

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

## **Parogenerátory tlakovodních jaderných elektráren**

## **Steam Generators for PWR Nuclear Power Stations**

Vedoucí bakalářské práce:

Student:

prof.Ing.Pavel Kolat,DrSc.

Ondřej Štukavec

Ostrava 2014

## Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Štukavec**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení  
Téma: **Parogenerátory tlakovodních jaderných elektráren  
Steam Generators for PWR Nuclear Power Stations**

### Zásady pro vypracování:

Zpracujte a předložte formou rešerše literatury souhrn informací o koncepci tlakovodních parních generátorů pro jaderné elektrárny. Ve výpočtové části proveďte výpočet základních rozměrů parogenerátoru tepelným výpočtem. Proveďte zjednodušený hydraulický výpočet. Tepelný výkon 230 MWt. Parní výkon 452 t/hod. Tlak syté páry 4,6 MPa. Teplota napájecí vody 220 °C.

### Seznam doporučené odborné literatury:


Radko Hejzlar : Stroje a zařízení jaderných elektráren. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03190-X.  
Oldřich Mátal: Jaderné reaktory a jejich chlazení. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. ISBN 80-214-2028-6.  
František Hezoučký: Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 17.02.2014  
Datum odevzdání: 19.05.2014



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

## MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ STUDENTA

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce prof. Ing. Pavla Kolata, DrSc. a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....

.....  
Ondřej Štukavec

## PROHLÁŠENÍ STUDENTA

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vlastní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přeměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....

.....

Ondřej Štukavec

Ondřej Štukavec

Stará Ves 195

743 01 Bílovec

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

ŠTUKAVEC, O. Parogenerátory tlakovodních jaderných elektráren. Ostrava: katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2014.

Bakalářská práce, vedoucí prof.Ing.Pavel Kolat, DrSc.

Bakalářská práce se zabývá koncepcí parních generátorů v elektrárnách s tlakovodními reaktory. V úvodu jsem popsal současnou energetickou koncepci ve světě a popsal fungování jaderné elektrárny, včetně popisu některých částí. Následně jsem zpracoval problematiku parních generátorů u nás a ve světě. Ve výpočtové části jsem provedl návrh parogenerátoru zjednodušeným tepelným výpočtem pro malou jadernou elektrárnu. Poté jsem provedl zjednodušený hydraulický výpočet pro orientační zjištění tlakových ztrát.

Na závěr jsem doporučil typ parogenerátoru pro malou jadernou elektrárnu a svůj výběr zdůvodnil.

## ANNOTATION OF THESIS

ŠTUKAVEC, O. Steam Generators for PWR Nuclear Power Stations. Ostrava: Department of Power Engineering, Faculty of Mechanical Engineering VŠB - Technical University of Ostrava, 2014. Bachelor's thesis, supervisor: prof.Ing.Pavel Kolat, DrSc.

The bachelor thesis is focused on the conception of steam generators for pressurised light-water moderated and cooled reactor nuclear power stations. The introduction contains description of the current energy conception in the world and I described the principle of nuclear power station, including narration of some parts in nuclear power station. The following background research encompasses the issue of steam generators in the Czech Republic and steam generators in the world. Subsequently I performed simplified thermal calculation for project of steam generator for small nuclear power station. Afterwards I used simplified hydraulic calculation to find out pressure loss.

In closing I want to commend the right type of steam generator for small nuclear power station on the grounds of gained pieces of knowledge.

