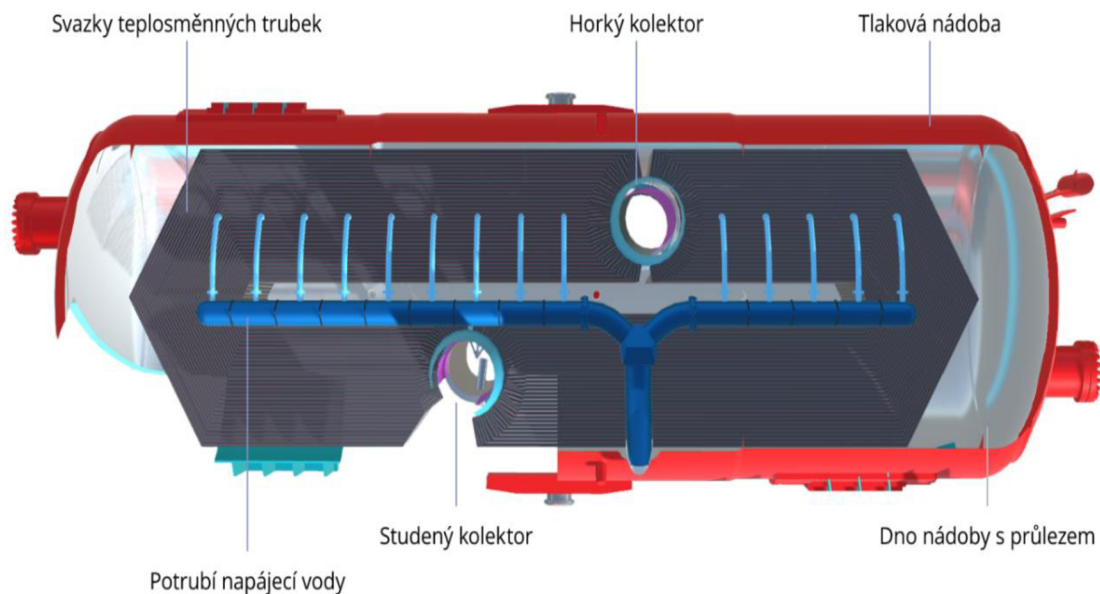
2.1.2 VVER 1000

Jedná se o typ parogenerátoru se zaplavenou teplosměnnou plochou a v tělese zabudovanými separátory vlhkosti. Těmito parogenerátory je vybavena jaderná elektrárna v Temelíně. Funkční popis těchto parogenerátorů je velice podobný tomu uvedenému pro parogenerátory bloků VVER 440, jedním z rozdílů je tepelný výkon těchto parogenerátorů, který se zvýšil na 750 MW, tudíž na jeden reaktor postačí čtyři parogenerátory.

Plášť parogenerátoru je svařen z prstenců zakružovaných ze 105 mm silných plechů. Z důvodu vyřezaných otvorů pro průchod kolektorů primární vody, jsou pouze dva prostřední zhotoveny z plechů silnějších (195 mm). Teplosměnné trubky z nerezavějící austenitické oceli jsou ve svazku se střídavým uspořádáním, jejich vnější průměr 16 mm a tloušťka stěny 1,5 mm. Ve svazku jsou svislé mezery zlepšující přirozenou cirkulaci parovodní směsi v mezitrubkovém prostoru. K plášti parogenerátoru jsou přivařena žebra a svislé opěrné stojiny, ke kterým jsou připevněny speciální desky pomocí nichž se provádí distancování trubek. Svazek trubek je kompaktnější než u parogenerátorů VVER 440, kde je uspořádání svazku za sebou.

K zabránění vzniku teplotních pnutí v plášti je trubka napájecí vody přivařena k nátrubku tak, aby se nedotýkala bezprostředně pláště parního generátoru v místě, kde jím prochází. Následně napájecí voda putuje do kolektoru a z něho do rozváděcích trubek, které podélně vedou vodu do teplejší části svazku. Dohřátí napájecí vody na teplotu varu probíhá ve vroucí vodě mezi trubkami svazku.

K rovnoměrnějšímu rozložení parovodní směsi v parním objemu parogenerátoru slouží též pod hladinou, zhruba ve výši 260 mm nad svazkem trubek, ponořený vodorovný děrovaný štít. Parovodní směs vystupující z hladiny nejdříve projde prvním separátorem vlhkosti (gravitačním) v parním prostoru. Druhé zbavování nadbytečné vlhkosti poté proběhne v žaluziových separátorech. Pára vycházející z parogenerátoru má vlhkost 0,2 %. [23]



Obrázek 7 Podélný horizontální řez tělesem parogenerátoru VVER 1000 [17]

Tab. 2 Základní parametry o parogenerátorech s reaktory VVER [19] [22] [23]

Charakteristiky	VVER 440	VVER 1000
Počet parogenerátorů na jeden blok	6	4
Tepelný výkon parogenerátoru	229 MW	750 MW
Výroba páry	452 t·h ⁻¹	1 470 t·h ⁻¹
Tlak páry	4,71 MPa	6,3 MPa
Odpařovací povrch	24 m ²	40
Teplota páry	260 °C	278,5 °C
Vlhkost páry na výstupu z parogenerátoru	0,25 %	0,2 %
Teplota napájecí vody	223 °C	220 °C
Průtok primární vody	4 842 t·h ⁻¹	14 800 t·h ⁻¹
Tlak primární vody	12,25 MPa	15,7 MPa
Teplota primární vody na vstupu do PG	297 °C	320 °C
Teplota primární vody na výstupu do PG	267 °C	289 °C
Teplosměnná plocha výpočtová	2 114 m ²	5 040 m ²
Teplosměnná plocha skutečná	2 510 m ²	6 115 m ²
Součinitel průchodu tepla (střední) čistých ploch	4 850 W·m ⁻² ·K ⁻¹	6 020 W·m ⁻² ·K ⁻¹
Vnější průměr trubek	16 mm	16 mm
Tloušťka stěny trubek	1,4 mm	1,5 mm
Rychlost primární vody v trubkách	2,37 m·s ⁻¹	2,6 m·s ⁻¹
Střední délka trubek	9 m	11,1 m
Počet trubek	5 536	11 000
Seskupení trubek	Za sebou	Střídavě
Vnitřní průměr kolektorů primární vody	0,8 m	0,834 m
Vnitřní průměr tělesa parogenerátoru	3,21 m	4 m
Délka tělesa parogenerátoru	11,8 m	14,53 m
Hmotnost trubek	25,89 t	65 t
Hmotnost tělesa	89,1 t	196 t
Hmotnost suchého parogenerátoru	149 t	322 t
Materiál kolektoru	08Ch18N10T	10GN2MFA
Materiál nádoby	22 K	10GN2MFA
Materiál teplosměnných trubek	08Ch18N10T	08Ch18N10T

