

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF

PARNÍ GENERÁTOR VYHŘÍVANÝ TEKUTÝM SODÍKEM

STEAM GENERATOR HEATED WITH LIQUID SODIUM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ŠTEFAN KÓŠA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. HUGO ŠEN

BRNO 2008

Abstrakt

Tato závěrečná práce se týká návrhu parního generátoru (sekunárního výměníku) pro rychlý množivý reaktor. Práce zahrňuje návrh projektové varianty, tepelný, hydraulický a pevnostní výpočet, dále posouzení navrženého výměníku z hlediska jaderné bezpečnosti. Součástí je i výkresová dokumentace vybraných částí.

Klíčová slova: parní generátor, tepelný výměník, tekutý sodík, rychlý množivý reaktor

Abstract

This bachelor's thesis is concerned with engineering a steam generator (secondary heat exchanger) for a fast breeder reactor. It includes proposal of the projected type, thermal, hydraulic and strenght calculation, and examination of a proposal in light of nuclear safety. It contains a lay-out of selected parts.

Keywords: steam generator, heat exchanger, liquid sodium, fast breeder reactor

Bibliografická citace závěrečné práce

KÓŠA, Š. *Parní generátor vyhříváný tekutým sodíkem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 49 s. Vedoucí závěrečné práce Ing. Hugo Šen.

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, bez cizí pomoci. Vycházel jsem při tom ze svých znalostí, odborných konzultací a z doporučené literatury uvedené v seznamu.

V Brně 22. května 2008

.....
Štefan Kóša

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Hugovi Šenovi za obětavou pomoc a poskytnutí cenných informací při vypracování mé bakalářské práce.

.....
Štefan Kóša

OBSAH

1. SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ.....	6
2. ÚVOD.....	8
3. NÁVRH KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ.....	10
4. TEORETICKÉ ZÁKLADY VÝPOČTU.....	13
4.1 Tepelný výpočet.....	13
4.2 Hydraulický výpočet.....	14
4.3 Pevnostní výpočet.....	14
5. TEPELNÝ VÝPOČET PARNÍHO GENERÁTORU.....	15
5.1 Výpočet hmotnostního průtoku vody a sodíku v PG.....	15
5.1.1 Teploty a entalpie na straně vody a páry.....	15
5.1.2 Hmotnostní průtok vody a páry v PG.....	15
5.1.3 Tepelné výkony článků výparníku.....	16
5.1.3.1 Tepelný výkon článku ekonomizéru.....	16
5.1.3.2 Tepelný výkon článku výparníku.....	16
5.1.3.3 Tepelný výkon článku přehříváku.....	16
5.1.4 Teploty a entalpie na straně sodíku.....	17
5.1.5 Hmotnostní průtok sodíku v PG.....	17
5.1.6 Souhrn teplot a entalpií v jednotlivých bodech PG.....	17
5.2 Výpočet délky článku ekonomizéru.....	18
5.2.1 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně vody v ekonomizéru.....	18
5.2.2 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně sodíku v ekonomizéru.....	18
5.2.3 Výpočet součinitele prostupu tepla v ekonomizéru.....	19
5.2.4 Logaritmický teplotní rozdíl v ekonomizéru.....	19
5.2.5 Délka ekonomizéru.....	19

5.3 Výpočet délky článku výparníku.....	20
5.3.1 Výpočet kritické suchosti páry ve výparníku.....	20
5.3.2 Teplota a entalpie páry v místě kritické suchosti.....	20
5.3.3 Tepelné výkony částí s bublinkovým a blánovým varem.....	20
5.3.3.1 Tepelný výkon části s bublinkovým varem.....	20
5.3.3.2 Tepelný výkon části s blánovým varem.....	20
5.3.4 Teplota a entalpie sodíku v místě kritické suchosti.....	20
5.3.5 Výpočet délky části výparníku s bublinkovým varem.....	21
5.3.5.1 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně páry v části výparníku s bublinkovým varem.....	21
5.3.5.2 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně sodíku v části výparníku s bublinkovým varem.....	21
5.3.5.3 Výpočet součinitele prostupu tepla v části výparníku s bublinkovým varem.....	22
5.3.5.4 Logaritmický teplotní rozdíl v části výparníku s bublinkovým varem.....	22
5.3.5.5 Délka části výparníku s bublinkovým varem.....	22
5.3.6 Výpočet délky části výparníku s blánovým varem.....	22
5.3.6.1 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně páry v části výparníku s blánovým varem.....	22
5.3.6.2 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně sodíku v části výparníku s blánovým varem.....	23
5.3.6.3 Výpočet součinitele prostupu tepla v části výparníku s blánovým varem.....	24
5.3.6.4 Logaritmický teplotní rozdíl v části výparníku s blánovým varem.....	24
5.3.6.5 Délka části výparníku s blánovým varem.....	24
5.3.7 Celková délka výparníku.....	24
5.4 Výpočet délky článku přehříváku.....	25
5.4.1 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně páry v přehříváku.....	25
5.4.2 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně sodíku v přehříváku.....	25
5.4.3 Výpočet součinitele prostupu tepla v přehříváku.....	26
5.4.4 Logaritmický teplotní rozdíl v přehříváku.....	26
5.4.5 Délka přehříváku.....	26
5.5 Souhrn výsledků tepelného výpočtu.....	27

6. HYDRAULICKÝ VÝPOČET PARNÍHO GENERÁTORU.....	28
6.1 Tlakové ztráty na straně sodíku.....	28
6.1.1 Tlaková ztráta v příváděcím potrubí sodíku.....	28
6.1.1.1 Tlaková ztráta třením v příváděcím potrubí sodíku.....	28
6.1.1.2 Tlaková ztráta místními odpory v příváděcím potrubí sodíku.....	28
6.1.1.3 Celková tlaková ztráta příváděcího potrubí sodíku.....	28
6.1.2 Tlaková ztráta v přehříváku na straně sodíku.....	29
6.1.2.1 Tlaková ztráta třením v přehříváku na straně sodíku.....	29
6.1.2.2 Tlaková ztráta místními odpory v přehříváku na straně sodíku.....	29
6.1.2.3 Celková tlaková ztráta přehříváku na straně sodíku.....	29
6.1.3 Tlaková ztráta v převáděcím potrubí sodíku z přehříváku do výparníku.....	29
6.1.3.1 Tlaková ztráta třením v převáděcím potrubí sodíku z přehříváku do výparníku.....	29
6.1.3.2 Tlaková ztráta místními odpory v převáděcím potrubí sodíku z přehříváku do výparníku.....	30
6.1.3.3 Celková tlaková ztráta převáděcího potrubí sodíku z přehříváku do výparníku.....	30
6.1.4 Tlaková ztráta ve výparníku na straně sodíku.....	30
6.1.4.1 Tlaková ztráta třením ve výparníku na straně sodíku.....	30
6.1.4.2 Tlaková ztráta místními odpory ve výparníku na straně sodíku.....	31
6.1.4.3 Celková tlaková ztráta výparníku na straně sodíku.....	31
6.1.5 Tlaková ztráta v převáděcím potrubí sodíku z výparníku do ekonomizéru.....	31
6.1.5.1 Tlaková ztráta třením v převáděcím potrubí sodíku z výparníku do ekonomizéru.....	31
6.1.5.2 Tlaková ztráta místními odpory v převáděcím potrubí sodíku z výparníku do ekonomizéru.....	32
6.1.5.3 Celková tlaková ztráta převáděcího potrubí sodíku z výparníku do ekonomizéru.....	32
6.1.6 Tlaková ztráta v ekonomizéru na straně sodíku.....	32
6.1.6.1 Tlaková ztráta třením v ekonomizéru na straně sodíku.....	32
6.1.6.2 Tlaková ztráta místními odpory v ekonomizéru na straně sodíku.....	32
6.1.6.3 Celková tlaková ztráta ekonomizéru na straně sodíku.....	33
6.1.7 Tlaková ztráta v odváděcím potrubí sodíku.....	33
6.1.7.1 Tlaková ztráta třením v odváděcím potrubí sodíku.....	33
6.1.7.2 Tlaková ztráta místními odpory v odváděcím potrubí sodíku.....	33
6.1.7.3 Celková tlaková ztráta odváděcího potrubí sodíku.....	34
6.1.8 Celková tlaková ztráta na straně sodíku.....	34

6.2 Tlakové ztráty na straně vody a páry.....	34
6.2.1 Tlaková ztráta v přiváděcím potrubí vody.....	34
6.2.1.1 Tlaková ztráta třením v přiváděcím potrubí vody.....	34
6.2.1.2 Tlaková ztráta místními odpory v přiváděcím potrubí vody.....	34
6.2.1.3 Celková tlaková ztráta přiváděcího potrubí vody.....	34
6.2.2 Tlaková ztráta v ekonomizéru na straně vody.....	35
6.2.2.1 Tlaková ztráta třením v ekonomizéru na straně vody.....	35
6.2.2.2 Tlaková ztráta místními odpory v ekonomizéru na straně vody.....	35
6.2.2.3 Celková tlaková ztráta ekonomizéru na straně vody.....	35
6.2.3 Tlaková ztráta v převáděcím potrubí vody z ekonomizéru do výparníku.....	36
6.2.3.1 Tlaková ztráta třením v převáděcím potrubí vody z ekonomizéru do výparníku.....	36
6.2.3.2 Tlaková ztráta místními odpory v převáděcím potrubí vody z ekonomizéru do výparníku.....	36
6.2.3.3 Celková tlaková ztráta převáděcího potrubí vody z ekonomizéru do výparníku.....	36
6.2.4 Tlaková ztráta ve výparníku na straně vody a páry.....	37
6.2.4.1 Tlaková ztráta třením ve výparníku na straně vody a páry.....	37
6.2.4.2 Tlaková ztráta místními odpory ve výparníku na straně vody a páry.....	37
6.2.4.3 Celková tlaková ztráta výparníku na straně vody a páry.....	37
6.2.5 Tlaková ztráta v převáděcím potrubí páry z výparníku do přehříváku.....	38
6.2.5.1 Tlaková ztráta třením v převáděcím potrubí páry z výparníku do přehříváku.....	38
6.2.5.2 Tlaková ztráta místními odpory v převáděcím potrubí páry z výparníku do přehříváku.....	38
6.2.5.3 Celková tlaková ztráta převáděcího potrubí páry z výparníku do přehříváku.....	38
6.2.6 Tlaková ztráta v přehříváku na straně páry.....	39
6.2.6.1 Tlaková ztráta třením v přehříváku na straně páry.....	39
6.2.6.2 Tlaková ztráta místními odpory v přehříváku na straně páry.....	39
6.2.6.3 Celková tlaková ztráta přehříváku na straně páry.....	39
6.2.7 Tlaková ztráta v odváděcím potrubí páry.....	40
6.2.7.1 Tlaková ztráta třením v odváděcím potrubí páry.....	40
6.2.7.2 Tlaková ztráta místními odpory v odváděcím potrubí páry.....	40
6.2.7.3 Celková tlaková ztráta odváděcího potrubí páry.....	40
6.2.8 Celková tlaková ztráta na straně vody a páry.....	40
6.3 Souhrn tlakových ztrát parního generátoru.....	41

7. PEVNOSTNÍ VÝPOČET PARNÍHO GENERÁTORU.....	42
7.1 Pevnostní výpočet trubek.....	42
7.1.1 Stanovení dovoleného namáhání trubek.....	42
7.1.2 Výpočet tloušťky stěny teplosměnné trubky.....	42
7.1.3 Výpočet tloušťky stěny obalové trubky.....	42
7.1.4 Výpočet tloušťky stěny přiváděcího, převáděcího a odváděcího potrubí vody a páry.....	43
7.1.5 Výpočet tloušťky stěny přiváděcího, převáděcího a odváděcího potrubí sodíku.....	43
7.2 Pevnostní výpočet trubkovnice.....	44
7.2.1 Stanovení dovoleného namáhání trubkovnice.....	44
7.2.2 Výpočet tloušťky trubkovnice.....	44
7.2.3 Kontrola trubkovnice na technologická hlediska.....	44
8. POSOZENÍ PG Z HLEDISKA JADERNÉ BEZPEČNOSTI.....	45
9. ZÁVĚR.....	46
10. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	47
11. SEZNAM PŘÍLOH.....	48
12. PŘÍLOHY.....	49

1. Seznam použitých značek a symbolů

označení	název	jednotka
p	tlak	[MPa]
m	počet větví parního generátoru	[-]
n	počet teplosměnných trubek v jedné větve parního generátoru	[-]
D	vnější průměr potrubí	[m]
s	síla stěny potrubí	[m]
d	vnitřní průměr potrubí	[m]
S	průtoční průřez	[m ²]
t	teplota	[°C]
i	entalpie	[kJ/kg]
\dot{Q}	tepelný výkon	[MW]
\dot{m}	hmotnostní průtok	[kg/s]
c	měrná tepelná kapacita	[kJ/kg · K]
ρ	hustota	[kg/m ³]
η	dynamická viskozita	[Pa · s]
ν	kinematická viskozita	[m ² /s]
λ	tepelná vodivost	[W/m · K]
Pr	Prandtlovo číslo	[-]
w	rychlost proudění	[m/s]
\dot{V}	objemový průtok	[m ³ /s]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
Pe	Peckletovo číslo	[-]
α	součinitel přestupu tepla	[W/m ² · K]
u	tloušťka nánosů	[m]
K	součinitel prostupu tepla	[W/m ² · K]
Δt_{\ln}	logaritmický teplotní rozdíl	[°C]
l	délka článku	[m]
x	suchost páry	[-]
q	měrný tepelný tok	[W/m ²]
v	měrný objem	[m ³ /kg]
ε	drsnota potrubí	[m]
λ	součinitel odporu třením	[-]
ξ	součinitel místních odporů	[-]
R	poloměr ohybu trubky	[m]
Δp	tlaková ztráta	[Pa]
ψ	součinitel zohledňující strukturu proudu parovodní směsy	[-]