## OBSAH:

SEZNAM POUŽITÍHO ZNAČENÍ.....	8
1. ÚVOD.....	12
2. JADERNÁ ELEKTRÁRNA [3,6,9].....	13
2.1 Popis částí jaderné elektrárny [3,6,9].....	14
2.1.1 Primární okruh jaderné elektrárny [3,10,9,7,5,8].....	14
2.2 Budoucí vývoj jaderné energetik [22,23,24,25,26,27].....	22
3. VÝMĚNÍKY TEPLA [1].....	23
3.1 Povrchové rekuperační výměníky [1].....	23
4. PAROGENERÁTORY [1,2,5].....	26
4.1 Parogenerátory v elektrárnách s tlakovodními reaktory [1,2,4,12].....	29
4.2 Parogenerátory reaktorů VVER – 440 [1,2].....	32
4.3 Parogenerátory reaktorů VVER – 1000 [1,15].....	35
4.4 Svislé parní generátory [1].....	38
4.4.1 Svislý parogenerátor s vyztuženou trubkovnicí [1].....	40
4.4.2 Svislý parogenerátor se svislým kolektorem I. vody [1].....	41
4.4.3 Parogenerátor s mírným předeřevem vody [1].....	42
4.4.4 Parogenerátor Trepaud s přímými, mírně vlnitými trubkami [1]...	43
4.5 Porovnání svislých a horizontálních parogenerátorů [1].....	45
4.6 Rozdělení parogenerátorů z hlediska proudění II. vody [1].....	46
4.6.1 Parogenerátor s přirozeným oběhem sekundární vody [1].....	46
4.6.2 Parogenerátor s nucenou cirkulací sekundární vody [1].....	47
4.6.3 Parogenerátory průtočné [1].....	48
4.7 Charakteristika procesů probíhajících v parogenerátoru [2,3].....	49
4.7.1 Konstrukční a projekční specifikace parogenerátorů [2].....	51
4.7.1.1 Výrobní a provozní specifikace horizontálních parogenerátorů pro VVER [2].....	53
5. TEPELNÝ VÝPOČET PAROGENERÁTORU [4,16,17,18,19,20].....	53
5.1 Zadané parametry.....	53
5.2 Počet teplosměnných trubek a celková průtočná plocha parogenerátoru....	54
5.3 Výpočet součinitele přestupu tepla mezi I.médiem a stěnou trubky.....	56
5.4 Součinitel přestupu tepla mezi stěnou trubky a parovodní směsí.....	57
5.5 Součinitel prostupu tepla.....	58
5.6 Výpočet teplosměnné plochy a střední délky trubky.....	61

5.7 Parní a tepelný výkon parogenerátoru.....	61
6. HYDRAULICKÝ VÝPOČET [1,15].....	63
6.1 Tlaková ztráta v přiváděcím potrubí.....	64
6.2 Tlaková ztráta pro přiváděcí část kolektoru.....	64
6.3 Tlaková ztráta pro střední řadu trubek.....	65
6.4 Tlaková ztráta teplosměnných trubek při turbulentním prouděním.....	65
6.5 Tlaková ztráta změnou směru o 180°.....	66
6.6 Tlaková ztráta na výstupu z teplosměnných trubek.....	67
6.7 Tlaková ztráta ve výstupní části kolektoru.....	67
6.8 Tlaková ztráta v odváděcím potrubí.....	68
6.9 Celková tlaková ztráta.....	68
7. ZÁVĚR.....	70
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	72
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	75
SEZNAM DIAGRAMŮ.....	75
PŘÍLOHY.....	76

## Seznam značení

Zkratka	Název
eV	Elektronvolt – jednotka energie Platí ekvivalence $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ J}$
ppb	Jednotka pro vyjádření koncentrace Parts per billion – počet částic na miliardu
NT	Nízkotlaké ohříváky
VT	Vysokotlaké ohříváky
PG	Parogenerátor
I. médium/okruh	Primární médium/okruh
II. médium/okruh	Sekundární médium/okruh
PWR	Pressurised light-Water moderated and cooled Reactor
VVER	Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor
EPR	European Pressurised Water Reactor
BWR	Boiling Water Reactor
HWR	Heavy Water Cooled and Moderated Reactor
CANDU	CANada Deuterium Uranium
SGHWR	Steam Generating Heavy Water Reactor
GCR	Gas Cooled, Grafite Moderated Reactor
AGR	Advanced Gas Cooled, Grafite Moderated Reactor
MAGNOX	Magnesium oxid
RBMK	Reaktor Bolšoj Moščnoski Kanalnyj
HTGR	High Temperature, Gas Cooled, Grafite Moderated Reactor
FBR	Fast Breeder Reactor
JE	Jaderná elektrárna

Zkratka	Název	Jednotka
$Q_{PG}$	Tepelný výkon parogenerátoru	[MWt]
$G_{PG}$	Parní výkon parogenerátoru	[t/hod]
$p_s$	Tlak syté páry	[MPa]
$p_I$	Tlak v primárním okruhu	[MPa]
$t_{I1}$	Teplota média v I. okruhu na vstupu do PG	[°C]
$t_{I2}$	Teplota média v I. okruhu na výstupu do PG	[°C]
$t_{stř}$	Střední teplota primárního média	[°C]
$\rho$	Hustota média	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$v$	Měrný objem	[m <sup>3</sup> /kg]