Tab. 3 Chemické složení materiálu 08Ch18N10T používaného u parogenerátorů VVER [22]

Materiál	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti
08Ch18N10T	≤ 0,08	≤ 2,0	≤ 0,8	0,035	0,02	17-19	9-11	≤ 0,3	5xC

Tab. 4 Chemické složení materiálu 22K používaného u parogenerátorů VVER [22] [24]

Materiál	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
22K	0,19 – 0,26	0,7 – 1,0	0,17-0,4	≤ 0,04	≤ 0,035	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3

Tab. 5 Chemické složení materiálu 10GN2MFA používaného u parogenerátorů VVER [22]

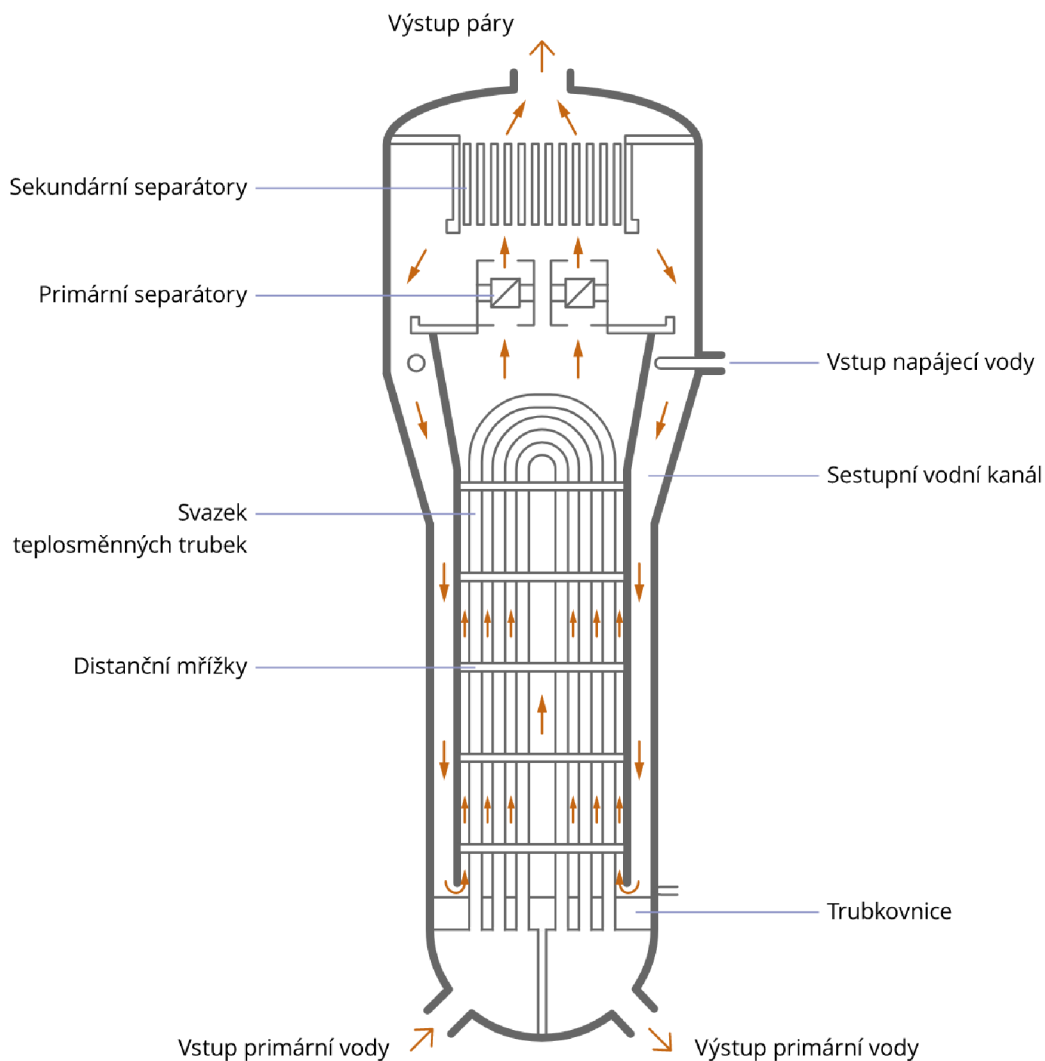
Materiál	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
10GN2MFA	0,08 – 0,15	0,6 – 0,9	0,1 – 0,37	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,30	1,70 – 2,70	≤ 0,3	0,40 - 0,60

2.2 Vertikální parogenerátory

Tento druh parogenerátorů je používán převážně ve Spojených státech amerických a západní Evropě. Jedná se opět o tepelné výměníky, tentokrát ovšem vertikálně uložené. [20]