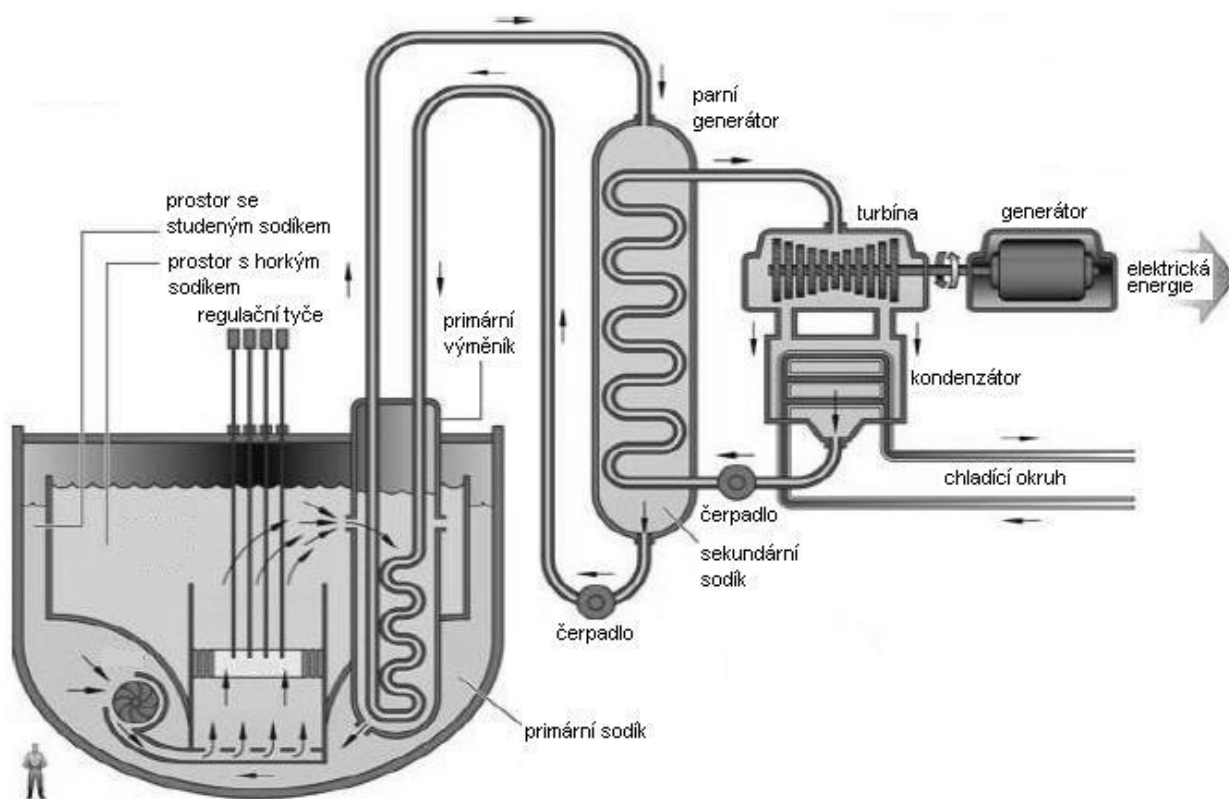
index	popis
1	strana sodíku
2	strana vody a páry
<i>A</i>	v bodě A
<i>B</i>	v bodě B
<i>K</i>	v bodě kritické suchosti páry
<i>C</i>	v bodě C
<i>D</i>	v bodě D
<i>E</i>	v ekonomizéru
<i>V</i>	ve výparníku
<i>P</i>	v přehříváku
<i>přiv</i>	v příváděcím potrubí
<i>přev</i>	v převáděcím potrubí
<i>odv</i>	v odváděcím potrubí
<i>VBu</i>	v části výparníku s bublinkovým varem
<i>VBl</i>	v části výparníku s blánovým varem
'	sytá kapalina
''	sytá pára
<i>t</i>	třením
<i>m</i>	mínstními odpory

2. Úvod

V současné době jedním z největších problémů lidstva je zabezpečení dostatečného množství energie s čím menším dopadem na životní prostředí. Pro nahrazení tepelných elektráren zatím jako nejvhodnější odpověď vidím jaderné elektrárny. Mezi jadernými reaktory které jsou vhodné pro výrobu velkého množství energie jsou jedny z nejvýhodnějších možných reaktorů, které vedle spotřebovaného paliva produkují značné množství plutonia, což je také využitelným zdrojem. Dalším předností takového reaktoru je možnost přehřátí vodní páry. Elektrárny s takovým typem reaktoru jsou většinou tříokruhové:

- primární okruh obsahující sodík, který je integrován v nádobě reaktoru
- sekundární okruh, kde pracovní látkou je také sodík který přenáší teplo z radioaktivního sodíku primárního okruhu do vody v třetím okruhu
- terciální okruh, obsahující vodu a vodní páru (obyčejný RC-cyklus)

Takéto tříokruhové uspořádání je vhodné zejména z hlediska jaderné bezpečnosti, neboť sekundární okruh zabraňuje vniknutí vody přímo do radioaktivního sodíku.



obr. 2.1 Schéma jaderné elektrárny s množivým reaktorem, chlazeným tekutým sodíkem – SFR

(http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/sodium-cooled_fast_reactor.pdf)

Tato práce řeší návrh parního generátoru (sekundárního výměníku) pro takový typ reaktoru.

Tepelný výměník je strojní zařízení, které slouží k předávání tepelné energie z primárního teplotnosného media do sekundárního. Podle základního hlediska se dělí na:

- výměníky, v nichž nedochází ke změně skupenství teplotnosných látek (výměníky jaderných elektráren s plynovou turbínou, primární výměník reaktorů chlazenými tekutými kovy)
- výměníky v nichž dochází ke změně skupenství teplotnosných látek (parní generátor)

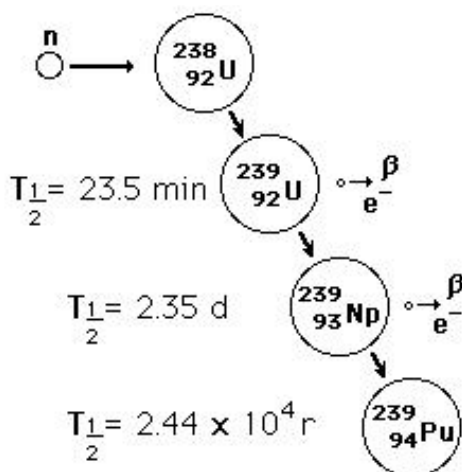
Pod názvem parní generátor se rozumí zařízení sloužící k výrobě páry pro pohon turbin. Vyhřívajícím médiem může být voda, plyn, tekutý kov, nebo slitiny kovů. Obecně parní generátor se skládá z:

- ekonomizéru (dohřívací část vody na teplotu sytosti)
- výparníku (odpařovací část)
- přehříváku

Tyto části mohou být soustředěny v jednom telese, nebo rozděleny na samostatné tepelné aparáty. Parní generátoru v současnosti konstruuji výhradně jako rekuperační výměníky. Z hlediska proudění vody a vodní páry je dělíme na parní generátory s přirozenou cirkulací, nucenou cirkulací a průtlačné.

Součásti parního generátoru musí splnit požadavky na ně kladené, tj. vysokou provozní spolehlivost, ekonomický provoz, životnost a hlavně absolutní bezpečnost. Průměrná životnost má být cca. 30 let, proto je nutné zhodnotit ochranu parního generátoru, a také zabezpečit potřebnou pevnost všech částí.

Konstrukce parního generátoru musí být provedena tak, aby všechny jeho nerozebíratelné spoje tj. svary byly dokonale těsné a zabránily k proniknutí jedné pracovní látky do druhé, což by mohlo způsobit radioaktivní zamoření, korozi, nebo provozní problémy. Zvláště tyto části by měly být snadno dostupné při montáži, likvidaci havárií, provedení potřebných zkušek a kontrol, nebo při průběžné údržbě.



obr. 2.2 Transmutace ${}^{238}\text{U}$ na ${}^{239}\text{Pu}$
(<http://www.3rd1000.com/nuclear/fbre.gif>)

3. Návrh konstrukčního řešení

Pro jaderné elektrárny s reaktorem chlazeným tekutým sodíkem je jedno z nejvýhodnějších řešení parní generátor článkové koncepce. Výhody tohoto uspořádání jsou popsány v literatuře [1], proto volím článkový parní generátor se třemi články: ekonomizér, výparník a přehřívák.

Článkové parní generátory mohou být přímé (voda proudí v teplosměnných trubkách a sodík v mezitrubkovém prostoru), nebo obrácené (sodík uvnitř trubek a voda v mezitrubkovém prostoru). Podle zadání voda má začít přetlak oproti sodíku, proto je z hlediska pevnostního dimenzování výhodnější umístit jí do telosměnných trubek, proto volím přímé uspořádání. Toto uspořádání bylo použito u parního generátoru pro reaktory BOR 60 a BN 350 s dobrými provozními zkušenostmi [1] [2].

Parní generátor se bude skládat z 12 paralelně zapojených větví, které sestávají ze 3 článků. Tyto jednotlivé větve jsou napojeny na vstupní a výstupní komory vody a sodíku ventily, což umožní odstavení jedné větve při havarijních situacích, nebo při údržbě.

Jednotlivé články jsou tvaru ležatého U a jsou zapojeny sériově za sebe. Voda a vodní pára bude proudit uvnitř 37 teplosměnných trubek o rozměrech $\phi 19 \times 3,2$ mm, a obalová trubka sodíku bude o rozměru $\phi 219,1 \times 8$ mm. Rozměry příváděcího, převáděcího a odváděcího potrubí sodíku volím $\phi 88,9 \times 4$ mm a pro stranu vody $\phi 70 \times 9,9$ mm. Délka příváděcího a odváděcího potrubí sodíku bude 3,2 m, délka příváděcího a odváděcího potrubí vody a páry a převáděcího potrubí sodíku bude 0,5 m a délka převáděcího potrubí vody a páry bude 1,21 m. Všechny trubky jsou bezešvé ze žárovečné oceli. Pro materiál trubek volím ocel třídy 14 922 (X20CrMoV12 1) podle normy DIN 17175 a rozměry podle normy DIN 2448. Takové trubky jsou běžně dostupné a technologie výroby takového výměníku je v České republice plně zvládnuta.

	Délka l [m]	Vnější průměr D [mm]	Tloušťka stěny s [mm]	Vnitřní průměr d [mm]
teplosměnná trubka	*	19	3,2	12,6
obalová trubka	*	219,1	8	203,1
příváděcí a odváděcí potrubí sodíku	3,2	88,9	4	80,9
převáděcí potrubí sodíku	0,5	88,9	4	80,9
příváděcí a odváděcí potrubí vody	0,5	70	9,9	50,2
převáděcí potrubí vody	1,21	70	9,9	50,2

tab 3.1 Rozměry trubek parního generátoru [11]

* - určí se z tepelného výpočtu

Průtočné průřezy přívadčícího, převádčícího a odvádčícího potrubí sodíku

$$S_{1přiv} = S_{1přev} = S_{1odv} = m \cdot \frac{\pi \cdot d_{1přiv}^2}{4} = m \cdot \frac{\pi \cdot d_{1přev}^2}{4} = m \cdot \frac{\pi \cdot d_{1odv}^2}{4} = 12 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0809^2}{4} = \underline{\underline{0,0617m^2}}$$

Průtočné průřezy sodíku v ekonomizéru, výparníku a přehříváku

$$S_1 = m \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_1^2}{4} - n \cdot \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \right) = 12 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0,2031^2}{4} - 37 \cdot \frac{\pi \cdot 0,019^2}{4} \right) = \underline{\underline{0,2629m^2}}$$

Průtočný průřez sodíku v jedné větve parního generátoru

$$S_1^{větv} = \frac{S_1}{m} = \frac{0,2629}{12} = \underline{\underline{0,0219m^2}}$$

Hydraulický průměr v ekonomizéru, výparníku a přehříváku

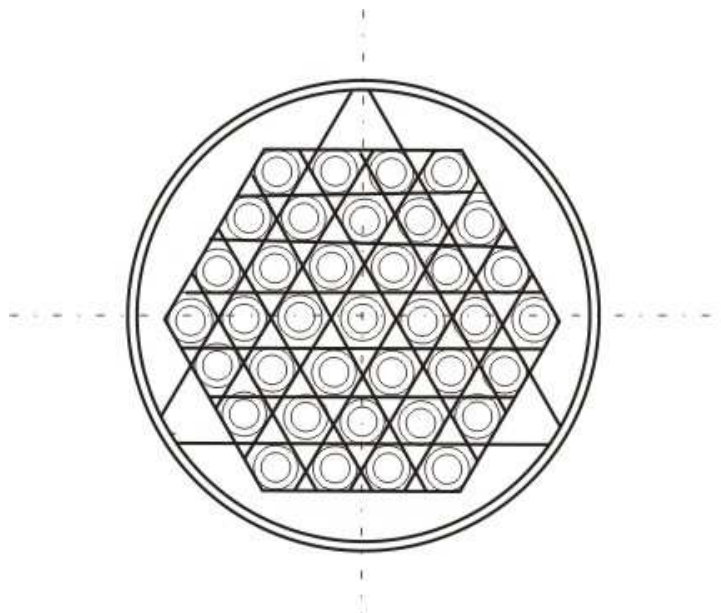
$$d_h = \frac{4 \cdot S_1^{větv}}{O} = \frac{4 \cdot S_1^{větv}}{\pi \cdot d_1 + n \cdot \pi \cdot D_2} = \frac{4 \cdot 0,0219}{\pi \cdot 0,2031 + 19 \cdot \pi \cdot 0,019} = \underline{\underline{0,031m}}$$

Průtočné průřezy přívadčícího, převádčícího a odvádčícího potrubí vody a páry

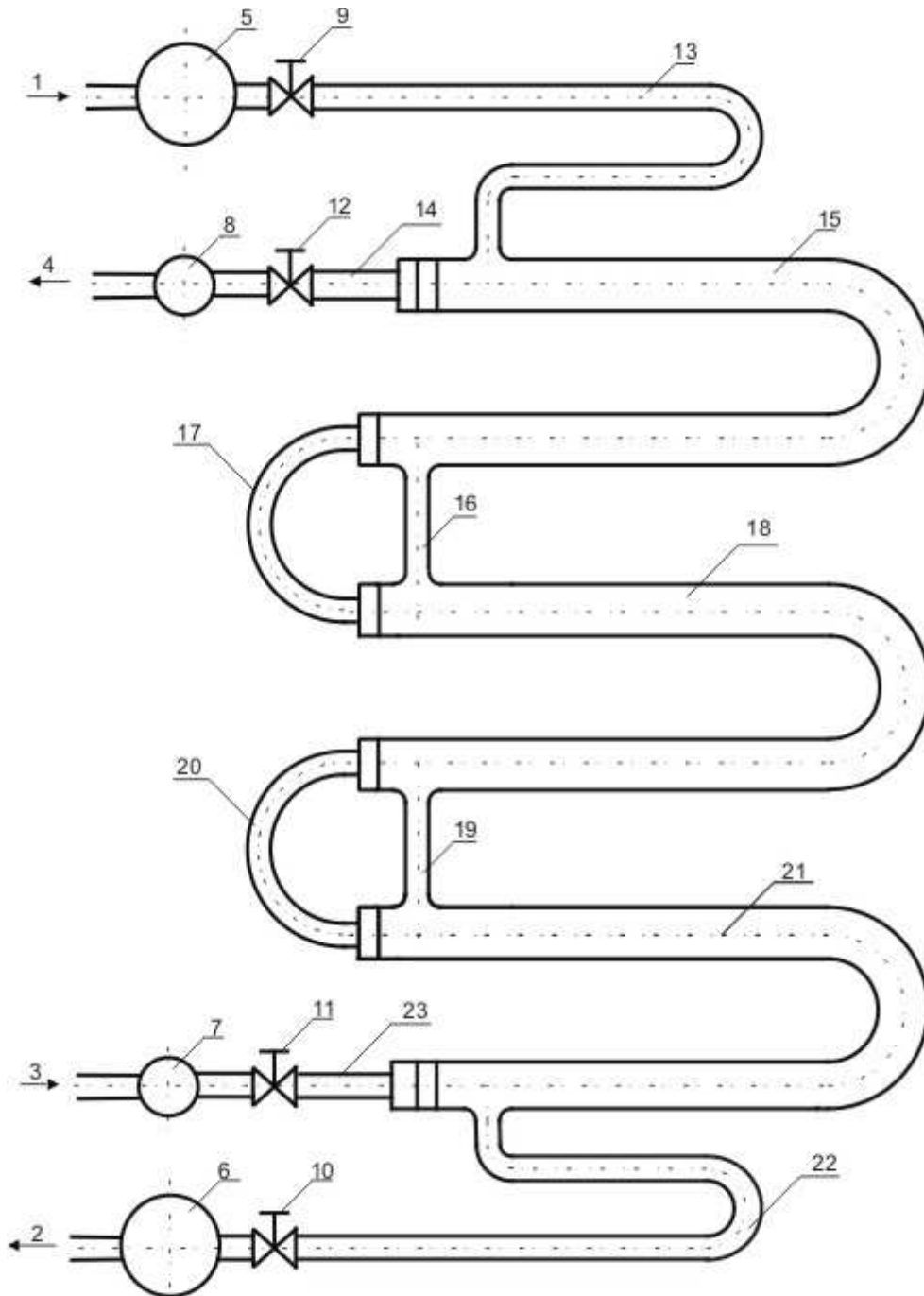
$$S_{2přiv} = S_{2přev} = S_{2odv} = m \cdot \frac{\pi \cdot d_{2přiv}^2}{4} = m \cdot \frac{\pi \cdot d_{2přev}^2}{4} = m \cdot \frac{\pi \cdot d_{2odv}^2}{4} = 12 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0502^2}{4} = \underline{\underline{0,0462m^2}}$$

Průtočné průřezy vody a páry v ekonomizéru, výparníku a přehříváku

$$S_2 = m \cdot n \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = 12 \cdot 37 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0126^2}{4} = \underline{\underline{0,0554m^2}}$$



obr. 3.1 Řez článkem parního generátoru



obr. 3.2 Koncepce článkového parního generátoru

- | | |
|---|----------------------------------|
| 1 – vstup sodíku | 13 – příváděcí potrubí sodíku |
| 2 – výstup sodíku | 14 – odváděcí potrubí páry |
| 3 – vstup napájecí vody | 15 – článek přehříváku |
| 4 – výstup přehřáté páry | 16 – 1. převáděcí potrubí sodíku |
| 5 – vstupní komora sodíku | 17 – 2. převáděcí potrubí páry |
| 6 – výstupní komora sodíku | 18 – článek výparníku |
| 7 – komora napájecí vody | 19 – 2. převáděcí potrubí sodíku |
| 8 – komora přehřáté páry | 20 – 1. převáděcí potrubí vody |
| 9 – uzavírací ventil vstupního sodíku | 21 – článek ekonomizéru |
| 10 – uzavírací ventil výstupního sodíku | 22 – odváděcí potrubí sodíku |
| 11 – uzavírací ventil vstupní vody | 23 – příváděcí potrubí vody |
| 12 – uzavírací ventil výstupní páry | |

4. Teoretické základy výpočtu

4.1 Tepelný výpočet

Tepelný výpočet určí délky jednotlivých článků, vztahy pro výpočet jsou z literatury [2]. Vychází ze zadaných hodnot celkového tepelného výkonu, pracovního tlaku a teplot.