$\eta$	Dynamická viskozita	$[\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}]$
$\nu$	Kinematická viskozita	$[\text{m}^2/\text{s}]$
Pr	Prandtlovo kritérium	$[-]$
$i_{I1}$	Entalpie I. média na vstupu do PG	$[\text{kJ}/\text{kg}]$
$i_{I2}$	Entalpie I. media na výstupu z PG	$[\text{kJ}/\text{kg}]$
$i'$	Entalpie syté kapaliny	$[\text{kJ}/\text{kg}]$
$i''$	Entalpie syté páry	$[\text{kJ}/\text{kg}]$
$i_{NV}$	Entalpie napájecí vody	$[\text{kJ}/\text{kg}]$
$d_1$	Vnitřní průměr teplosměnných trubek	$[\text{mm}]$
$d_2$	Vnější průměr teplosměnných trubek	$[\text{mm}]$
$w_v$	Střední rychlost proudění I. media	$[\text{m}/\text{s}]$
$\dot{m}_I$	Hmotnostní tok primárního média	$[\text{kg}/\text{s}]$
$\eta_{PG}$	Účinnost parogenerátoru	$[-]$
S	Celková průtočná plocha	$[\text{m}^2]$
$S_{tr}$	Průtočná plocha jedné trubky	$[\text{m}^2]$
n	Teoretický počet trubek	$[-]$
$n_{tr}$	Skutečný počet trubek	$[-]$
$S_C$	Celková skutečná průtočná plocha	$[\text{m}^2]$
w	Skutečná rychlost proudění I. média	$[\text{m}/\text{s}]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[-]$
$t_{trs}$	Teoretická střední teplota stěny trubky	$[\text{°C}]$
$t_s$	Teplota syté páry	$[\text{°C}]$
Nu	Nusseltovo kritérium	$[-]$
$Pr_{tr}$	Prandtlovo kritérium pro střední teplotu stěny trubky	$[-]$
$\alpha_1$	Součinitel přestupu tepla mezi I. médiem a stěnou trubky	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
$q_v$	Zvolená hustota tepelného toku	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$
$\alpha_2$	Součinitel přestupu tepla mezi stěnou trubky a parovodní směsí	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
T	teplota syté páry při daném tlaku $p_s$	$[\text{K}]$
k	Součinitel prostupu tepla	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
$\lambda_{tr}$	Součinitel tepelné vodivosti materiálu trubky pro materiál 08Ch18N10T	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
$\Delta t_1$	Teplotní rozdíl mezi primárním a sekundárním médiem na vstupu do PG	$[\text{°C}]$
$\Delta t_2$	Teplotní rozdíl mezi primárním a sekundárním médiem na výstupu z PG	$[\text{°C}]$

$\Delta t_{In}$	Střední logaritmický teplotní spád	[°C]
$q$	Vypočítaný tepelný tok	[W/m <sup>2</sup> ]
$\Delta q$	Zjištění odchylky tepelného toku	[%]
$q_l$	Teplo sdělené 1m stěny trubky	[W/m]
$t_{trI}$	Povrchová teplota stěny trubky na straně primárního média	[°C]
$t_{trII}$	Povrchová teplota stěny trubky na straně sekundárního média	[°C]
$t_{trS}$	Střední teplota stěny trubky	[°C]
$\Delta t_{trRel}$	Relativní chyba volené hodnoty střední teploty stěny trubky	[%]
$S_C$	Celková teplosměnná plocha	[m <sup>2</sup> ]
$L$	Celková délka trubek parního generátoru	[m]
$L_{tr}$	Střední délka trubky	[m]
$l_v$	Výparné teplo	[kJ/kg]
$G$	Parní výkon parogenerátoru při teplotě napájecí vody 220°C	[kg/s]
$\Delta G_{PG}$	Kontrola vypočteného parního výkonu vzhledem k zadanému	[%]
$Q_{PGv}$	Vypočítaný tepelný výkon	[kW]
$\Delta G_{PGrel}$	Kontrola vypočteného tepelného výkonu vzhledem k zadanému	[%]
$\rho_p$	Hustota média	[kg/m <sup>3</sup> ]
$t$	Teplota média na vstupu do PG	[°C]
$d_p$	Vnitřní průměr příváděcího potrubí	[m]
$d_k$	Vnitřní průměr příváděcího kolektoru	[m]
$L_k$	Délka příváděcího kolektoru	[m]
$S_c$	Průtoční plocha teplosměnných trubek	[m <sup>2</sup> ]
$w_p$	Střední rychlost proudění média pro přívodové potrubí	[m/s]
$\xi_{k1}$	Ztrátový součinitel pro příváděcí kolektor	[-]
$p_{z1}$	Tlaková ztráta v příváděcím potrubí	[Pa]
$w_k$	Střední rychlost proudění pro příváděcí část kolektoru	[m/s]
$\xi_{k2}$	Součinitel ztrát pro příváděcí část kolektoru	[-]
$p_{z2}$	Tlaková ztráta pro příváděcí část kolektoru	[Pa]
$w_{st}$	Střední rychlost média vstupující do střední řady trubek	[m/s]
$\xi_{k3}$	Součinitel ztrát pro střední řadu trubek	[-]
$p_{z3}$	Tlaková ztráta pro střední řadu trubek	[Pa]