2.2.1 Recirkulační parogenerátor PWR

Jedná se o vertikální nádoby, kde teplosměnnou plochu tvoří množství U-trubek, které jsou udržovány pod vysokým tlakem, a kde proudí primární voda. Trubky jsou na spodní straně upevněny v horizontální trubkovnici. Distanční mřížkami se v celé výšce a v určených vzdálenostech fixují dlouhé U-trubky. V recirkulačním parogenerátoru se sekundární voda přivádí přes napájecí prsteneц, kde se v sestupním vodním kanálu svádí s recirkulovanou vodou, která se získává v separátorech vlhkosti. Poté teče po obvodu nádoby do spodní části parogenerátoru, otáčí se a nad trubkovnicí se vypařuje. Okolo 25 % sekundárního média se změní na páru při každém průchodu generátorem, ten zbytek je recirkulovaný. Kontrolovaný tlak na sekundární straně je mezi 5 až 7 MPa. Primární médium teče skrz U-trubky o tlaku okolo 15 MPa. Teplota média u vstupu je okolo 320 °C a na výstupu cca 288 °C. [19] [20]



Obrázek 8 Řez vertikálním typem parogenerátoru [17]

Z důvodu snížení ztrát napájecí vody jsou některé recirkulační parogenerátory vybaveny přehříváči, které jsou v oddělené části parogenerátoru blízko výstupu primární vody. Napájecí voda proudí do přehříváče přes trysku umístěnou ve spodní části nádoby. Používá se zde teplo primární vody odcházející z parogenerátoru na přehřátí napájecí vody, předtím než se smíchá s recirkulovanou vodou.

I u vertikálních parogenerátorů dochází k usazování nečistot, zde na vnějším povrchu trubek těsně nad trubkovnicí. Jedná se o usazování kalů z oxidů železa, jejichž koncentrace roste při vypařování. Na rozdíl od horizontálních parogenerátorů zde nejde odvádět kal odluhem, jelikož by neprošel přes příliš vtěsnané teplosměnné trubky. Proto nemůžeme použít austenitické oceli, jelikož by se na trubkách tvořila koroze. Z toho důvodu se u těchto typů parogenerátorů používá niklových ocelí, například Incoloy 800 nebo Inconel 690.

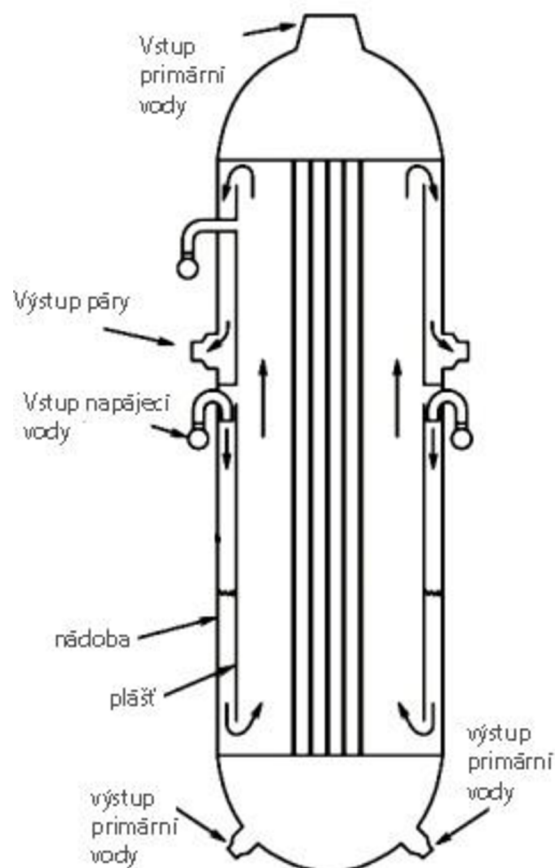
Tyto parogenerátory byly projektovány na 30-40 let provozu. Nicméně po 15 až 25 letech komerčního fungování se začala jejich spolehlivost zhoršovat. Trubky parního generátoru a další komponenty předčasně degradovaly například z důvodu vibrací, oděrů, vysokocyklové únavy a korozi. Tyto problémy jsou velmi rozšířené. Bez přísného dodržování údržby mohou vlastníci parogenerátorů očekávat jeden nebo i více z výše uvedených problémů. [19] [20]

2.2.2 Parogenerátor OTSG

Parogenerátory OTSG jsou menší než ostatní parogenerátory, protože nejsou vybaveny separátory vlhkosti. Primární médium se zde pohybuje v trubkách ze shora dolů, zatímco sekundární jde na vnější straně trubek protiproudově k tomuto ze spodu nahoru. Sekundární voda vstupuje do napájecího prstence nad devátou úrovní nosné desky pro trubky, kde se smísí s párou odsátou z oblasti svazku trubek a přehřeje se na nasycení. Nasycená voda stéká po mezikruží, přes spodní trubkovou vrstvu a nahoru ve svazku trubek, kde se přeměňuje v páru. Tato přehřátá pára putuje po mezikruží k části pro výstup páry. Specifické pro tento parogenerátor je, že téměř všechna sekundární voda se kompletně vypaří v jediném průchodu parogenerátorem.

Trubky OTSG procházejí odlišným způsobem tepelného zpracování. Jedná se o vysoké teploty žhání (1065 °C) s následným udržováním parogenerátoru na 620 °C po montáži na dobu deseti hodin. Tento proces poskytuje úlevu od zbytků napětí v trubkách a vede k velkému množství mezikrystalových karbidů. Díky tomuto procesu jsou trubky OTSG parogenerátoru vysoce odolné vůči koroznímu praskání z napětí primární vody. Ovšem toto zpracování způsobuje vyčerpání chromu v zrně, díky čemuž je jak primární, tak sekundární strana náchylná k napadení sírou.