Ze zadaného výkonu a entalpie se vypočítá hmotnostní průtok vody, tepelné výkony jednotlivých článků a hmotnostní průtok sodíku podle rovnice:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot (i_1 - i_2) \quad [\text{kg/s}] \quad (1)$$

K určení Nusseltova čísla na straně vody byl použit vztah:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot C_f \quad [-] \quad (2)$$

a na straně sodíku:

$$Nu = 4,3 + 0,025 \cdot Pe^{0,8} \quad [-] \quad (3)$$

kde

$$Pe = Re \cdot Pr \quad [-] \quad (4)$$

Součinitel přestupu tepla jak na straně vody a páry tak i na straně sodíku se určí ze vztahu:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}] \quad (5)$$

Z vypočtených součinitelů přestupu tepla se určí součinitel prostupu tepla:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d}{d_1} + \frac{d}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d}{2 \cdot \lambda_u} \cdot \ln \frac{d'_2}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{d}{d_2}} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}] \quad (6)$$

Délka článku se vypočítá ze vztahu:

$$\dot{Q} = K \cdot S \cdot \Delta t_{\text{ln}} = K \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot \Delta t_{\text{ln}} \Rightarrow l = \frac{\dot{Q}}{K \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot d \cdot \Delta t_{\text{ln}}} \quad [\text{m}] \quad (7)$$

kde

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (8)$$

4.2 Hydraulický výpočet

Hydraulický výpočet určí tlakové ztráty třením v trubkách a místními odpory na obou stranách. Vztahy jsou z literatury [5].

Pomocí Reynoldsova kritéria a poměru drsnosti a průměru trubky z Moodyho diagramu se určí součinitel ztráty třením:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Re} = \\ \frac{\varepsilon}{d} = \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda \quad [-] \quad (9)$$

pak tlaková ztráta třením se vypočítá pomocí vztahu:

$$\Delta p_t = \frac{\lambda \cdot l \cdot w^2 \cdot \rho}{2 \cdot d} \quad [Pa] \quad (10)$$

Tlaková ztráta místními odpory se určí ze vztahu:

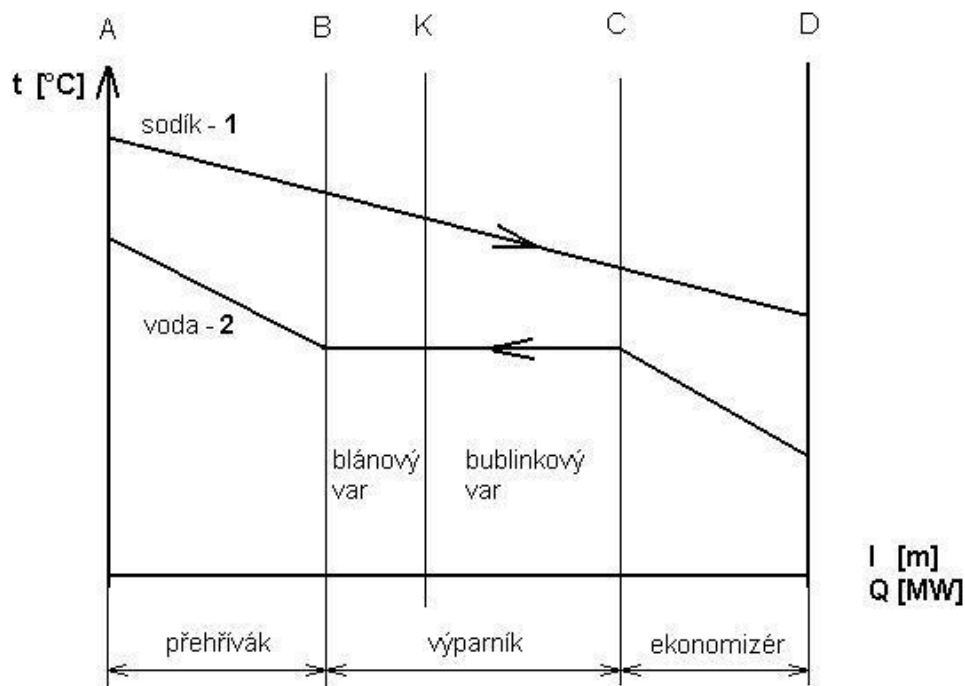
$$\Delta p_m = \Sigma \xi \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2} \quad [Pa] \quad (11)$$

kde $\Sigma \xi$ je součet součinitelů ztrát místních odporů.

4.3 Pevnostní výpočet

Pevnostní výpočet je proveden jako kontrolní, dle ČSN 69 0010. V praxi se tato norma nesmí používat pro návrh jaderných zařízení, ale je vhodná pro návrh hlavních rozměrů v prvním přiblížení.

5. Tepelný výpočet parního generátoru



obr. 3.1 Průběh teplot v člancích parního generátoru

5.1 Výpočet hmotnostního průtoku vody a sodíku v PG

5.1.1 Teploty a entalpie na straně vody a páry

$$\left. \begin{aligned} t_2^A &= 565^\circ\text{C} \\ t_2^B &= 350^\circ\text{C} \\ t_2^C &= 350^\circ\text{C} \\ t_2^D &= 180^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} \quad [8]$$

je volena z hlediska optimální účinnosti RC cyklu

$$\left. \begin{aligned} i_2^A &= 3476 \text{ kJ/kg} \\ i_2^B &= 2565 \text{ kJ/kg} \\ i_2^C &= 1670 \text{ kJ/kg} \\ i_2^D &= 771 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \right\} \quad [8]$$

5.1.2 Hmotnostní průtok vody a páry v PG

$$\dot{Q} = \dot{m}_2 \cdot (i_2^A - i_2^D) \Rightarrow \dot{m}_2 = \frac{\dot{Q}}{(i_2^A - i_2^D)} = \frac{40 \cdot 10^6}{(3476 - 771) \cdot 10^3} = \underline{\underline{14,79 \text{ kg/s}}}$$

5.1.3 Tepelné výkony článků výparníku

5.1.3.1 Tepelný výkon článku ekonomizéru

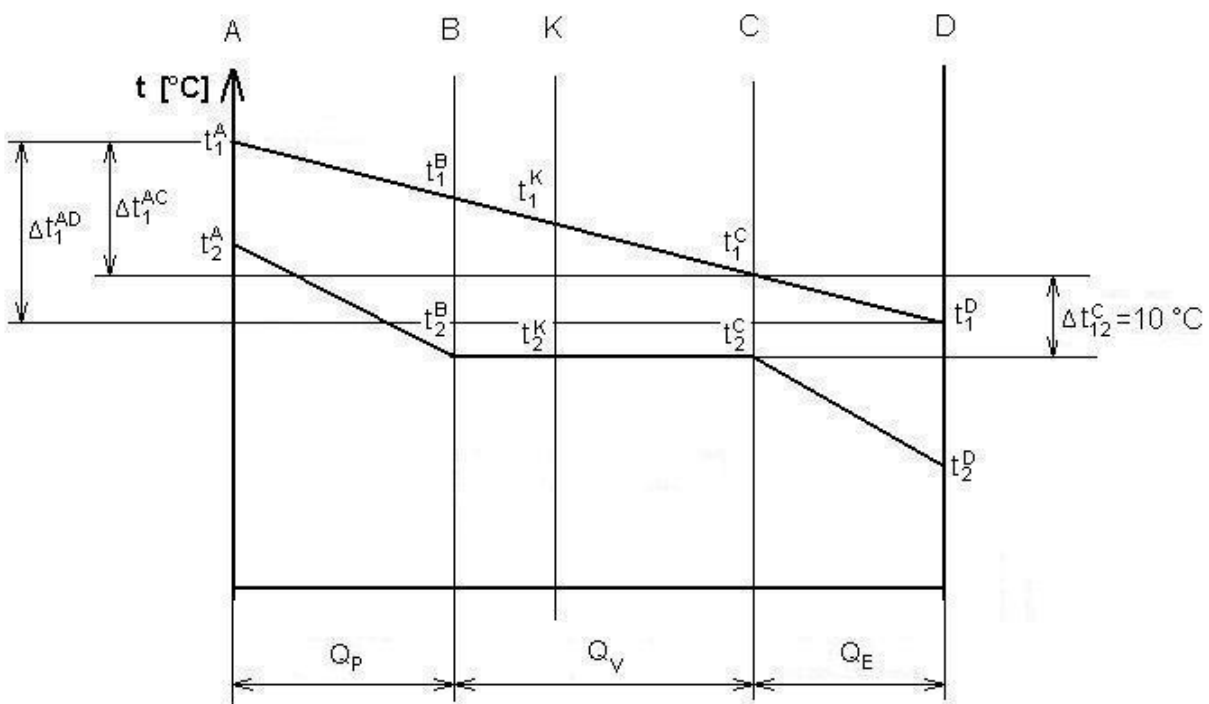
$$\dot{Q}_E = \dot{m}_2 \cdot (i_2^C - i_2^D) = 14,79 \cdot (1670 - 771) \cdot 10^3 = \underline{\underline{13,29 MW}}$$

5.1.3.2 Tepelný výkon článku výparníku

$$\dot{Q}_V = \dot{m}_2 \cdot (i_2^B - i_2^C) = 14,79 \cdot (2565 - 1670) \cdot 10^3 = \underline{\underline{13,24 MW}}$$

5.1.3.3 Tepelný výkon článku přehříváku

$$\dot{Q}_P = \dot{m}_2 \cdot (i_2^A - i_2^B) = 14,79 \cdot (3476 - 2565) \cdot 10^3 = \underline{\underline{13,47 MW}}$$



obr. 3.2 Teploty v jednotlivých bodech PG

5.1.4 Teploty a entalpie na straně sodíku

$$t_1^A = 590^\circ\text{C}$$

$$t_1^C = t_2^C + \Delta t_{12}^C = 350 + 10 = \underline{\underline{360^\circ\text{C}}}$$

$$\frac{\Delta t_1^{AC}}{\dot{Q}_V + \dot{Q}_P} = \frac{\Delta t_1^{AD}}{\dot{Q}_E + \dot{Q}_V + \dot{Q}_P} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta t_1^{AD} = \Delta t_1^{AC} \cdot \frac{(\dot{Q}_E + \dot{Q}_V + \dot{Q}_P)}{(\dot{Q}_V + \dot{Q}_P)} = (590 - 360) \cdot \frac{(13,29 + 13,24 + 13,47) \cdot 10^6}{(13,24 + 13,47) \cdot 10^6} = 344^\circ\text{C}$$

$$t_1^D = t_1^A - \Delta t_1^{AD} = 590 - 344 = \underline{\underline{246^\circ\text{C}}}$$

$$\Delta t_1^{AB} = \Delta t_1^{AC} \cdot \frac{\dot{Q}_P}{(\dot{Q}_V + \dot{Q}_P)} = (590 - 360) \cdot \frac{13,47 \cdot 10^6}{(13,24 + 13,47) \cdot 10^6} = 116^\circ\text{C}$$

$$t_1^B = t_1^A - \Delta t_1^{AB} = 590 - 116 = \underline{\underline{474^\circ\text{C}}}$$

$$\left. \begin{aligned} i_1^A &= c_1^A \cdot t_1^A = 1256 \cdot 590 = 741 \text{ kJ/kg} \\ i_1^B &= c_1^B \cdot t_1^B = 1265 \cdot 474 = 600 \text{ kJ/kg} \\ i_1^C &= c_1^C \cdot t_1^C = 1289 \cdot 360 = 464 \text{ kJ/kg} \\ i_1^D &= c_1^D \cdot t_1^D = 1319 \cdot 246 = 324 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \right\}$$

[3]

5.1.5 Hmotnostní průtok sodíku v PG

$$\dot{Q} = \dot{m}_1 \cdot (i_1^A - i_1^D) \Rightarrow \dot{m}_1 = \frac{\dot{Q}}{(i_1^A - i_1^D)} = \frac{40 \cdot 10^6}{(741 - 324) \cdot 10^3} = \underline{\underline{95,89 \text{ kg/s}}}$$

5.1.6 Souhrn teplot a entalpií v jednotlivých bodech PG

	bod	t [°C]	i [kJ/kg]	m [kg/s]
sodík (1)	A	590	741	95,89
	B	474	600	
	C	360	464	
	D	246	324	
voda (2)	A	565	3476	14,79
	B	350	2565	
	C	350	1670	
	D	180	771	

5.2 Výpčet délky článku ekonomizéru

5.2.1 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně vody v ekonomizéru

$$\bar{t}_{2E} = \frac{t_2^C + t_2^D}{2} = \frac{350 + 180}{2} = \underline{\underline{265^\circ\text{C}}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \rho_{2E} = 790,2 \text{ kg/m}^3 \\ \eta_{2E} = 1,03 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s} \\ \lambda_{2E} = 0,619 \text{ W/m} \cdot \text{K} \\ \text{Pr}_{2E} = 0,809 \end{array} \right\} \quad [8]$$

$$w_{2E} = \frac{\dot{V}_{2E}}{S_2} = \frac{\dot{m}_2}{S_2 \cdot \rho_{2E}} = \frac{14,47}{0,055 \cdot 790,2} = \underline{\underline{0,34 \text{ m/s}}}$$

$$\text{Re}_{2E} = \frac{w_{2E} \cdot d_2 \cdot \rho_{2E}}{\eta_{2E}} = \frac{0,34 \cdot 0,0126 \cdot 790,2}{1,03 \cdot 10^{-4}} = \underline{\underline{32679}}$$

$$\text{Nu}_{2E} = 0,021 \cdot \text{Re}_{2E}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{2E}^{0,43} \cdot C_t = 0,021 \cdot 32679^{0,8} \cdot 0,809^{0,43} \cdot 1 = \underline{\underline{78,35}}$$

$$\alpha_{2E} = \frac{\text{Nu}_{2E} \cdot \lambda_{2E}}{d_2} = \frac{78,35 \cdot 0,619}{0,0126} = \underline{\underline{3849 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}}$$