Parogenerátory OTSG používají stejné niklové oceli pro trubky jako recirkulační parogenerátory. Ovšem u tohoto typu parogenerátorů bylo zaznamenáno podstatně méně poruch trubek. Nižší poruchovost se připisuje rozdílům v konstrukci, výrobě a také provozu



Obrázek 9 Příklad parogenerátoru OTSG [21]

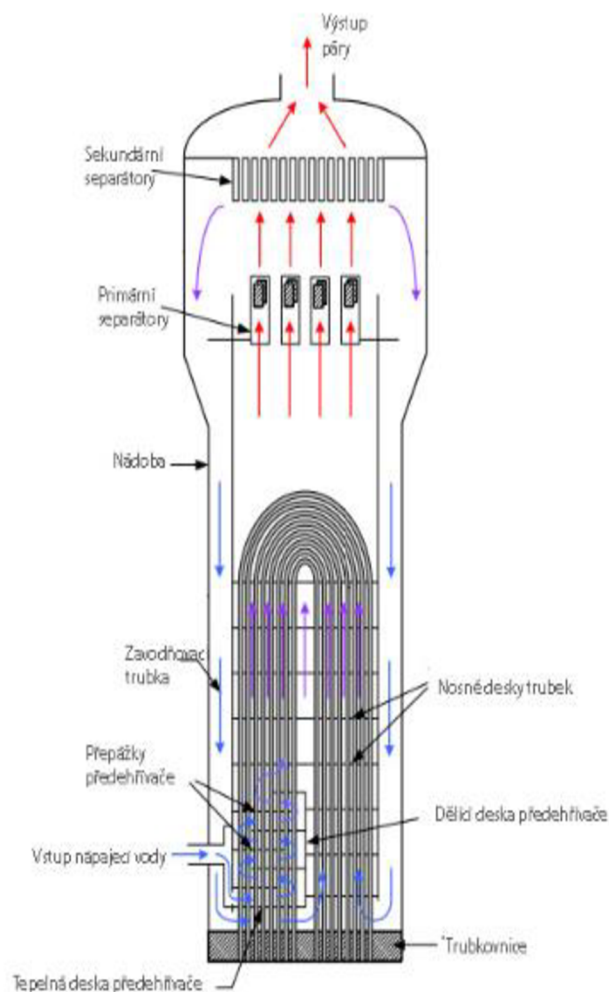
parního generátoru. Jedním z možných poškození je erozní koroze, která je výsledkem pevných částic dopadajících na kovový povrch materiálu, což způsobuje opotřebení a mechanické poškození. Proces eroze nejprve odstraní ochrannou fólii z trubky, díky čemuž se trubka stane náchylná ke korozi. Kontrola vyjmutých trubek ukazuje, že zde dochází k erozní korozi na vnější straně trubek, hlavně kolem čtrnácté nosné desky. Ovšem poškození trubek pro všechny parogenerátory OTSG erozní korozi nastává zřídka. Mnoho chemických procesů u OTSG parogenerátorů neprobíhá stejně jako u recirkulačních. [19] [22]

2.2.3 Parogenerátor reaktoru CANDU

CANDU je zkratka pro CANada Deuterium Uranium. Jak již název vypovídá jedná se o kanadské reaktory, kde se jako médium používá takzvaná těžká voda (D_2O) a přírodní, tedy neobohacený Uran jako palivo. Mezi nedostatky těchto reaktorů patří množství těžké vody potřebné k provozu. Reaktory CANDU se dají nalézt po celém světě, například v Koreji, Rumunsku a Argentině. Na každý reaktor CANDU se používají 4 vertikálně uložené parogenerátory složené z 1800 trubek.

I když velikost parogenerátorů CANDU vzrostla, stále se jedná o obecně menší parogenerátory v poměru k PWR parogenerátorům. Pracují také s nižšími teplotami vstupujícího primárního média (290 °C až 310 °C). Nižší teploty obvykle prodlužují aktivaci korozních procesů. Jako je například korozní praskání působením primární vody a nebo mezikrystalové korozní praskání.

Jelikož primárním médiem je těžká voda, používají se zde trubky relativně malých velikostí (průměr 15,9 mm). Menší velikost primární hlavy a trubek zvyšuje obtížnost provádění údržby, jako je kontrola trubek, jejich vyjmutí a připojení. Jmenovitá tloušťka stěny trubky se pohybuje od 1,13 mm do 1,2 mm v závislosti na materiálu trubky, například slitina 800M má nižší tepelnou vodivost než slitina 600 vyžadující tenčí trubky. [19][22]



Obrázek 10 Parogenerátor CANDU [22]

3 Koncepční řešení parogenerátoru pro JE pro zadané parametry

Pro horizontální parogenerátory se svislými kolektory primární vody je výhodou možnost použít ocel 08Ch18N10T jako materiál teplosměnných trubek. Také střední rychlost média v sekundárním okruhu (až 0,5 m/s) je výhodou horizontálních parogenerátorů, jelikož zabraňuje vibracím teplosměnných trubek. Byla ověřena provozuschopnost těchto trubek na 38let u parogenerátorů VVER 440 a 23let u VVER 1000. Tato ocel je levnější, než niklové slitiny vertikálních parogenerátorů. Tyto slitiny se u svislých parogenerátorů používají z důvodu zabránění koroze trubek nad trubkovnicí. Mezi výhody horizontálních parogenerátorů patří také vertikální uspořádání kolektorů primárního okruhu, které zabraňuje hromadění usazenin kalu na jejich površích, čímž se snižuje nebezpečí poškození výměníku tepla korozí. Další výhodou horizontálních parogenerátorů je snadnější výroba. Také otvory pro trubky se vrtají snadněji do relativně tenkých svislých kolektorů, než do silných vodorovných trubkovnic.

Nevýhodou horizontálních parogenerátorů je jejich velká půdorysná plocha, díky čemuž je obtížné jejich umístění v ochranné obálce (kontejnmentu). Vertikální typ parogenerátorů je výhodnější pro parogenerátory s většími elektrickými výkony než 250 MW na jeden parogenerátor. Z hlediska spolehlivosti není mezi těmito koncepcemi rozdíl. [22][23]

Po zhodnocení všech hledisek jsem se rozhodl pro parogenerátor horizontální kvůli jeho výhodám, zejména kvůli možnosti použít ocel 08Ch18N10T jako materiál teplosměnných trubek.

3.1 Zadané parametry

Tepelný výkon předaný v I. okruhu do 1 PG	$Q_{PG} = 803$ [MWt]
Teplota I. okruhu vstup do PG	$t_{I1} = 328,9$ [°C]
Teplota I. okruhu výstup z PG	$t_{I2} = 298,2$ [°C]
Tlak v I. okruhu	$P_I = 16,2$ [MPa]
Teplota napájecí vody	$t_{nv} = 225$ °C
Tlak na parní straně PG	$P_{PPG} = 7$ MPa
Výstupní suchost páry	$x = 1$

Střední teplota primárního média

Tato teplota je nutná k určení tepelných charakteristik I. média a je důležitou součástí pro výpočet přestupu tepla mezi I. médiem a teplosměnnou trubkou.

$$t_{stř} = \frac{t_{I1} + t_{I2}}{2} \text{ [°C]} \quad (4.1)$$

$$t_{stř} = \frac{328,9 + 298,2}{2} = 313,55 \text{ [°C]}$$

Charakteristiky I. média při jeho střední teplotě a tlaku 16,2 MPa

Hustota	$\rho = 699,41$	[kg·m ⁻³]
Měrný objem	$v = 0,00142$	[m ³ ·kg ⁻¹]
Kinematická viskozita	$\nu = 0,199 \cdot 10^{-6}$	[m ² ·s ⁻¹]
Dynamická viskozita	$\eta = 8,366 \cdot 10^{-5}$	[N·s·m ⁻²]
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,538$	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Prandtlovo číslo	$Pr = 0,931$	[-]

Entalpie I. média

Entalpie I. média na vstupu do PG	$i_{11} = 1507,8558$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
Entalpie I. média na výstupu z PG	$i_{12} = 1327,2883$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$

Entalpie II. média

Entalpie syté kapaliny	$i' = 1267,4372$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
Entalpie syté páry	$i'' = 2772,5692$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
Entalpie napájecí vody	$i_{nv} = 967,92122$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$

3.2 Počet teplosměnných trubek a celková průtočná plocha

Důležitou součástí pro tento výpočet je volba materiálu a základních rozměrů trubek. Pro nadcházející výpočty jsou zvoleny trubky o $\varnothing 16 \times 1,5$ mm, které budou vyrobené z materiálu 08Ch18N10T.

Zvolené parametry

Vnitřní průměr trubky	$d_1 = 13$	$[\text{mm}]$
Vnější průměr trubky	$d_2 = 16$	$[\text{mm}]$
Teoretická střední rychlost proudění I. média	$w_v = 4,5$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

Hmotnostní tok I. média

$$m_1 = \frac{Q_{PG}}{i_{11} - i_{12}} [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4.2)$$

$$m_1 = \frac{803}{1507,8588 - 1327,2883} = 4447,0904 [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Celková teoretická průtočná plocha

$$S = \frac{m_1}{w_v \cdot \rho} [\text{m}^2] \quad (4.3)$$

$$S = \frac{4447,0904}{4,5 * 699,41} = 1,413 [\text{m}^2]$$

Průtočná plocha jedné trubky

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} [\text{m}^2] \quad (4.4)$$

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,013^2}{4} = 0,001 [\text{m}^2]$$

Teoretický počet trubek

$$n = \frac{S}{S_{tr}} \quad (4.5)$$

$$n = \frac{1,413}{0,001} = 10646$$

Skutečný počet trubek

Z důvodu zanášení a nutnosti zaslepování určité části teplosměnných trubek během provozní činnosti parního generátoru, je nutné zvětšení počtu trubek o 20%.

$$n_{tr} = n \cdot 1,2 \quad (4.6)$$

$$n_{tr} = 10646 \cdot 1,2 = 13036$$

Celková skutečná průtočná plocha

$$S_c = S_{tr} \cdot n_{tr} [m^2] \quad (4.7)$$

$$S_c = 0,0001 \cdot 13036 = 1,73 [m^2]$$

Skutečná rychlost proudění primárního média

$$w = \frac{m_1}{S_c \cdot \rho} [m \cdot s^{-1}] \quad (4.8)$$

$$w = \frac{4447,0904}{1,73 \cdot 699,41} = 3,675 [m \cdot s^{-1}]$$

4 Tepelný výpočet parogenerátoru

Tepelný výpočet slouží pro určení celkové tepelné bilance parogenerátoru. Hodnoty tepelných charakteristik a entalpií jsem získal pomocí programu Xsteam. K výpočtu jsem použil literaturu [15] [25] [26].

4.1 Součinitel přestupu tepla mezi primárním médiem a stěnou trubky

Součinitel přestupu tepla je určen na základě kritériálních rovnic. Prvním krokem je určení Reynoldsova čísla, jehož velikost nám určuje, zda se bude jednat o proudění laminární pro hodnotu Reynoldsova čísla menší než 2300, nebo proudění turbulentní pro Reynoldsovo číslo větší než 2300.

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{w \cdot d_1}{\nu} \quad (4.9)$$

$$Re = \frac{3,675 \cdot 0,013}{0,199 \cdot 10^{-6}} = 244960$$

$Re > 2300 \rightarrow$ jedná se o proudění turbulentní.

Teoretická střední teplota stěny trubky

$$t_{tst} = \frac{t_{stř} + t_s}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.10)$$

$$t_{tst} = \frac{313,55 + 285,83}{2} = 299,69 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

t_s [°C] – teplota syté páry v závislosti na tlaku $P_{PPG} = 7$ [MPa]

Nusseltovo kritérium

Pro výpočet Nusseltova kritéria je třeba stanovit, kromě již zmíněného Reynoldsova čísla, také Prandtlovo kritérium, které se určuje v závislosti na středních teplotách I. média a stěny trubky.