5.2.2 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně sodíku v ekonomizéru

$$\bar{t}_{1E} = \frac{t_1^C + t_1^D}{2} = \frac{360 + 246}{2} = \underline{\underline{303^\circ\text{C}}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \rho_{1E} = 879,8 \text{ kg/m}^3 \\ \nu_{1E} = 3,89 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \\ \lambda_{1E} = 75,97 \text{ W/m} \cdot \text{K} \\ \text{Pr}_{1E} = 5,94 \cdot 10^{-3} \end{array} \right\} \quad [3]$$

$$w_{1E} = \frac{\dot{V}_{1E}}{S_1} = \frac{\dot{m}_1}{S_1 \cdot \rho_{1E}} = \frac{95,89}{0,2629 \cdot 879,8} = \underline{\underline{0,41 \text{ m/s}}}$$

$$\text{Re}_{1E} = \frac{w_{1E} \cdot d_{hE}}{\nu_{1E}} = \frac{0,41 \cdot 0,031}{3,89 \cdot 10^{-7}} = \underline{\underline{32810}}$$

$$Pe_{1E} = Re_{1E} \cdot Pr_{1E} = 32810 \cdot 5,94 \cdot 10^{-3} = \underline{195}$$

$$Nu_{1E} = 4,3 + 0,025 \cdot Pe_{1E}^{0,8} = 4,3 + 0,025 \cdot 195^{0,8} = \underline{6,00}$$

$$\alpha_{1E} = \frac{Nu_{1E} \cdot \lambda_{1E}}{d_h} = \frac{6 \cdot 75,97}{0,031} = \underline{14801 W/m^2 \cdot K}$$

5.2.3 Výpočet součinitele prostupu tepla v ekonomizéru

$$\lambda_{tE} = 25,42 W/m \cdot K \quad [9]$$

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_u = 0,5 W/m \cdot K \\ u = 5 \cdot 10^{-5} m \end{array} \right\} \quad [2]$$

$$K_E = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{2E}} \cdot \frac{D_2}{d_2} + \frac{D_2}{2 \cdot \lambda_{tE}} \cdot \ln \frac{D_2}{d_2} + \frac{D_2}{2 \cdot \lambda_u} \cdot \ln \frac{d_2}{(d_2 - 2 \cdot u)} + \frac{1}{\alpha_{1E}} \cdot \frac{D_2}{D_2}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{9849} \cdot \frac{0,019}{0,0126} + \frac{0,019}{2 \cdot 25,42} \cdot \ln \frac{0,019}{0,0126} + \frac{0,019}{2 \cdot 0,5} \cdot \ln \frac{0,0126}{(0,0126 - 2 \cdot 5 \cdot 10^{-5})} + \frac{1}{14801} \cdot \frac{0,019}{0,019}} =$$

$$= \underline{1309 W/m^2 \cdot K}$$

5.2.4 Logaritmický teplotní rozdíl v ekonomizéru

$$\Delta t_{\ln E} = \frac{\Delta t_{12}^C - \Delta t_{12}^D}{\ln \frac{\Delta t_{12}^C}{\Delta t_{12}^D}} = \frac{(t_1^C - t_2^C) - (t_1^D - t_2^D)}{\ln \frac{t_1^C - t_2^C}{t_1^D - t_2^D}} = \frac{(360 - 350) - (246 - 180)}{\ln \frac{360 - 350}{246 - 180}} = \underline{29,6^\circ C}$$

5.2.5 Délka ekonomizéru

$$\dot{Q}_E = K_E \cdot S_E \cdot \Delta t_{\ln E} = K_E \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot D_2 \cdot l_E \cdot \Delta t_{\ln E} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow l_E = \frac{\dot{Q}_E}{K_E \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot D_2 \cdot \Delta t_{\ln E}} = \frac{13,29 \cdot 10^6}{1309 \cdot 12 \cdot 37 \cdot \pi \cdot 0,019 \cdot 29,6} = \underline{12,97 m}$$

Skutečnou délku ekonomizéru zaokruhluji na 13m.

5.3 Výpočet délky článku výparníku

5.3.1 Výpočet kritické suchosti páry ve výparníku

$$\rho_{2V} \cdot w_{2V} = \frac{\dot{m}_2}{\dot{V}_{2V}} \cdot \frac{\dot{V}_{2V}}{m \cdot n \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}} = \frac{4 \cdot \dot{m}_2}{m \cdot n \cdot \pi \cdot d_2^2} = \frac{4 \cdot 14,79}{12 \cdot 37 \cdot \pi \cdot 0,0126^2} = \underline{\underline{267 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}}}$$

$$x_K = (0,92 - 0,035 \cdot p_2) \cdot \sqrt{\frac{1000}{\rho_{2V} \cdot w_{2V}}} \cdot \left(\frac{d_2}{0,008} \right)^{0,15} = (0,92 - 0,035 \cdot 16,5) \cdot \sqrt{\frac{1000}{267}} \cdot \left(\frac{0,0126}{0,008} \right)^{0,15} = \underline{\underline{0,71}}$$

5.3.2 Teplota a entalpie páry v místě kritické suchosti

$$t_2^K = 350^\circ\text{C}$$

$$i_2^K = 2305 \text{ kJ/kg}$$

[8]

5.3.3 Tepelné výkony částí s bublinkovým a blánovým varem

5.3.3.1 Tepelný výkon části s bublinkovým varem

$$\dot{Q}_{VBu} = \dot{m}_2 \cdot (i_2^K - i_2^C) = 14,79 \cdot (2305 - 1670) \cdot 10^3 = \underline{\underline{9,39 \text{ MW}}}$$

5.3.3.2 Tepelný výkon části s blánovým varem

$$\dot{Q}_{VBl} = \dot{m}_2 \cdot (i_2^B - i_2^K) = 14,79 \cdot (2565 - 2305) \cdot 10^3 = \underline{\underline{3,85 \text{ MW}}}$$

5.3.4 Teplota a entalpie sodíku v místě kritické suchosti

$$\frac{\Delta t_1^{AC}}{\dot{Q}_V + \dot{Q}_P} = \frac{\Delta t_1^{AK}}{\dot{Q}_{VBl} + \dot{Q}_P} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta t_1^{AK} = \Delta t_1^{AC} \cdot \frac{(\dot{Q}_{VBl} + \dot{Q}_P)}{(\dot{Q}_V + \dot{Q}_P)} = (590 - 360) \cdot \frac{(3,85 + 13,47) \cdot 10^6}{(13,24 + 13,47) \cdot 10^6} = 149^\circ\text{C}$$

$$t_1^K = t_1^A - \Delta t_1^{AK} = 590 - 149 = \underline{\underline{441^\circ\text{C}}}$$

$$i_1^K = c_1^K \cdot t_1^K = 1270 \cdot 441 = \underline{\underline{560 \text{ kJ/kg}}}$$

[3]

5.3.5 Výpočet délky části výparníku s bublinkovým varem

5.3.5.1 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně vody a páry v části výparníku s bublinkovým varem

$$t_{2VBu} = 350^{\circ}\text{C}$$

Výpočet je proveden iteračním způsobem. Uveden je pouze poslední krok.

$$\text{Volím } l_{VBu} = 3,79\text{m}$$

$$q_{2V} = \frac{\dot{Q}_{VBu}}{m \cdot n \cdot l_{VBu} \cdot \pi \cdot d_2} = \frac{9,39 \cdot 10^6}{12 \cdot 37 \cdot 3,79 \cdot \pi \cdot 0,0126} = \underline{\underline{1,41 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2}}$$

$$\alpha_{2VBu} = \frac{10,45 \cdot q_{2V}^{0,7}}{3,3 - 0,0113 \cdot (t_{2VBu} - 100)} = \frac{10,45 \cdot (1,41 \cdot 10^5)^{0,7}}{3,3 - 0,0113 \cdot (350 - 100)} = \underline{\underline{88466 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}}$$

5.3.5.2 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně sodíku v části výparníku s bublinkovým varem

$$\bar{t}_{1VBu} = \frac{t_1^C + t_1^K}{2} = \frac{360 + 441}{2} = \underline{\underline{400,5^{\circ}\text{C}}}$$

$$\left. \begin{aligned} \rho_{1VBu} &= 855,9 \text{ kg/m}^3 \\ \nu_{1VBu} &= 3,31 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \\ \lambda_{1VBu} &= 71,06 \text{ W/m} \cdot \text{K} \\ \text{Pr}_{1VBu} &= 5,03 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \right\}$$

[3]

$$w_{1VBu} = \frac{\dot{V}_{1VBu}}{S_1} = \frac{\dot{m}_1}{S_1 \cdot \rho_{1VBu}} = \frac{95,89}{0,2629 \cdot 855,9} = \underline{\underline{0,43 \text{ m/s}}}$$

$$\text{Re}_{1VBu} = \frac{w_{1VBu} \cdot d_h}{\nu_{1VBu}} = \frac{0,43 \cdot 0,031}{3,31 \cdot 10^{-7}} = \underline{\underline{39635}}$$

$$\text{Pe}_{1VBu} = \text{Re}_{1VBu} \cdot \text{Pr}_{1VBu} = 39635 \cdot 5,03 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{199,4}}$$

$$\text{Nu}_{1VBu} = 4,3 + 0,025 \cdot \text{Pe}_{1VBu}^{0,8} = 4,3 + 0,025 \cdot 199,4^{0,8} = \underline{\underline{6,03}}$$

$$\alpha_{1VBu} = \frac{\text{Nu}_{1VBu} \cdot \lambda_{1VBu}}{d_h} = \frac{6,03 \cdot 71,04}{0,031} = \underline{\underline{13916 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}}$$

5.3.5.3 Výpočet součinitele prostupu tepla v části výparníku s bublinkovým varem

$$\lambda_{t_{VBu}} = 25,8 \text{ W/m} \cdot \text{K} \quad [9]$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_u &= 0,5 \text{ W/m} \cdot \text{K} \\ u &= 5 \cdot 10^{-5} \text{ m} \end{aligned} \right\} \quad [2]$$

$$\begin{aligned} K_{VBu} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{2VBu}} \cdot \frac{D_2}{d_2} + \frac{D_2}{2 \cdot \lambda_{t_{VBu}}} \cdot \ln \frac{D_2}{d_2} + \frac{D_2}{2 \cdot \lambda_u} \cdot \ln \frac{d_2}{(d_2 - 2 \cdot u)} + \frac{1}{\alpha_{1VBu}} \cdot \frac{D_2}{D_2}} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{88466} \cdot \frac{0,019}{0,0126} + \frac{0,019}{2 \cdot 25,8} \cdot \ln \frac{0,019}{0,0126} + \frac{0,019}{2 \cdot 0,5} \cdot \ln \frac{0,0126}{(0,0126 - 2 \cdot 5 \cdot 10^{-5})} + \frac{1}{13916} \cdot \frac{0,019}{0,019}} = \\ &= \underline{\underline{2554 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}} \end{aligned}$$

5.3.5.4 Logaritmický teplotní rozdíl v části výparníku s bublinkovým varem

$$\Delta t_{\ln VBu} = \frac{\Delta t_{12}^K - \Delta t_{12}^C}{\ln \frac{\Delta t_{12}^K}{\Delta t_{12}^C}} = \frac{(t_1^K - t_2^K) - (t_1^C - t_2^C)}{\ln \frac{t_1^K - t_2^K}{t_1^C - t_2^C}} = \frac{(441 - 350) - (360 - 350)}{\ln \frac{441 - 350}{360 - 350}} = \underline{\underline{36,6^\circ \text{C}}}$$

5.3.5.5 Délka části výparníku s bublinkovým varem

$$\dot{Q}_{VBu} = K_{VBu} \cdot S_{VBu} \cdot \Delta t_{\ln VBu} = K_{VBu} \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot D_{2V} \cdot l_{VBu} \cdot \Delta t_{\ln VBu} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow l_{VBu} = \frac{\dot{Q}_{VBu}}{K_{VBu} \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot D_2 \cdot \Delta t_{\ln VBu}} = \frac{9,39 \cdot 10^6}{2554 \cdot 12 \cdot 37 \cdot \pi \cdot 0,019 \cdot 36,6} = \underline{\underline{3,79 \text{ m}}}$$

5.3.6 Výpočet délky části výparníku s blánovým varem

5.3.6.1 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně vody a páry v části výparníku s blánovým varem

$$t_{2VBu} = 350^\circ \text{C}$$

$$\left. \begin{aligned} v'_{2VBl} &= 0,00174 \text{ m}^3/\text{kg} \\ v''_{2VBl} &= 0,0088 \text{ m}^3/\text{kg} \\ \rho_{2VBl} &= 113,6 \text{ kg/m}^3 \\ \eta_{2VBl} &= 2,38 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \\ \lambda_{2VBl} &= 0,136 \text{ W/m} \cdot \text{K} \\ \text{Pr}_{2VBl} &= 2,92 \end{aligned} \right\} \quad [8]$$

$$w_{2VBl} = \frac{\dot{V}_{2VBl}}{S_2} = \frac{\dot{m}_2}{S_2 \cdot \rho_{2VBl}} = \frac{14,79}{0,055 \cdot 113,6} = \underline{\underline{2,35 \text{ m/s}}}$$

$$\text{Re}_{2VBl} = \frac{w_{2VBl} \cdot d_2 \cdot \rho_{2VBl}}{\eta_{2VBl}} = \frac{2,35 \cdot 0,0126 \cdot 113,6}{2,38 \cdot 10^{-5}} = \underline{\underline{141308}}$$

$$x = \frac{1 + x_K}{2} = \frac{1 + 0,71}{2} = 0,85$$

$$C = \left[x + \frac{v_{2VBl}''}{v_{2VBl}'} \cdot (1-x) \right]^{0,8} \cdot \left\{ 1 - 0,1 \cdot \left[\left(\frac{v_{2VBl}''}{v_{2VBl}'} - 1 \right) \cdot (1-x) \right]^{0,4} \right\} =$$

$$= \left[0,85 + \frac{0,0088}{0,00174} \cdot (1-0,85) \right]^{0,8} \cdot \left\{ 1 - 0,1 \cdot \left[\left(\frac{0,0088}{0,00174} - 1 \right) \cdot (1-0,85) \right]^{0,4} \right\} = 0,81$$

$$\text{Nu}_{2VBl} = 0,023 \cdot C \cdot (\text{Re} \cdot \text{Pr})^{0,8} = 0,023 \cdot 0,81 \cdot (141308 \cdot 2,92)^{0,8} = \underline{\underline{582}}$$

$$\alpha_{2VBl} = \frac{\text{Nu}_{2VBl} \cdot \lambda_{2VBl}}{d_2} = \frac{582 \cdot 0,136}{0,0126} = \underline{\underline{6280 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}}$$

5.3.6.2 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně sodíku v části výparníku s blánovým varem

$$\bar{t}_{1VBl} = \frac{t_1^K + t_1^B}{2} = \frac{441 + 474}{2} = \underline{\underline{457,5^\circ\text{C}}}$$

$$\left. \begin{aligned} \rho_{1VBl} &= 843,1 \text{ kg/m}^3 \\ v_{1VBl} &= 3,08 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \\ \lambda_{1VBl} &= 68,18 \text{ W/m} \cdot \text{K} \\ \text{Pr}_{1VBl} &= 4,78 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \right\} \quad [3]$$

$$w_{1VBl} = \frac{\dot{V}_{1VBl}}{S_1} = \frac{\dot{m}_1}{S_1 \cdot \rho_{1VBl}} = \frac{95,89}{0,2629 \cdot 843,1} = \underline{\underline{0,43 \text{ m/s}}}$$

$$\text{Re}_{1VBl} = \frac{w_{1VBl} \cdot d_h}{v_{1VBl}} = \frac{0,43 \cdot 0,031}{3,08 \cdot 10^{-7}} = \underline{\underline{43242}}$$

$$\text{Pe}_{1VBl} = \text{Re}_{1VBl} \cdot \text{Pr}_{1VBl} = 43242 \cdot 4,78 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{206,7}}$$

$$Nu_{VBI} = 4,3 + 0,025 \cdot Pe_{VBI}^{0,8} = 4,3 + 0,025 \cdot 206,7^{0,8} = \underline{\underline{6,08}}$$

$$\alpha_{VBI} = \frac{Nu_{VBI} \cdot \lambda_{VBI}}{d_h} = \frac{6,08 \cdot 68,18}{0,031} = \underline{\underline{13464 W/m^2 \cdot K}}$$

5.3.6.3 Výpočet součinitele prostupu tepla v části výparníku s blánovým varem

$$\lambda_{VBI} = 26,01 W/m \cdot K \quad [9]$$

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_u = 0,5 W/m \cdot K \\ u = 5 \cdot 10^{-5} m \end{array} \right\} \quad [2]$$

$$\begin{aligned} K_{VBI} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{2VBI}} \cdot \frac{D_2}{d_2} + \frac{D_2}{2 \cdot \lambda_{VBI}} \cdot \ln \frac{D_2}{d_2} + \frac{D_2}{2 \cdot \lambda_u} \cdot \ln \frac{d_2}{(d_2 - 2 \cdot u)} + \frac{1}{\alpha_{1VBI}} \cdot \frac{D_2}{D_2}} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{6280} \cdot \frac{0,019}{0,0126} + \frac{0,019}{2 \cdot 26,01} \cdot \ln \frac{0,019}{0,0126} + \frac{0,019}{2 \cdot 0,5} \cdot \ln \frac{0,0126}{(0,0126 - 2 \cdot 5 \cdot 10^{-5})} + \frac{1}{13464} \cdot \frac{0,019}{0,019}} = \\ &= \underline{\underline{1624 W/m^2 \cdot K}} \end{aligned}$$

5.3.6.4 Logaritmický teplotní rozdíl v části výparníku s blánovým varem

$$\Delta t_{\ln VBI} = \frac{\Delta t_{12}^B - \Delta t_{12}^K}{\ln \frac{\Delta t_{12}^B}{\Delta t_{12}^K}} = \frac{(t_1^B - t_2^B) - (t_1^K - t_2^K)}{\ln \frac{t_1^B - t_2^B}{t_1^K - t_2^K}} = \frac{(474 - 350) - (441 - 350)}{\ln \frac{474 - 350}{441 - 350}} = \underline{\underline{106,5^\circ C}}$$

5.3.6.5 Délka části výparníku s blánovým varem

$$\dot{Q}_{VBI} = K_{VBI} \cdot S_{VBI} \cdot \Delta t_{\ln VBI} = K_{VBI} \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot D_2 \cdot l_{VBI} \cdot \Delta t_{\ln VBI} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow l_{VBI} = \frac{\dot{Q}_{VBI}}{K_{VBI} \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot D_2 \cdot \Delta t_{\ln VBI}} = \frac{3,85 \cdot 10^6}{1624 \cdot 12 \cdot 37 \cdot \pi \cdot 0,019 \cdot 106,5} = \underline{\underline{0,84 m}}$$

5.3.7 Celková délka výparníku

$$l_V = l_{VBu} + l_{VBI} = 3,79 + 0,84 = \underline{\underline{4,63 m}}$$

Skutečnou délku výparníku zaokrouhluji na 4,7m.

5.4 Výpočet délky článku přehříváku

5.4.1 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně páry v přehříváku

$$\bar{t}_{2P} = \frac{t_2^A + t_2^B}{2} = \frac{565 + 350}{2} = \underline{\underline{457,5^\circ\text{C}}}$$

$$\left. \begin{aligned} \rho_{2P} &= 59,7 \text{ kg/m}^3 \\ \eta_{2P} &= 2,76 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \\ \lambda_{2P} &= 0,082 \text{ W/m} \cdot \text{K} \\ \text{Pr}_{2P} &= 1,13 \end{aligned} \right\} \quad [8]$$

$$w_{2P} = \frac{\dot{V}_{2P}}{S_2} = \frac{\dot{m}_2}{S_2 \cdot \rho_{2P}} = \frac{14,79}{0,055 \cdot 59,7} = \underline{\underline{4,47 \text{ m/s}}}$$

$$\text{Re}_{2P} = \frac{w_{2P} \cdot d_2 \cdot \rho_{2P}}{\eta_{2P}} = \frac{4,47 \cdot 0,0126 \cdot 59,7}{2,76 \cdot 10^{-5}} = \underline{\underline{121955}}$$

$$\text{Nu}_{2P} = 0,021 \cdot \text{Re}_{2P}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{2P}^{0,43} \cdot C_t = 0,021 \cdot 121955^{0,8} \cdot 1,13^{0,43} \cdot 1 = \underline{\underline{259,4}}$$

$$\alpha_{2P} = \frac{\text{Nu}_{2P} \cdot \lambda_{2P}}{d_2} = \frac{259,4 \cdot 0,082}{0,0126} = \underline{\underline{1688 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}}$$

5.4.2 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně sodíku v přehříváku

$$\bar{t}_{1P} = \frac{t_1^A + t_1^B}{2} = \frac{590 + 474}{2} = \underline{\underline{532^\circ\text{C}}}$$

$$\left. \begin{aligned} \rho_{1P} &= 825,9 \text{ kg/m}^3 \\ \nu_{1P} &= 2,78 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \\ \lambda_{1P} &= 64,8 \text{ W/m} \cdot \text{K} \\ \text{Pr}_{1P} &= 4,39 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \right\} \quad [3]$$

$$w_{1P} = \frac{\dot{V}_{1P}}{S_1} = \frac{\dot{m}_1}{S_{1P} \cdot \rho_{1P}} = \frac{95,89}{0,2629 \cdot 825,9} = \underline{\underline{0,44 \text{ m/s}}}$$

$$\text{Re}_{1P} = \frac{w_{1P} \cdot d_h}{\nu_{1P}} = \frac{0,44 \cdot 0,031}{2,78 \cdot 10^{-7}} = \underline{\underline{48906}}$$

$$Pe_{1P} = Re_{1P} \cdot Pr_{1P} = 48906 \cdot 4,39 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{214,7}}$$

$$Nu_{1P} = 4,5 + 0,014 \cdot Pe_{1P}^{0,8} = 4,5 + 0,014 \cdot 214,7^{0,8} = \underline{\underline{5,53}}$$

$$\alpha_{1P} = \frac{Nu_{1P} \cdot \lambda_{1P}}{d_h} = \frac{5,53 \cdot 64,8}{0,031} = \underline{\underline{11635 W/m^2 \cdot K}}$$

5.4.3 Výpočet součinitele prostupu tepla v přehříváku

$$\lambda_{tP} = 26,19 W/m \cdot K$$

[9]

nánosy se neuvažují

$$K_P = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{2P}} \cdot \frac{D_2}{d_2} + \frac{D_2}{2 \cdot \lambda_{tP}} \cdot \ln \frac{D_2}{d_2} + \frac{1}{\alpha_{1P}} \cdot \frac{D_2}{D_2}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{1688} \cdot \frac{0,019}{0,0126} + \frac{0,019}{2 \cdot 26,21} \cdot \ln \frac{0,019}{0,0126} + \frac{1}{11635} \cdot \frac{0,019}{0,019}} = \underline{\underline{886 W/m^2 \cdot K}}$$

5.4.4 Logaritmický teplotní rozdíl v přehříváku

$$\Delta t_{\ln P} = \frac{\Delta t_{12}^A - \Delta t_{12}^B}{\ln \frac{\Delta t_{12}^A}{\Delta t_{12}^B}} = \frac{(t_1^A - t_2^A) - (t_1^B - t_2^B)}{\ln \frac{t_1^A - t_2^A}{t_1^B - t_2^B}} = \frac{(590 - 565) - (474 - 350)}{\ln \frac{590 - 565}{474 - 350}} = \underline{\underline{61,8^\circ C}}$$

5.4.5 Délka přehříváku

$$\dot{Q}_P = K_P \cdot S_P \cdot \Delta t_{\ln P} = K_P \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot D_2 \cdot l_P \cdot \Delta t_{\ln P} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow l_P = \frac{\dot{Q}_P}{K_P \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot D_2 \cdot \Delta t_{\ln P}} = \frac{13,47 \cdot 10^6}{886 \cdot 12 \cdot 37 \cdot \pi \cdot 0,019 \cdot 61,8} = \underline{\underline{9,28 m}}$$

Skutečnou délku přehříváku zaokrouhluji na 9,3m.

5.5 Souhrn výsledků tepelného výpočtu

	tepelný výkon \dot{Q} [MW]	součinitel přestupu tepla		součinitel prostupu tepla K [W/m ² · K]	logaritmický teplotní rozdíl Δt_{\ln} [°C]	délka teplosmě nné plochy l [m]	
		sodík α_1 [W/m ² · K]	voda α_2 [W/m ² · K]				
ekonomizér	13,29	14801	3849	1309	29,6	13	
výparník	bublinkový var	9,39	13916	88466	2554	36,6	3,8
	blánový var	3,85	13464	6280	1624	106,5	0,9
přehřívák	13,47	11635	1688	886	61,8	9,3	
Σ	40					27	

6. Hydraulický výpočet parního generátoru

6.1 Tlakové ztráty na straně sodíku

6.1.1 Tlaková ztráta v příváděcím potrubí sodíku

6.1.1.1 Tlaková ztráta třením v příváděcím potrubí sodíku

$$\left. \begin{aligned} t_{1přiv} &= 590^{\circ}\text{C} \\ \rho_{1přiv} &= 812,6 \text{ kg/m}^3 \\ v_{1přiv} &= 2,57 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned} \right\} \quad [3]$$

$$\varepsilon = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m} \quad \text{drsnost potrubí je v každé části PG stejné} \quad [4]$$

$$w_{1přiv} = \frac{\dot{m}_1}{S_{1přiv} \cdot \rho_{1přiv}} = \frac{95,89}{0,0617 \cdot 812,6} = \underline{\underline{1,91 \text{ m/s}}}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}_{1přiv} &= \frac{w_{1přiv} \cdot d_{1přiv}}{v_{1přiv}} = \frac{1,91 \cdot 0,0809 \cdot 812,6}{2,57 \cdot 10^{-7}} = 602204 \\ \frac{\varepsilon}{d_{1přiv}} &= \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0,0809} = 4,94 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \lambda_{1přiv} = \underline{\underline{0,0175}} \quad [4]$$

$$\Delta p_{t1přiv} = \frac{\lambda_{1přiv} \cdot l_{1přiv} \cdot w_{1přiv}^2 \cdot \rho_{1přiv}}{2 \cdot d_{1přiv}} = \frac{0,0175 \cdot 3,2 \cdot 1,91^2 \cdot 812,6}{2 \cdot 0,0809} = \underline{\underline{1029 \text{ Pa}}}$$

6.1.1.2 Tlaková ztráta místními odpory v příváděcím potrubí sodíku

$$\xi_1 = 0,2 \quad \text{ohyb trubky o } 180^{\circ} \quad \frac{R}{d_{1přiv}} = \frac{250}{80,9} = 3,09 \quad [4]$$

$$\xi_2 = 0,12 \quad \text{ohyb trubky o } 90^{\circ} \quad \frac{R}{d_{1přiv}} = \frac{250}{80,9} = 3,09 \quad [4]$$

$$\xi_3 = 0,5 \quad \text{vstup trubky do článku přehříváku} \quad [4]$$

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 0,2 + 0,12 + 0,5 = 0,82$$

$$\Delta p_{m1přiv} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{1přiv}^2 \cdot \rho_{1přiv}}{2} = 0,82 \cdot \frac{1,91^2 \cdot 812,6}{2} = \underline{\underline{1219 \text{ Pa}}}$$

6.1.1.3 Celková tlaková ztráta příváděcího potrubí sodíku

$$\Delta p_{1přiv} = \Delta p_{t1přiv} + \Delta p_{m1přiv} = 1029 + 1219 = \underline{\underline{2248 \text{ Pa}}}$$

6.1.2 Tlaková ztráta v přehříváku na straně sodíku

6.1.2.1 Tlaková ztráta třením v přehříváku na straně sodíku

$$\left. \begin{aligned} t_{1P} &= 532^{\circ}\text{C} \\ \rho_{1P} &= 825,9 \text{ kg/m}^3 \\ v_{1P} &= 2,78 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned} \right\} \quad [3]$$

$$\varepsilon = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$w_{1P} = \frac{\dot{m}_1}{S_{1P} \cdot \rho_{1P}} = \frac{95,89}{0,2629 \cdot 825,9} = \underline{\underline{0,44 \text{ m/s}}}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}_{1P} &= \frac{w_{1P} \cdot d_h}{v_{1P}} = \frac{0,44 \cdot 0,031}{2,78 \cdot 10^{-7}} = 48905 \\ \frac{\varepsilon}{d_h} &= \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0,031} = 1,3 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \lambda_{1P} = \underline{\underline{0,022}}$$

$$\Delta p_{t1P} = \frac{\lambda_{1P} \cdot l_P \cdot w_{1P}^2 \cdot \rho_{1P}}{2 \cdot d_h} = \frac{0,022 \cdot 9,3 \cdot 0,44^2 \cdot 825,9}{2 \cdot 0,031} = \underline{\underline{535 \text{ Pa}}}$$

6.1.2.2 Tlaková ztráta místními odpory v přehříváku na straně sodíku

$$\xi_1 = 0,11 \quad \text{ohyb trubky o } 180^{\circ} \quad \frac{R}{d_h} = \frac{500}{31} = 16,1 \quad [4]$$

$$\xi_2 = 4 \cdot 0,25 = 1 \quad \text{průchod distanční mřížkou (4 kusy)} \quad [7]$$

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 = 0,11 + 1 = 1,11$$

$$\Delta p_{m1P} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{1P}^2 \cdot \rho_{1P}}{2} = 1,11 \cdot \frac{0,44^2 \cdot 825,9}{2} = \underline{\underline{89 \text{ Pa}}}$$

6.1.2.3 Celková tlaková ztráta přehříváku na straně sodíku

$$\Delta p_{1P} = \Delta p_{t1P} + \Delta p_{m1P} = 535 + 89 = \underline{\underline{624 \text{ Pa}}}$$