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{tst}} \right)^{0,25} \quad (4.11)$$

Pr [-] – Prandtlovo kritérium pro střední teplotu I. média

$$t_{stř} = 313,55 \text{ [}^\circ\text{C]}, Pr = 0,931 \text{ [-]}$$

Pr_{tst} [-] – Prandtlovo kritérium pro střední teplotu stěny trubky

$$T_{tst} = 299,69 \text{ [}^\circ\text{C]}, Pr = 0,814 \text{ [-]}$$

$$Nu = 0,023 \cdot 244960^{0,8} \cdot 0,931^{0,43} \cdot \left(\frac{0,931}{0,814} \right)^{0,25} = 464,7495$$

Součinitel přestupu tepla mezi I. médii a stěnou trubky

$$\alpha_1 = Nu \cdot \frac{\lambda}{d_1} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (4.12)$$

$$\alpha_1 = 464,7495 \cdot \frac{0,538}{0,013} = 19233,48 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

4.2 Součinitel přestupu tepla mezi stěnou trubky a parovodní směsí

Pro tento výpočet je třeba znát hodnotu tepelného toku. Proto se tato hodnota zpočátku volí a posléze zpětnou kontrolou ověřuje, zda je v požadované toleranci. Požadovaná přesnost je s odchylkou 1 %, pokud by se odhad lišil o více než 1 %, je třeba provést iteraci do doby, kdy dosáhne požadované přesnosti.

Volba hustoty tepelného toku

$$q_v = 135000 [W \cdot m^{-2}]$$

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_2 = \frac{10,45}{3,3 - 0,0113 \cdot (T - 373)} \cdot q_v^{n_{sou}} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (4.12)$$

T [K] – teplota syté páry v závislosti na tlaku $P_{PPG} = 7$ [MPa]

n_{sou} [-] – součinitel pro čistý povrch teplosměnné trubky

$$\alpha_2 = \frac{10,45}{3,3 - 0,0113 \cdot (558,98 - 373)} \cdot 135000^{0,7} = 34020,344 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

4.3 Součinitel prostupu tepla

Teplo postupně prostupuje konvekčně na vnitřní ploše trubky, kondukčně stěnou trubky o tepelné vodivosti λ_{tr} a nakonec opět konvekčně na vnější ploše trubky.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{2 \cdot \lambda_{tr}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2}} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (4.13)$$

λ_{tr} [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] – součinitel tepelné vodivosti trubky pro materiál 08Ch18N10T

$$k = \frac{1}{\frac{1}{19631,8223} \cdot \frac{0,016}{0,013} + \frac{0,016}{2 \cdot 18,69} \cdot \ln \frac{0,016}{0,013} + \frac{1}{34020,3444}}$$

$$k = 5525,9628 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Střední logaritmická teplota

Teplotní rozdíl mezi I. a II. médiem na vstupu

$$\Delta t_1 = t_{I1} - t_s \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.14)$$

$$\Delta t_1 = 328,9 - 285,83 = 45,07 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Teplotní rozdíl mezi I. a II. médiem na výstupu

$$\Delta t_2 = t_{I2} - t_s \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.15)$$

$$\Delta t_2 = 298,2 - 285,83 = 12,37 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.16)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{45,07 - 12,37}{\ln \frac{45,07}{12,37}} = 24,6082 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Zpětná kontrola tepelného toku

$$q = k \cdot \Delta t_{ln} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}\text{]} \quad (4.17)$$

$$q = 5525,9628 \cdot 24,6082 = 135953,998 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}$$

Odchylka tepelného toku

$$\Delta q = \left| \frac{q_v - q}{q} \right| \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4.18)$$

$$\Delta q = \left| \frac{135000 - 135953,998}{135953,998} \right| \cdot 100 = 0,7236 \text{ [%]}$$

Odchylka vychází s požadovanou přesností 1 %.

Kontrola navržené teploty stěny

Teplo sdělené 1m stěny trubky

$$q_1 = q \cdot d_2 \cdot \pi \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1}\text{]} \quad (4.19)$$

$$q_1 = 135983,998 \cdot 0,016 \cdot \pi = 6835,301 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1}\text{]}$$

Povrchová teplota stěny trubky na straně I. média

$$t_{trI} = t_{stř} - \frac{q_1}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.20)$$

$$t_{trI} = 313,55 - \frac{6835,301}{\pi} \cdot \frac{1}{19631,8223 \cdot 0,013} = 305,0248 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Povrchová teplota stěny trubky na straně II. média

$$t_{trII} = t_s + \frac{q_1}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.21)$$

$$t_{trII} = 258,83 + \frac{6835,301}{\pi} \cdot \frac{1}{34020,3444 \cdot 0,016} = 289,8271 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Střední teplota stěny trubky

$$t_{trst} = \frac{t_{trI} + t_{trII}}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.22)$$

$$t_{trst} = \frac{305,0248 + 289,8271}{2} = 297,426 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Relativní chyba volené hodnoty střední teploty stěny trubky

$$\Delta t_{trRel} = \left| \frac{t_{tst} - t_{trst}}{t_{trst}} \right| \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4.23)$$

$$\Delta t_{trRel} = \left| \frac{299,69 - 297,426}{297,426} \right| = 0,3968 \text{ [%]}$$

Odklon je přijatelný.

4.4 Výpočet teplosměnné plochy a střední délky trubky

Celková teplosměnná plocha

$$S_t = \frac{Q_{PG}}{q} \text{ [m}^2\text{]} \quad (4.24)$$

$$S_t = \frac{803000000}{135983,9978} = 5905,1066 \text{ [m}^2\text{]}$$

Celková délka trubek parního generátoru

$$L = \frac{S_t}{\pi \cdot d_2} \text{ [m]} \quad (4.25)$$

$$L = \frac{5905,1066}{\pi \cdot 0,016} = 117478 \text{ [m]}$$

Střední délka trubky

$$L_{tr} = \frac{L}{n} \text{ [m]} \quad (4.26)$$

$$L_{tr} = \frac{117478}{10862,4789} = 10,815 \text{ [m]}$$

4.5 Parní a tepelný výkon parogenerátoru

Výparné teplo

$$l_v = i'' - i' \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4.27)$$

$$l_v = 2772,5692 - 1267,4372 = 1505,132 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Parní výkon parního generátoru při teplotě napájecí vody 225 °C

$$G = \frac{Q_{PG}}{l_v + 1,01 \cdot (i' - i_{nv})} \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4.28)$$

$$G = \frac{803000000}{1505,132 + 1,01 \cdot (1267,4372 - 967,9212)} = 444,225 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Vypočítaný tepelný výkon

$$Q_s = G \cdot (i'' - i_{nv}) \text{ [kW]} \quad (4.29)$$

$$Q_s = 444,225 \cdot (2772,5692 - 967,9212) = 801669,388 \text{ [kW]}$$

Odchylka mezi výkony

$$\Delta Q = \left| \frac{Q_{PG} - Q_s}{Q_s} \right| \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4.22)$$

$$\Delta Q = \left| \frac{803000000 - 801669388}{801669388} \right| \cdot 100 = 0,166 \text{ [%]}$$

Odchylka mezi zadaným a vypočteným výkonem je poměrně malá a splňuje požadovanou toleranci.