6.1.3 Tlaková ztráta v převáděcím potrubí sodíku z přehříváku do výparníku

6.1.3.1 Tlaková ztráta třením v převáděcím potrubí sodíku z přehříváku do výparníku

$$\left. \begin{aligned} t_{1převl} &= 474^{\circ}\text{C} \\ \rho_{1převl} &= 838,7 \text{ kg/m}^3 \\ v_{1převl} &= 3,01 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned} \right\} \quad [3]$$

$$\varepsilon = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$w_{1přev1} = \frac{\dot{m}_1}{S_{1přev1} \cdot \rho_{1přev1}} = \frac{95,98}{0,0617 \cdot 838,7} = \underline{\underline{1,85 \text{ m/s}}}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}_{1přev1} &= \frac{w_{1přev1} \cdot d_{1přev1}}{\nu_{1přev1}} = \frac{1,85 \cdot 0,0809 \cdot 838,7}{3,01 \cdot 10^{-7}} = 497843 \\ \frac{\varepsilon}{d_{1přev1}} &= \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0,0809} = 4,94 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \lambda_{1přev1} = \underline{\underline{0,0175}}$$

$$\Delta p_{r1přev1} = \frac{\lambda_{1přev1} \cdot l_{1přev1} \cdot w_{1přev1}^2 \cdot \rho_{1přev1}}{2 \cdot d_{1přev1}} = \frac{0,0175 \cdot 0,5 \cdot 1,85^2 \cdot 838,7}{2 \cdot 0,0809} = \underline{\underline{156 \text{ Pa}}}$$

6.1.3.2 Tlaková ztráta místními odpory v převáděcím potrubí sodíku z přehříváku do výparníku

$$\xi_1 = 0,5 \quad \text{výstup trubky z článku přehříváku} \quad [4]$$

$$\xi_2 = 0,5 \quad \text{vstup trubky do článku výparníku} \quad [4]$$

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 = 0,5 + 0,5 = 1$$

$$\Delta p_{m1přev1} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{1P}^2 \cdot \rho_{1P}}{2} = 1 \cdot \frac{1,85^2 \cdot 838,7}{2} = \underline{\underline{1441 \text{ Pa}}}$$

6.1.3.3 Celková tlaková ztráta převáděcího potrubí sodíku z přehříváku do výparníku

$$\Delta p_{1přev1} = \Delta p_{r1přev1} + \Delta p_{m1přev1} = 156 + 1441 = \underline{\underline{1597 \text{ Pa}}}$$

6.1.4 Tlaková ztráta ve výparníku na straně sodíku

6.1.4.1 Tlaková ztráta třením ve výparníku na straně sodíku

$$t_{IV} = 417^\circ\text{C}$$

$$\rho_{IV} = 851,6 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu_{IV} = 3,24 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\varepsilon = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$w_{IV} = \frac{\dot{m}_1}{S_1 \cdot \rho_{IV}} = \frac{95,98}{0,2629 \cdot 851,6} = \underline{\underline{0,43 \text{ m/s}}}$$

[3]

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}_{IV} &= \frac{w_{IV} \cdot d_h}{\nu_{IV}} = \frac{0,43 \cdot 0,031}{3,24 \cdot 10^{-7}} = 40695 \\ \frac{\varepsilon}{d_h} &= \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0,031} = 1,3 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \lambda_{IV} = \underline{\underline{0,0225}}$$

$$\Delta p_{tIV} = \frac{\lambda_{IV} \cdot l_V \cdot w_{IV}^2 \cdot \rho_{IV}}{2 \cdot d_h} = \frac{0,0225 \cdot 4,7 \cdot 0,43^2 \cdot 851,6}{2 \cdot 0,031} = \underline{\underline{268 Pa}}$$

6.1.4.2 Tlaková ztráta místními odpory ve výparníku na straně sodíku

$$\xi_1 = 0,11 \quad \text{ohyb trubky o } 180^\circ \quad \frac{R}{d_h} = \frac{500}{31} = 16,1 \quad [4]$$

$$\xi_2 = 3 \cdot 0,25 = 0,75 \quad \text{průchod distanční mřížkou (3 kusy)} \quad [7]$$

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 = 0,11 + 0,75 = 0,86$$

$$\Delta p_{mIV} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{IV}^2 \cdot \rho_{IV}}{2} = 0,86 \cdot \frac{0,43^2 \cdot 851,6}{2} = \underline{\underline{68 Pa}}$$

6.1.4.3 Celková tlaková ztráta výparníku na straně sodíku

$$\Delta p_{IV} = \Delta p_{tIV} + \Delta p_{mIV} = 268 + 68 = \underline{\underline{336 Pa}}$$

6.1.5 Tlaková ztráta v převáděcím potrubí sodíku z výparníku do ekonomizéru

6.1.5.1 Tlaková ztráta třením v převáděcím potrubí sodíku z výparníku do ekonomizéru

$$t_{1přev2} = 360^\circ C$$

$$\left. \begin{aligned} \rho_{1přev2} &= 866,1 \text{ kg/m}^3 \\ \nu_{1přev2} &= 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned} \right\} \quad [3]$$

$$\varepsilon = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$w_{1přev2} = \frac{\dot{m}_1}{S_{1přev} \cdot \rho_{1přev2}} = \frac{95,89}{0,0617 \cdot 866,1} = \underline{\underline{1,79 \text{ m/s}}}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}_{1přev2} &= \frac{w_{1přev2} \cdot d_{1přev}}{\nu_{1přev2}} = \frac{1,79 \cdot 0,0809}{3,5 \cdot 10^{-7}} = 414638 \\ \frac{\varepsilon}{d_{1přev}} &= \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0,0809} = 4,94 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \lambda_{1přev2} = \underline{\underline{0,0175}}$$

$$\Delta p_{t1přev2} = \frac{\lambda_{1přev2} \cdot l_{1přev} \cdot w_{1přev2}^2 \cdot \rho_{1přev2}}{2 \cdot d_{1přev}} = \frac{0,0175 \cdot 0,5 \cdot 1,79^2 \cdot 866,1}{2 \cdot 0,0809} = \underline{\underline{151Pa}}$$

6.1.5.2 Tlaková ztráta místními odpory v převáděcím potrubí sodíku z výparníku do ekonomizéru

$$\xi_1 = 0,5 \quad \text{výstup trubky z článku výparníku} \quad [4]$$

$$\xi_2 = 0,5 \quad \text{vstup trubky do článku ekonomizéru} \quad [4]$$

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 = 0,5 + 0,5 = 1$$

$$\Delta p_{m1přev2} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{1přev2}^2 \cdot \rho_{1přev2}}{2} = 1 \cdot \frac{1,79^2 \cdot 866,1}{2} = \underline{\underline{1395Pa}}$$

6.1.5.3 Celková tlaková ztráta převáděcího potrubí sodíku z výparníku do ekonomizéru

$$\Delta p_{1přev2} = \Delta p_{t1přev2} + \Delta p_{m1přev2} = 151 + 1395 = \underline{\underline{1546Pa}}$$

6.1.6 Tlaková ztráta v ekonomizéru na straně sodíku

6.1.6.1 Tlaková ztráta třením v ekonomizéru na straně sodíku

$$\left. \begin{aligned} t_{1E} &= 303^\circ\text{C} \\ \rho_{1E} &= 879,8 \text{ kg/m}^3 \\ v_{1E} &= 3,94 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \\ \varepsilon &= 4 \cdot 10^{-5} \text{ m} \end{aligned} \right\} \quad [3]$$

$$w_{1E} = \frac{\dot{m}_1}{S_1 \cdot \rho_{1E}} = \frac{95,89}{0,2629 \cdot 879,8} = \underline{\underline{0,41 \text{ m/s}}}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}_{1E} &= \frac{w_{1E} \cdot d_h}{v_{1E}} = \frac{0,41 \cdot 0,031}{3,94 \cdot 10^{-7}} = 32393 \\ \frac{\varepsilon}{d_h} &= \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0,031} = 1,3 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \lambda_{1E} = \underline{\underline{0,0235}}$$

$$\Delta p_{t1E} = \frac{\lambda_{1E} \cdot l_E \cdot w_{1E}^2 \cdot \rho_{1E}}{2 \cdot d_h} = \frac{0,0235 \cdot 13 \cdot 0,41^2 \cdot 879,8}{2 \cdot 0,031} = \underline{\underline{750Pa}}$$

6.1.6.2 Tlaková ztráta místními odpory v ekonomizéru na straně sodíku

$$\xi_1 = 0,11 \quad \text{ohyb trubky o } 180^\circ \quad \frac{R}{d_h} = \frac{500}{31} = 16,1 \quad [4]$$

$$\xi_2 = 6 \cdot 0,25 = 1,5 \quad \text{průchod distanční mřížkou (6 kusů)} \quad [7]$$

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 = 0,11 + 1,5 = 1,65$$

$$\Delta p_{mlE} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{1E}^2 \cdot \rho_{1E}}{2} = 1,65 \cdot \frac{0,41^2 \cdot 879,8}{2} = \underline{\underline{122 Pa}}$$

6.1.6.3 Celková tlaková ztráta ekonomizéru na straně sodíku

$$\Delta p_{1E} = \Delta p_{t1E} + \Delta p_{mlE} = 750 + 122 = \underline{\underline{872 Pa}}$$

6.1.7 Tlaková ztráta v odváděcím potrubí sodíku

6.1.7.1 Tlaková ztráta třením v odváděcím potrubí sodíku

$$t_{1odv} = 246^\circ C$$

$$\left. \begin{aligned} \rho_{1odv} &= 892,8 \text{ kg/m}^3 \\ v_{1odv} &= 4,47 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned} \right\} \quad [3]$$

$$\varepsilon = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$w_{1odv} = \frac{\dot{m}_1}{S_{1odv} \cdot \rho_{1odv}} = \frac{95,89}{0,0617 \cdot 892,8} = \underline{\underline{1,74 \text{ m/s}}}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}_{1odv} &= \frac{w_{1odv} \cdot d_{1odv}}{v_{1odv}} = \frac{0,74 \cdot 0,0809}{4,47 \cdot 10^{-7}} = 315132 \\ \frac{\varepsilon}{d_{1odv}} &= \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0,0809} = 4,94 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \lambda_{1odv} = \underline{\underline{0,018}}$$

$$\Delta p_{t1odv} = \frac{\lambda_{1odv} \cdot l_{1odv} \cdot w_{1odv}^2 \cdot \rho_{1odv}}{2 \cdot d_{1odv}} = \frac{0,018 \cdot 3,2 \cdot 1,74^2 \cdot 892,8}{2 \cdot 0,0809} = \underline{\underline{964 Pa}}$$

6.1.7.2 Tlaková ztráta místními odpory v odváděcím potrubí sodíku

$$\xi_1 = 0,2 \quad \text{ohyb trubky o } 180^\circ \quad \frac{R}{d_{1odv}} = \frac{250}{80,9} = 3,09 \quad [4]$$

$$\xi_2 = 0,12 \quad \text{ohyb trubky o } 90^\circ \quad \frac{R}{d_{1odv}} = \frac{250}{80,9} = 3,09 \quad [4]$$

$$\xi_3 = 0,5 \quad \text{výstup trubky z článku ekonomizéru} \quad [4]$$

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 0,2 + 0,12 + 0,5 = 0,82$$

$$\Delta p_{m1odv} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{1odv}^2 \cdot \rho_{1odv}}{2} = 0,82 \cdot \frac{1,74^2 \cdot 892,8}{2} = \underline{\underline{1110 Pa}}$$

6.1.7.3 Celková tlaková ztráta odváděcího potrubí sodíku

$$\Delta p_{1odv} = \Delta p_{t1odv} + \Delta p_{m1odv} = 964 + 1110 = \underline{\underline{2074 Pa}}$$

6.1.8 Celková tlaková ztráta na straně sodíku

$$\begin{aligned} \Delta p_1 &= \Delta p_{1přiv} + \Delta p_{1P} + \Delta p_{1přev1} + \Delta p_{1V} + \Delta p_{1přev2} + \Delta p_{1E} + \Delta p_{1odv} = \\ &= 2248 + 624 + 1597 + 336 + 1546 + 872 + 2074 = \underline{\underline{9297 Pa}} \end{aligned}$$

6.2 Tlakové ztráty na straně vody a páry

6.2.1 Tlaková ztráta v přiváděcím potrubí vody

6.2.1.1 Tlaková ztráta třením v přiváděcím potrubí vody

$$t_{2přiv} = 180^\circ C$$

$$\rho_{2přiv} = 897 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta_{2přiv} = 1,54 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot s$$

$$\varepsilon = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

[8]

[4]

$$w_{2přiv} = \frac{\dot{m}_2}{S_{2přiv} \cdot \rho_{2přiv}} = \frac{14,79}{0,0462 \cdot 897} = \underline{\underline{0,36 \text{ m/s}}}$$

$$\text{Re}_{2přiv} = \frac{w_{2přiv} \cdot d_{2přiv} \cdot \rho_{2přiv}}{\eta_{2přiv}} = \frac{0,36 \cdot 0,0502 \cdot 897}{1,54 \cdot 10^{-4}} = 104396$$

$$\frac{\varepsilon}{d_{2přiv}} = \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0,0502} = 7,97 \cdot 10^{-4}$$

$$\Rightarrow \lambda_{2přiv} = \underline{\underline{0,021}}$$

$$\Delta p_{t2přiv} = \frac{\lambda_{2přiv} \cdot l_{2přiv} \cdot w_{2přiv}^2 \cdot \rho_{2přiv}}{2 \cdot d_{2přiv}} = \frac{0,021 \cdot 0,5 \cdot 0,36^2 \cdot 897}{2 \cdot 0,0502} = \underline{\underline{12 Pa}}$$

6.2.1.2 Tlaková ztráta místními odpory v přiváděcím potrubí vody

$$\xi_1 = 0,75$$

výstup vody z trubky do komory článku ekonomizéru [5]

$$\Sigma \xi = \xi_1 = 0,75$$

$$\Delta p_{m2přiv} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{2přiv}^2 \cdot \rho_{2přiv}}{2} = 0,75 \cdot \frac{0,36^2 \cdot 897}{2} = \underline{\underline{43Pa}}$$

6.2.1.3 Celková tlaková ztráta přiváděcího potrubí vody

$$\Delta p_{2přiv} = \Delta p_{t2přiv} + \Delta p_{m2přiv} = 12 + 43 = \underline{\underline{55Pa}}$$

6.2.2 Tlaková ztráta v ekonomizéru na straně vody

6.2.2.1 Tlaková ztráta třením v ekonomizéru na straně vody

$$\left. \begin{aligned} t_{2E} &= 265^\circ C \\ \rho_{2E} &= 790,2 \text{ kg/m}^3 \\ \eta_{2E} &= 1,03 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s} \\ \varepsilon &= 4 \cdot 10^{-5} \text{ m} \end{aligned} \right\} \quad [8]$$

$$w_{2E} = \frac{\dot{m}_2}{S_{2E} \cdot \rho_{2E}} = \frac{14,79}{0,0554 \cdot 790,2} = \underline{\underline{0,34 \text{ m/s}}}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}_{2E} &= \frac{w_{2E} \cdot d_{2E} \cdot \rho_{2E}}{\eta_{2E}} = \frac{0,34 \cdot 0,0126 \cdot 790,2}{1,03 \cdot 10^{-4}} = 32744 \\ \frac{\varepsilon}{d_{2E}} &= \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0,0126} = 3,17 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \lambda_{2E} = \underline{\underline{0,0275}}$$

$$\Delta p_{t2E} = \frac{\lambda_{2E} \cdot l_E \cdot w_{2E}^2 \cdot \rho_{2E}}{2 \cdot d_{2E}} = \frac{0,0275 \cdot 13 \cdot 0,34^2 \cdot 790,2}{2 \cdot 0,0128} = \underline{\underline{1281Pa}}$$

6.2.2.2 Tlaková ztráta místními odpory v ekonomizéru na straně vody

$$\xi_1 = 0,4 \quad \text{vstup vody do trubkovnice} \quad [5]$$

$$\xi_2 = 0,1 \quad \text{ohyb trubky o } 180^\circ \quad \frac{R}{d_{2E}} = \frac{500}{12,6} = 39,7 \quad [4]$$

$$\xi_3 = 0,4 \quad \text{výstup vody z trubkovnice} \quad [5]$$

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 0,4 + 0,1 + 0,4 = 0,9$$

$$\Delta p_{m2E} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{2E}^2 \cdot \rho_{2E}}{2} = 0,9 \cdot \frac{0,34^2 \cdot 790,2}{2} = \underline{\underline{41Pa}}$$