4.6 Návrh hlavních rozměrů parogenerátoru

Pro hodnoty vypočítané v předešlých bodech byly navrženy rozměry parogenerátoru :

Tlaková nádoba

Vnitřní průměr	4000	[mm]
Celková délka nádoby	14000	[mm]

5 Závěr

Tato bakalářská práce se dělí na část teoretickou a výpočtovou. V úvodu části teoretické probíhá úvod do jaderné energetiky, její základní proces a princip jaderných elektráren. Hlavní pozornost v teoretické části jsem věnoval krátké rešerši různých druhů parogenerátorů. Ke každému typu jsem také napsal pár příkladů.

Část výpočtová začíná koncepčním řešením parogenerátoru, kde se zaměřuji na porovnání parogenerátorů vertikálních a svislých a můj následný koncepční výběr horizontálního parogenerátoru se svislými kolektory primární vody s jeho zdůvodněním. Následuje tepelný výpočet, který vychází ze zadaných parametrů. Jehož výsledky jsou následující: tepelný výkon parogenerátoru byl zadán roven 803 MWe, v primárním okruhu parogenerátoru proudí 4447,09 kg vody za sekundu s rychlostí 3,675 m/s. Parogenerátor tvoří 13036 teplosměnných trubek, které jsou vyrobené z oceli 08Ch18N10T, pro který je součinitel tepelné vodivosti roven 18,69. Délka všech těchto trubek je 117478 m. Celková průtočná plocha tvořena těmito trubkami je 1,73 m². Střední délka jedné trubky vyšla na 11,115 m. Díky výpočtům bylo pomocí Reynoldsova čísla zjištěno, že bude docházet k turbulentnímu proudění. Pro kontrolu byly ověřeny některé hodnoty, jako například tepelný výkon, střední teplota stěny trubky a nebo také tepelný tok. Všechny vypočtené hodnoty se od hodnot navržených nebo zvolených liší v přijatelné přesnosti. Na konec práce jsem navrhl hlavní rozměry parogenerátoru.

Tato práce by mohla sloužit jako podklad pro návrh horizontálního parogenerátoru se svislými kolektory primární vody. Tento typ parogenerátoru jsem zvolil ať už z důvodu mnoha výhod, zmíněných v kapitole 3, tak i proto, že potencionální výrobu by bylo možné uskutečnit v českých firmách. Bývalým zástupcem tohoto odvětví byla u nás firma Vítkovice Power Engineering, která zhotovila parogenerátory VVER 440 pro Dukovany a VVER 100 pro Temelín, které se také řadí mezi tuto kategorii.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Nuclear energy. *National geographic* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/nuclear-energy/>
- [2] *Energetika zblízka* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/charakteristika-zdroje/fyzikalni-zaklady>
- [3] Encyklopedie energetiky: Jaderná energie. *Svět energie* [online]. , 1-124 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/data/web/vzdelavaci-program-cez/tiskoviny/encyklopedie-jaderna-energie-e.pdf>
- [4] *Informační portál* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.informacni-portal.cz/clanek/jaderne-elektrarny>
- [5] Nuclear power plant. *Energy education* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Nuclear_power_plant
- [6] What is a nuclear reactor. *Whatisnuclear* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://whatisnuclear.com/reactors.html>
- [7] *Skupina ČEZ: Jaderná elektrárna Dukovany* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/edu>
- [8] Jaderná elektrárna Dukovany. *Svět energie* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderne-elektrarny-cez/jaderna-elektrarna-dukovany>
- [9] *Energetika zblízka: Mezisklad použitého paliva* [online]. Svět energie [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny-pro-deti/co-vsechno-v-jaderne-elektrarne-najdeme/mezisklad-pouziteho-paliva/jak-to-funguje>
- [10] *Skupina ČEZ: Jaderná elektrárna Temelín* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/ete>
- [11] Energetika zblízka: Jaderná elektrárna Temelín. *Svět energie* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderne-elektrarny-cez/jaderna-elektrarna-temelin>
- [12] Kontejnment reaktoru v JE Temelín splňuje kritéria těsnosti. *ATOM INFO* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2015/08/kontejnment-reaktoru-v-je-temelin-splnuje-kriteria-tesnosti/>
- [13] *SÚJB: Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. , 1-9 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/narodni_zpravy/Priloha1.pdf
- [14] *Katedra energetických strojů a zařízení: Sdílení tepla* [online]. , 1-11 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~kovarikp/TM/cviceni/sdileni.pdf>
- [15] GANAPATHY, V. *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators: Design, Applications, and Calculations* [online]. Abilene, Texas, U.S.A: MARCEL DEKKER, 2003. ISBN 0-8247-0814-8.
- [16] HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren díl 2*. ČVUT Praha, 2005. ISBN 80-01-03189-6