6.2.2.3 Celková tlaková ztráta ekonomizéru na straně vody

$$\Delta p_{2E} = \Delta p_{t2E} + \Delta p_{m2E} = 1281 + 41 = \underline{\underline{1322Pa}}$$

6.2.3 Tlaková ztráta v převáděcím potrubí vody z ekonomizéru do výparníku

6.2.3.1 Tlaková ztráta třením v převáděcím potrubí vody z ekonomizéru do výparníku

$$\left. \begin{aligned} t_{2\text{přev1}} &= 350^\circ\text{C} \\ \rho_{2\text{přev1}} &= 574,7 \text{ kg/m}^3 \\ \eta_{2\text{přev1}} &= 6,59 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \\ \varepsilon &= 4 \cdot 10^{-5} \text{ m} \end{aligned} \right\} \quad [8]$$

$$w_{2\text{přev1}} = \frac{\dot{m}_2}{S_{2\text{přev}} \cdot \rho_{2\text{přev1}}} = \frac{14,79}{0,0462 \cdot 574,7} = \underline{\underline{0,56 \text{ m/s}}}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}_{2\text{přev1}} &= \frac{w_{2\text{přev1}} \cdot d_{2\text{přev}} \cdot \rho_{2\text{přev1}}}{\eta_{2\text{přev1}}} = \frac{0,56 \cdot 0,0502 \cdot 574,7}{6,59 \cdot 10^{-5}} = 243960 \\ \frac{\varepsilon}{d_{2\text{přev}}} &= \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0,0502} = 7,97 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \lambda_{2\text{přev1}} = \underline{\underline{0,0195}}$$

$$\Delta p_{t2\text{přev1}} = \frac{\lambda_{2\text{přev1}} \cdot l_{2\text{přev1}} \cdot w_{2\text{přev1}}^2 \cdot \rho_{2\text{přev1}}}{2 \cdot d_{2\text{přev}}} = \frac{0,0195 \cdot 1,21 \cdot 0,56^2 \cdot 574,7}{2 \cdot 0,0502} = \underline{\underline{42 \text{ Pa}}}$$

6.2.3.2 Tlaková ztráta místními odpory v převáděcím potrubí vody z ekonomizéru do výparníku

$$\xi_1 = 0,35 \quad \text{vstup vody do trubky z komory článku ekonomizéru} \quad [5]$$

$$\xi_2 = 0,1 \quad \text{ohyb trubky o } 180^\circ \quad \frac{R}{d_{2\text{přev}}} = \frac{360}{50,2} = 7,2 \quad [4]$$

$$\xi_3 = 0,75 \quad \text{výstup vody z trubky do komory článku výparníku} \quad [5]$$

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 0,35 + 0,1 + 0,75 = 1,2$$

$$\Delta p_{m2\text{přev1}} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{2\text{přev1}}^2 \cdot \rho_{2\text{přev1}}}{2} = 1,2 \cdot \frac{0,56^2 \cdot 574,7}{2} = \underline{\underline{107 \text{ Pa}}}$$

6.2.3.3 Celková tlaková ztráta převáděcího potrubí vody z ekonomizéru do výparníku

$$\Delta p_{2\text{přev1}} = \Delta p_{t2\text{přev1}} + \Delta p_{m2\text{přev1}} = 42 + 108 = \underline{\underline{149 \text{ Pa}}}$$

6.2.4 Tlaková ztráta ve výparníku na straně vody a páry

6.2.4.1 Tlaková ztráta třením ve výparníku na straně vody a páry

$$\left. \begin{aligned} t_{2V} &= 350^\circ\text{C} \\ \rho'_{2V} &= 574,7 \text{ kg/m}^3 \\ \rho''_{2V} &= 113,6 \text{ kg/m}^3 \\ \eta'_{2V} &= 6,59 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \end{aligned} \right\} \quad [8]$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= 4 \cdot 10^{-5} \text{ m} \\ \psi &= 1,5 \end{aligned} \right\} \quad [6]$$

$$w_{2V} = \frac{\dot{m}_2}{S_2 \cdot \rho'_{2V}} = \frac{14,79}{0,0554 \cdot 574,7} = \underline{\underline{0,46 \text{ m/s}}}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}_{2V} &= \frac{w_{2V} \cdot d_2 \cdot \rho'_{2V}}{\eta'_{2V}} = \frac{0,46 \cdot 0,0128 \cdot 574,7}{6,59 \cdot 10^{-5}} = 51102 \\ \frac{\varepsilon}{d_2} &= \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0,0128} = 3,17 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \lambda_{2V} = \underline{\underline{0,027}}$$

$$x = \frac{0+1}{2} = \underline{\underline{0,5}}$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{t2V} &= \frac{\lambda_{2V} \cdot l_V \cdot w_{2V}^2 \cdot \rho'_{2V}}{2 \cdot d_2} \cdot \left[1 + \psi \cdot x \cdot \left(\frac{\rho'_{2V}}{\rho''_{2V}} - 1 \right) \right] = \\ &= \frac{0,027 \cdot 4,3 \cdot 0,46 \cdot 574,7}{2 \cdot 0,0126} \cdot \left[1 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot \left(\frac{574,7}{113,6} - 1 \right) \right] = \underline{\underline{2529 \text{ Pa}}} \end{aligned} \quad [6]$$

6.2.4.2 Tlaková ztráta místními odpory ve výparníku na straně vody a páry

$$\xi_1 = 0,4 \quad \text{vstup vody do trubkovnice} \quad [5]$$

$$\xi_2 = 0,1 \quad \text{ohyb trubky o } 180^\circ \quad \frac{R}{d_{2V}} = \frac{500}{12,6} = 39,7 \quad [4]$$

$$\xi_3 = 0,4 \quad \text{výstup páry z trubkovnice} \quad [5]$$

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 0,4 + 0,1 + 0,4 = 0,9$$

$$\Delta p_{m2V} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{2V}^2 \cdot \rho_{2V}}{2} = 0,9 \cdot \frac{0,46^2 \cdot 574,7}{2} = \underline{\underline{56 \text{ Pa}}}$$

6.2.4.3 Celková tlaková ztráta výparníku na straně vody a páry

$$\Delta p_{2V} = \Delta p_{t2V} + \Delta p_{m2V} = 2529 + 56 = \underline{\underline{2585 \text{ Pa}}}$$

6.2.5 Tlaková ztráta v převáděcím potrubí páry z výparníku do přehříváku

6.2.5.1 Tlaková ztráta třením v převáděcím potrubí páry z výparníku do přehříváku

$$\begin{aligned}
 t_{2\text{přev}2} &= 350^\circ\text{C} \\
 \rho_{2\text{přev}2} &= 113,6 \text{ kg/m}^3 \\
 \eta_{2\text{přev}2} &= 2,38 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \\
 \varepsilon &= 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} t_{2\text{přev}2} \\ \rho_{2\text{přev}2} \\ \eta_{2\text{přev}2} \\ \varepsilon \end{aligned}} \right\} [8]$$

$$w_{2\text{přev}2} = \frac{\dot{m}_2}{S_{2\text{přev}} \cdot \rho_{2\text{přev}2}} = \frac{14,79}{0,0462 \cdot 113,6} = \underline{\underline{2,82 \text{ m/s}}}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Re}_{2\text{přev}2} &= \frac{w_{2\text{přev}2} \cdot d_{2\text{přev}} \cdot \rho_{2\text{přev}2}}{\eta_{2\text{přev}2}} = \frac{2,28 \cdot 0,0502 \cdot 113,6}{2,38 \cdot 10^{-5}} = 675504 \\
 \frac{\varepsilon}{d_{2\text{přev}}} &= \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0,0502} = 7,97 \cdot 10^{-4}
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \text{Re}_{2\text{přev}2} \\ \frac{\varepsilon}{d_{2\text{přev}}} \end{aligned}} \right\} \Rightarrow \lambda_{2\text{přev}1} = \underline{\underline{0,019}}$$

$$\Delta p_{f2\text{přev}2} = \frac{\lambda_{2\text{přev}2} \cdot l_{2\text{přev}} \cdot w_{2\text{přev}2}^2 \cdot \rho_{2\text{přev}2}}{2 \cdot d_{2\text{přev}}} = \frac{0,019 \cdot 1,21 \cdot 2,82^2 \cdot 113,6}{2 \cdot 0,0502} = \underline{\underline{207 \text{ Pa}}}$$

6.2.5.2 Tlaková ztráta místními odpory v převáděcím potrubí páry z výparníku do přehříváku

$$\xi_1 = 0,35 \quad \text{vstup páry do trubky z komory článku výparníku} \quad [5]$$

$$\xi_2 = 0,1 \quad \text{ohyb trubky o } 180^\circ \quad \frac{R}{d_{2\text{přev}}} = \frac{360}{50,2} = 7,2 \quad [4]$$

$$\xi_3 = 0,75 \quad \text{výstup páry z trubky do komory článku přehříváku} \quad [5]$$

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 0,35 + 0,1 + 0,75 = 1,2$$

$$\Delta p_{m2\text{přev}2} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{2\text{přev}2}^2 \cdot \rho_{2\text{přev}2}}{2} = 1,2 \cdot \frac{2,82^2 \cdot 113,6}{2} = \underline{\underline{542 \text{ Pa}}}$$

6.2.5.3 Celková tlaková ztráta převáděcího potrubí páry z výparníku do přehříváku

$$\Delta p_{2\text{přev}2} = \Delta p_{f2\text{přev}2} + \Delta p_{m2\text{přev}2} = 207 + 542 = \underline{\underline{749 \text{ Pa}}}$$

6.2.6 Tlaková ztráta v přehříváku na straně páry

6.2.6.1 Tlaková ztráta třením v přehříváku na straně páry

$$\left. \begin{aligned} t_{2P} &= 458^\circ\text{C} \\ \rho_{2P} &= 59,7 \text{ kg/m}^3 \\ \eta_{2P} &= 2,76 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \end{aligned} \right\} \quad [8]$$

$$\varepsilon = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$w_{2P} = \frac{\dot{m}_2}{S_2 \cdot \rho_{2P}} = \frac{14,79}{0,0554 \cdot 59,7} = \underline{\underline{4,47 \text{ m/s}}}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}_{2P} &= \frac{w_{2P} \cdot d_2 \cdot \rho_{2P}}{\eta_{2P}} = \frac{4,47 \cdot 0,0126 \cdot 59,7}{2,76 \cdot 10^{-5}} = 121960 \\ \frac{\varepsilon}{d_2} &= \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0,0126} = 3,17 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \lambda_{2P} = \underline{\underline{0,0265}}$$

$$\Delta p_{t2P} = \frac{\lambda_{2P} \cdot l_P \cdot w_{2P}^2 \cdot \rho_{2P}}{2 \cdot d_2} = \frac{0,0265 \cdot 9,3 \cdot 4,47^2 \cdot 59,7}{2 \cdot 0,0126} = \underline{\underline{11691 \text{ Pa}}}$$

6.2.6.2 Tlaková ztráta místními odpory v přehříváku na straně páry

$$\xi_1 = 0,4 \quad \text{vstup páry do trubkovnice} \quad [5]$$

$$\xi_2 = 0,1 \quad \text{ohyb trubky o } 180^\circ \quad \frac{R}{d_{2P}} = \frac{500}{12,6} = 39,7 \quad [4]$$

$$\xi_3 = 0,4 \quad \text{výstup páry z trubkovnice} \quad [5]$$

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 0,4 + 0,1 + 0,4 = 0,9$$

$$\Delta p_{m2P} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{2P}^2 \cdot \rho_{2P}}{2} = 0,9 \cdot \frac{4,47^2 \cdot 59,7}{2} = \underline{\underline{538 \text{ Pa}}}$$

6.2.6.3 Celková tlaková ztráta přehříváku na straně páry

$$\Delta p_{2P} = \Delta p_{t2P} + \Delta p_{m2P} = 11691 + 538 = \underline{\underline{12229 \text{ Pa}}}$$

6.2.7 Tlaková ztráta v odváděcím potrubí páry

6.2.7.1 Tlaková ztráta třením v odváděcím potrubí páry

$$\left. \begin{aligned} t_{2odv} &= 565^{\circ}\text{C} \\ \rho_{2odv} &= 47,2 \text{ kg/m}^3 \\ \eta_{2odv} &= 3,22 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \\ \varepsilon &= 4 \cdot 10^{-5} \text{ m} \end{aligned} \right\} \quad [8]$$

$$w_{2odv} = \frac{\dot{m}_2}{S_{2odv} \cdot \rho_{2odv}} = \frac{14,79}{0,0462 \cdot 47,2} = \underline{\underline{6,79 \text{ m/s}}}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}_{2odv} &= \frac{w_{2odv} \cdot d_{2odv} \cdot \rho_{2odv}}{\eta_{2odv}} = \frac{6,79 \cdot 0,0502 \cdot 47,2}{3,22 \cdot 10^{-5}} = 500062 \\ \frac{\varepsilon}{d_{2odv}} &= \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0,0502} = 7,97 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \lambda_{2odv} = \underline{\underline{0,019}}$$

$$\Delta p_{t2odv} = \frac{\lambda_{2odv} \cdot l_{2odv} \cdot w_{2odv}^2 \cdot \rho_{2odv}}{2 \cdot d_{2odv}} = \frac{0,019 \cdot 0,5 \cdot 6,79^2 \cdot 47,2}{2 \cdot 0,0502} = \underline{\underline{206 \text{ Pa}}}$$

6.2.7.2 Tlaková ztráta místními odpory v odváděcím potrubí páry

$$\xi_1 = 0,35 \quad \text{vstup páry do trubky z komory článku přehříváku} \quad [5]$$

$$\Sigma \xi = \xi_1 = 0,35$$

$$\Delta p_{m2odv} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{2odv}^2 \cdot \rho_{2odv}}{2} = 0,35 \cdot \frac{6,79^2 \cdot 47,2}{2} = \underline{\underline{380 \text{ Pa}}}$$

6.2.7.3 Celková tlaková ztráta odváděcího potrubí páry

$$\Delta p_{2odv} = \Delta p_{t2odv} + \Delta p_{m2odv} = 206 + 381 = \underline{\underline{586 \text{ Pa}}}$$

6.2.8 Celková tlaková ztráta na straně vody a páry

$$\begin{aligned} \Delta p_2 &= \Delta p_{2přiv} + \Delta p_{2E} + \Delta p_{2přev1} + \Delta p_{2V} + \Delta p_{2přev2} + \Delta p_{2P} + \Delta p_{2odv} = \\ &= 55 + 1322 + 149 + 2585 + 749 + 12229 + 586 = \underline{\underline{17675 \text{ Pa}}} \end{aligned}$$

6.3 Souhrn tlakových ztrát parního generátoru

6.3.1 Strana sodíku

	l [m]	Δp_t [Pa]	Δp_m [Pa]	Δp [Pa]
přiváděcí potrubí	3,2	1029	1219	2248
přehřívák	9,3	535	89	624
převáděcí potrubí P-V	0,5	156	1441	1597
výparník	4,7	268	68	336
převáděcí potrubí V-E	0,5	151	1395	1546
ekonomizér	13	750	122	872
odváděcí potrubí	3,2	964	1110	2074
Σ	34,4	3853	5444	9297

6.3.2 Strana vody a páry

	l [m]	Δp_t [Pa]	Δp_m [Pa]	Δp [Pa]
přiváděcí potrubí	0,5	12	43	55
ekonomizér	13	1281	41	1322
převáděcí potrubí E-V	1,2	42	107	149
výparník	4,7	2529	56	2585
převáděcí potrubí V-P	1,2	207	542	749
přehřívák	9,3	11691	538	12229
odváděcí potrubí	0,5	206	380	586
Σ	29,4	15968	1707	17675

7. Pevnostní výpočet parního generátoru

Pevnostní výpočet je proveden podle normy ČSN 69 0010 a má kontrolní charakter.