- [17] Jaderná elektrárna podrobně: Parogenerátor. Svět energie: Energetika zblízka [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/parogenerator/vyklad>
- [18] COUFAL, M. *Provozní předpis: P015p*. Jaderná elektrárna dukovany.
- [19] *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generators*. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2011. ISBN 978-92-0-121410-2.
- [20] PETER, J. a N. PAINE, ed. *Steam Generator Reference Book: Revision 1*. EPRI, 1994.
- [21] ZEIGHAMI, A., M. RAHGOSHAY, M. KHALEGHI a Hashemi TILEHNOEE. *Thermal Hydraulic Modeling of Once Through Steam Generator by Two-Fluid U-Tube Steam Generator Code* [online]. Atom Indonesia, 2017 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: doi:10.17146/aij.2017.757
- [22] RIZNIC, Jovica, ed. *Steam Generators for Nuclear Power Plants* [online]. WOODHEAD PUBLISHING, 2017. ISBN 978-0-08-100894-2.
- [23] RAČEK, Jiří a Vysoké učení technické v Brně. *Energetická zařízení: stroje a zařízení jaderných elektráren*. Brno: Zdeněk Novotný, 2004. s. 109. ISBN 80-214-2735-3. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:5cb9f4f0-1570-11e6-9fc8-005056825209>
- [24] ČANČURA, Zdeněk, Jaroslav BROM a Lubomír JUNEK. *Vývoj nové technologie opravy svarových spojů pomocí "weld overlay (WOL)"* [online]. , 1-12 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <http://www.spolky-csvts.cz/cns/news15/wol15.pdf>
- [25] JANEBA, B. a J. KARTÁK. *Tepelné výpočty kotlů a parních generátorů*. ČVUT Praha, 1982.
- [26] ŠADEK, S. a D. GRGIC. Operation and performance analysis of steam generators in nuclear power plants. *ResearchGate: University of Zagreb*. 2017.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
α	Součinitel přestupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
d_1	Vnitřní průměr trubky	$[mm]$
d_2	Vnější průměr trubky	$[mm]$
G	Parní výkon parogenerátoru	$[kg \cdot s^{-1}]$
i'	Entalpie syté kapaliny	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
i''	Entalpie syté páry	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
i_{I1}	Entalpie I. média na vstupu do PG	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
i_{I2}	Entalpie I. média na výstupu do PG	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
i_{nv}	Entalpie napájecí vody	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
k	Součinitel prostupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
λ	Součinitel tepelné vodivosti	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
λ_{tr}	Součinitel tepelné vodivosti trubky	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
L	Celková délka trubek parogenerátoru	$[m]$
L_{tr}	Střední délka trubky	$[m]$
l_v	Výparné teplo	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
m_I	Hmotnostní tok I. média	$[kg \cdot s^{-1}]$
Nu	Nusseltovo kritérium	$[-]$
η	Dynamická viskozita	$[N \cdot s \cdot m^{-2}]$
n	Teoretický počet trubek	$[-]$
n_{sou}	Součinitel pro čistý povrch teplosměnné trubky	$[-]$
n_{tr}	Skutečný počet trubek	$[-]$
P_I	Tlak v I. okruhu	$[MPa]$
P_{PPG}	Tlak na parní straně parogenerátoru	$[MPa]$
Pr	Prandtlovo číslo pro střední teplotu I. média	$[-]$
Pr_{st}	Prandtlovo číslo pro střední teplotu stěny trubky	$[-]$
Q_{PG}	Tepelný výkon předaný v I. okruhu do 1PG	$[MWt]$
Q_s	Vypočítaný tepelný výkon	$[kW]$
ΔQ	Odchylka mezi výkony	$[\%]$
q	Zpětně zkontrolovaný tepelný tok	$[W \cdot m^{-2}]$
q_I	Teplo sdělené 1m stěny trubky	$[W \cdot m^{-1}]$
q_v	Zvolený tepelný tok	$[W \cdot m^{-2}]$
Δq	Odchylka tepelného toku	$[\%]$
ρ	Hustota	$[kg \cdot m^{-3}]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[-]$
S	Celková teoretická průtočná plocha	$[m^2]$
S_c	Celková skutečná průtočná plocha	$[m^2]$
S_t	Celková teplosměnná plocha	$[m^2]$

S_{tr}	Průtočná plocha jedné trubky	$[m^2]$
T	Teplota syté páry v závislosti na tlaku	$[K]$
t_{I1}	Teplota I. okruhu vstup do PG	$[^{\circ}C]$
t_{I2}	Teplota I. okruhu výstup z PG	$[^{\circ}C]$
Δt_1	Teplotní rozdíl mezi I. a II. médiem na vstupu	$[^{\circ}C]$
Δt_2	Teplotní rozdíl mezi I. a II. médiem na výstupu	$[^{\circ}C]$
Δt_{ln}	Střední logaritmický teplotní spád	$[^{\circ}C]$
Δt_{trRel}	Relativní chyba volené hodnoty střední tep. stěny tr.	$[\%]$
t_{nv}	Teplota napájecí vody	$[^{\circ}C]$
t_s	Teplota syté páry v závislosti na tlaku	$[^{\circ}C]$
$t_{stř}$	Střední teplota primárního média	$[^{\circ}C]$
t_{trI}	Povrchová teplota stěny trubky na straně I. média	$[^{\circ}C]$
t_{trII}	Povrchová teplota stěny trubky na straně II. média	$[^{\circ}C]$
t_{trst}	Střední teplota stěny trubky	$[^{\circ}C]$
t_{tst}	Teoretická střední teplota stěny trubky	$[^{\circ}C]$
ν	Kinematická viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
v	Měrný objem	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$
w	Skutečná rychlost proudění I. média	$[m \cdot s^{-1}]$
w_v	Teoretická střední rychlost proudění I. média	$[m \cdot s^{-1}]$
x	Výstupní suchost páry	$[-]$

Zkratka	Význam
<i>CANDU</i>	CANada Deuterium Uranium
<i>I.</i>	Primární
<i>II.</i>	Sekundární
<i>JE</i>	Jaderná Elektrárna
<i>OTSG</i>	Once-Through Steam Generator
<i>PG</i>	ParoGenerátor
<i>PWR</i>	Pressurized Water Reactor
<i>VVER</i>	Vodo Vodjanyj Energetičeskij Reaktor