7.1 Pevnostní výpočet trubek

7.1.1 Stanovení dovoleného namáhání trubek

Všechny trubky parního generátoru budou ze stejného materiálu a dovolené namáhání je stanoveno pro největší výpočtovou teplotu.

$$t = 565^{\circ}\text{C}$$

$$\sigma_{Kt} = 250\text{MPa} \quad x_1 = 1,5$$

$$\sigma_{TPt10^n} = 112\text{MPa} \quad x_2 = 1,5$$

$$\sigma_{Tr10^n} = 85\text{MPa} \quad x_3 = 1$$

$$\sigma_D = \min\left\{\frac{\sigma_{Kt}}{x_1}; \frac{\sigma_{TPt10^n}}{x_2}; \frac{\sigma_{Tr10^n}}{x_3}\right\} = \min\left\{\frac{250}{1,5}; \frac{112}{1,5}; \frac{85}{1}\right\} = \min\{166,7; 74,7; 85\} = \underline{\underline{74,7\text{MPa}}}$$

7.1.2 Výpočet tloušťky stěny teplosměnné trubky

$$s_0 = \frac{p_2 \cdot D_2}{2 \cdot \sigma_D + p_2} = \frac{16,5 \cdot 19}{2 \cdot 74,7 + 16,5} = \underline{\underline{1,9\text{mm}}}$$

$$c_1 = 0,1\text{mm} \quad \text{přídavek na ovalitu}$$

$$c_2 = 0,5\text{mm} \quad \text{přídavek na korozi}$$

$$s_{\min} = s_0 + c_1 + c_2 = 1,9 + 0,1 + 0,5 = \underline{\underline{2,5\text{mm}}}$$

$$s_2 > s_{\min} \Rightarrow \text{Navrhnutá trubka vyhovuje.}$$

7.1.2 Výpočet tloušťky stěny obalové trubky

Výpočtový přetlak sodíku $p_1 = 0,6\text{MPa}$

$$s_0 = \frac{p_1 \cdot D_1}{2 \cdot \sigma_D + p_1} = \frac{0,6 \cdot 19}{2 \cdot 74,7 + 0,6} = \underline{\underline{0,9\text{mm}}}$$

$$c_1 = 0,1mm \quad \text{přídavek na ovalitu}$$

$$c_2 = 1mm \quad \text{přídavek na korozi}$$

$$s_{\min} = s_0 + c_1 + c_2 = 0,9 + 0,1 + 1 = \underline{\underline{2mm}}$$

$$s_1 > s_{\min} \Rightarrow \text{Navrhnutá trubka vyhovuje.}$$

7.1.4 Výpočet tloušťky stěny přiváděcího, převáděcího a odváděcího potrubí vody a páry

$$s_0 = \frac{p_2 \cdot D_{2přiv}}{2 \cdot \sigma_D + p_2} = \frac{16,5 \cdot 70}{2 \cdot 74,7 + 16,5} = \underline{\underline{7mm}}$$

$$c_1 = 0,1mm \quad \text{přídavek na ovalitu}$$

$$c_2 = 1mm \quad \text{přídavek na korozi}$$

$$s_{\min} = s_0 + c_1 + c_2 = 7 + 0,1 + 1 = \underline{\underline{8,1mm}}$$

$$s_{2přiv} > s_{\min} \Rightarrow \text{Navrhnutá trubka vyhovuje.}$$

7.1.5 Výpočet tloušťky stěny přiváděcího, převáděcího a odváděcího potrubí sodíku

$$s_0 = \frac{p_1 \cdot D_{1přiv}}{2 \cdot \sigma_D + p_1} = \frac{0,6 \cdot 88,9}{2 \cdot 74,7 + 0,6} = \underline{\underline{0,4mm}}$$

$$c_1 = 0,1mm \quad \text{přídavek na ovalitu}$$

$$c_2 = 1mm \quad \text{přídavek na korozi}$$

$$s_{\min} = s_0 + c_1 + c_2 = 0,4 + 0,1 + 1 = \underline{\underline{1,5mm}}$$

Podle normy pro $76 < D < 95mm$ minimální tloušťka stěny trubky je 3,5mm.

$$s_{1přiv} > s_{\min} \Rightarrow \text{Navrhnutá trubka vyhovuje.}$$

7.2 Pevnostní výpočet trubkovnice

Aby byla možná sériová výroba v celém parním generátoru jsou použity trubkovnice o stejných rozměrech, které jsou vypočteny pro parametry přehříváku.

7.2.1 Stanovení dovoleného namáhání trubkovnice

$$t = 565^{\circ}\text{C}$$

$$\sigma_{Kt20} = 490\text{MPa}$$

$$\sigma_{Pt} = 112\text{MPa}$$

$$x_z = 1,1$$

$$\sigma_D = \min\left\{\frac{\sigma_{Kt20}}{x_z}; \frac{\sigma_{Pt}}{x_z}\right\} = \min\left\{\frac{490}{1,1}; \frac{112}{1,1}\right\} = \min\{445,5; 101,8\} = \underline{\underline{101,8\text{MPa}}}$$

7.2.2 Výpočet tloušťky trubkovnice

$$D_t = 200 + 40 = 240\text{mm} \quad \text{střední průměr vstupní a výstupní komory článku}$$

$$d' = 19,1\text{mm} \quad \text{průměr otvorů pro trubky v trubkovnici}$$

$$C_3 = 0,45$$

$$C_V = \frac{1}{\sqrt{1-n \cdot \left(\frac{d'}{D_t}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-37 \cdot \left(\frac{19,1}{240}\right)^2}} = \underline{\underline{1,14}}$$

$$s_0 = C_3 \cdot C_V \cdot D_t \cdot \sqrt{\frac{p_2}{\sigma_D}} = 0,45 \cdot 1,14 \cdot 240 \cdot \sqrt{\frac{16,5}{101,8}} = \underline{\underline{49,7\text{mm}}}$$

$$c_1 = 1\text{mm} \quad \text{přídavek na korozi}$$

$$s = s_0 + c_1 = 49,6 + 1 = \underline{\underline{50,7\text{mm}}}$$

Tloušťku trubkovnice zaokrouhluji na 51mm.

7.2.3 Kontrola trubkovnice na technologická hlediska

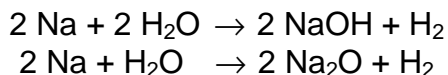
$$t = 25\text{mm} \quad \text{Rozteč teplosměnných trubek}$$

$$s_0 = \frac{0,435 \cdot D_2 + 0,15}{t - d'} = \frac{0,435 \cdot 19 + 0,15}{25 - 19,1} = \underline{\underline{1,43\text{mm}}}$$

Trubkovnice je většího rozměru, z technologického hlediska je vyrobitelná.

8. Posouzení PG z hlediska jaderné bezpečnosti

Na návrh jaderných zařízení se kladou přísné nároky kvůli nutnosti zabezpečení absolutní bezpečnosti a spolehlivosti. Všechny těsnění a sváry musí být dokonalé, aby zabránily vniknutí vody nebo páry do sodíku, což by způsobilo řadu chemických a fyzikálních dějů.

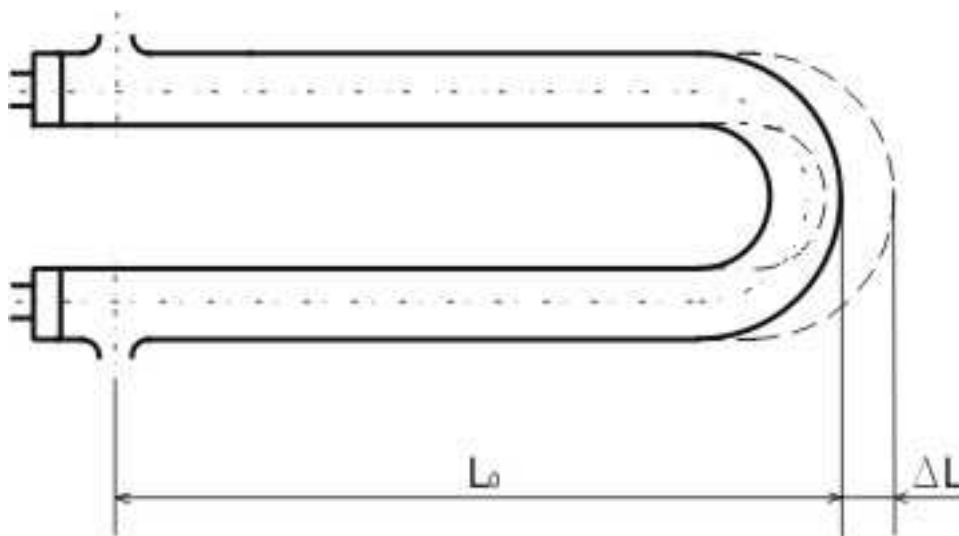


Vzniknutý vodík nebo zvýšený přetlak může způsobit explozi, což by mohlo vést k přímé havárii jaderného reaktoru. Tříokruhová koncepce elektráren s rychlým reaktorem zabezpečí minimální pravděpodobnost vniknutí vody přímo do radioaktivního sodíku. Detekce případného vniknutí se provádí snadno (nárůst teploty kvůli exotermické reakci, nárůst tlaku,...).

Dalším možným problémem může být prasknutí od napětí, vzniklé při tepelných dilatacích. Vymezení pnutí je zabezpečeno výběrem stejného materiálu pro celé zařízení, předeřtátím a návrhem tvaru článku podobného ležatému U. Je taky třeba dbát na vhodnou izolaci celého zařízení, hlavně kvůli minimalizaci ztrát.

Parní genrátor je rozdělen do 12 větví, což umožňuje odstávku jedné nebo více větví v případě havárie. Havarijní systém umožní odhalení vadné větve, okamžité uzavření a drenážování kvůli minimalizaci průniku.

Pro reaktory BOR 60 a BN 350 v SSSR byli montovány parní generátory článkové koncepce a pracovali s vynikajícími provozními zkušenostmi [2].



obr. 8.1 Tepelná dilatace článku

9. Závěr

Tato práce se zabývala návrhem parního generátoru vyhřívaného tekutým sodíkem o tepelném výkonu 40 MW. Práce obsahuje výběr projektové varianty, výpočet teplosměnné plochy a tlakových ztrát, kontrolní pevnostní výpočet a posouzení parního generátoru z hlediska jaderné bezpečnosti.

Volil jsem protiproudý rekuperační výměník článkové koncepce. Návrh vycházel z konstrukčního řešení prvního parního generátoru pro reaktor BOR 60. Výměník se skládá z dvanácti paralelních větví se třemi články. Voda a pára bude proudit uvnitř 37 teplosměnných trubek a tekutý sodík v mezitrubkovém prostoru uvnitř obalové trubky. Všechny části výměníku budou ze stejné žárovebné oceli. Všechny trubky jsou válcované bez podélných svarů. Tepelný výpočet určil velikost teplosměnných ploch a tím pádem délky článků. Vzhledem k délce jednotlivých článků není možnost spojit je do jednoho. Hydraulický výpočet řešil tlakové ztráty výměníku jak na straně sodíku, tak i na straně vody a páry. Pevnostní výpočet byl kontrolního charakteru, vypočítaly se minimální tloušťky stěn jednotlivých trubek a porovnávalo se to s navrženými tloušťkami. Ve všech případech vyšly menší než navržená hodnota, tj. není nutno předimenzovat je. V posouzení zařízení z hlediska jaderné bezpečnosti jsou popsány výhody takového typu výměníku a záležitosti, které mohou vést k havárii nebo k poškození zařízení.

Z vypočtených hodnot a odborné literatury můžu předpokládat, že parní generátor nebude ztrátový a bude pracovat spolehlivě. Koncepce výměníku je jednoduchá jak z technologického tak i z konstrukčního hlediska, proto celou výrobu a montáž lze provést v ČR. Pro výměník je nutno dále navrhnout tepelnou izolaci, technologický a konstrukční postup a přístrojové vybavení.

10. Seznam použitých zdrojů

- [1] Bečvář, J. a kol.: Jaderné elektrárny. SNTL/ALFA Praha, 1988
- [2] Matal, O.: Konstrukční cvičení. Ediční středisko VUT Brno, 1988
- [3] Čirkin, V. S.: Těpofyzičeskýje svojstva materiálův jadernoj techniky. Atomizdat Moskva, 1968
- [4] Mikula, J. a kol.: Potrubí a armatury. SNTL Praha, 1969
- [5] Krbek, J. a Polesný, B.: Závěrečný projekt. Ediční středisko VUT Brno, 1995
- [6] Doroščuk V. E.: Krizisy tēploobmena při kipijenii vody v trubach, Energoatomizdat Moskva, 1983
- [7] Fedorov, L. F., Titov, V. F., Rassočin, N. G.: Parogeneratory atomnych elektrostancij, Energoatomizdat Moskva, 1992
- [8] software SteamTab, ChemicalLogic (<http://www.chemicallogic.com>)
- [9] Thermal and structural properties of Cr-Mo steels, (<http://www-ferp.ucsd.edu/LIB/PROPS/PANOS/fs.html>)
- [10] DIN 17 175 – Bezešvé trubky z žáropevných ocelí
- [11] DIN 2448 – Rozměry a délková hmotnost bezešvých trubek
- [12] ČSN 69 0010 – Tlakové nádoby stabilní

11. Seznam příloh

- 1, Termofyzikální vlastnosti sodíku podle [3]
- 2, Termofyzikální a materiálové vlastnosti Cr-Mo oceli podle [9]
- 3, Výkresová dokumentace vybraných částí

12. Přílohy

t [°C]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kg·K]	λ [W/m·K]	ν [m ² /s]	Pr [-]	σ [N/m]
27	967	1230	133	-	-	-
67	960	1290	127	-	-	-
97	954	1360	123	-	-	-
127	920	1373	84	$6,6 \cdot 10^{-7}$	$9,9 \cdot 10^{-3}$	0,188
177	908	1340	82	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$8,2 \cdot 10^{-3}$	0,183
227	897	1327	80	$4,7 \cdot 10^{-7}$	$7,0 \cdot 10^{-3}$	0,178
277	886	1306	77	$4,1 \cdot 10^{-7}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	0,173
327	874	1298	75	$3,7 \cdot 10^{-7}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	0,168
377	862	1285	72	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	0,163
427	849	1273	70	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	0,158
477	838	1264	67	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	0,153
527	827	1256	65	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	0,149
577	816	1256	63	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	0,145
627	803	1256	60	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	0,141
677	790	1264	58	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	-

tab. 9.1 Termofyzikální vlastnosti sodíku (V.S. Čirkin: *Těplofyzické sjeje svojstva matěrialov jaděrněj těchniky*, Atomizdat, Moskva 1968)

t [°C]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kg·K]	λ [W/m·K]	E [GPa]	σ [GPa]
20	7700,0	450,0	24,0	217,0	600,0
100		480,0	24,1	213,0	560,0
200		520,0	25,0	206,0	528,7
300		560,0	25,5	199,0	500,0
400		620,0	26,0	190,0	461,8
500		700,0	26,2	181,0	400,0
600		710,0	26,5	171,0	270,0
700		965,3	26,8	159,7	100,0

tab. 9.2 Termofyzikální a materiálové vlastnosti Cr-Mo ocelí
(<http://www-ferp.ucsd.edu/LIB/PROPS/PANOS/fs.html>)