$\lambda$	Součinitel tření při turbulentním proudění	[-]
$p_{z4}$	Tlaková ztráta teplosměnných trubek při turbulentním proudění	[Pa]
$\xi_{k4}$	Ztrátový součinitel při změně směru o 180°	[-]
$p_{z5}$	Tlaková ztráta změnou směru o 180°	[Pa]
$t_i$	Teplota média	[C°]
$\rho_{vy}$	Hustota média	[kg/m <sup>3</sup> ]
$w_{stvy}$	Výstupní střední rychlost ze střední řady trubek	[m/s]
$\xi_{k5}$	Ztrátový součinitel	[-]
$p_{z6}$	Tlaková ztráta na výstupu z teplosměnných trubek	[Pa]
$d_{k1}$	Vnitřní průměr kolektoru	[m]
$L_{k1}$	Délka kolektoru	[m]
$d_{od}$	Vnitřní průměr odvodového potrubí	[m]
$w_{k1}$	Střední rychlost ve vystupující části kolektoru	[m/s]
$\xi_{k6}$	Ztrátový součinitel ve vystupující části kolektoru	[-]
$p_{z7}$	Tlaková ztráta ve výstupní části kolektoru	[Pa]
$w_{od}$	Střední rychlost proudění média ve výstupním potrubí	[m/s]
$\xi_{k7}$	Ztrátový součinitel ve výstupním potrubí	[-]
$p_{z8}$	Tlaková ztráta v odváděcím potrubí	[Pa]
$p_{zc}$	Celková tlaková ztráta	[Pa]

## 1. Úvod

Trvalý rozvoj moderní společnosti by nebyl možný bez získávání energie z okolního prostředí. S rostoucími nároky lidstva na životní komfort logicky vzrůstá i spotřeba energie. Proto transformace a zachování energie jsou stěžejními problémy, kterými se zabývá lidstvo už od nepaměti.

Nutno podotknout, že poptávka mnohdy převyšuje nabídku a to je problém, který řeší ne jeden stát na světě. Vždyť za posledních 500 let vzrostla spotřeba energie na osobu 10x a za posledních 2000 let dokonce 20x. Dnes se uvádí hodnota spotřeby energie na jednoho člověka kolem 1000 MJ/den. Energii můžeme obecně získávat z obnovitelných a neobnovitelných zdrojů, avšak toto dělaní je trochu zavádějící, jelikož jsou téměř všechny zdroje energie, vzhledem k platnosti zákona o entropii, neobnovitelné. Klasicky se ovšem považují za obnovitelné zdroje vítr, voda, energie slapových sil, geotermální energie a solární energii. Za neobnovitelné zdroje můžeme uvést uhlí, ropu, zemní plyn a břidlicový plyn. Ze všech zdrojů energie však měly, mají a nějakou dobu určitě budou mít největší podíl uhlí, ropa a zemní plyn.

Přes všechny prognózy zůstanou tyto suroviny dominantní i přesto, že podle studií z poloviny 20. století už měly být dávno vyčerpány. Nové metody geologického výzkumu a technologický pokrok však umožňují nacházet a využívat nové, dříve nerentabilní, zdroje uhlí a ropy. V dnešní době se opět tvrdí, že zásoby těchto dvou stěžejních surovin nám vystačí na příštích 50 let, avšak jak to bude ve skutečnosti, nikdo nedokáže odhadnout. Některé zdroje uvádějí, že se na Zemi vyskytují naleziště těžitelné po dalších 20 000 let. Tak nebo onak, těžba ropy a zejména uhlí v povrchových dolech měla devastující vliv na přírodní prostředí. Těžba, zpracování a hlavně následné využití má však značně zničující vliv na naši atmosféru v podobě emisí skleníkových plynů. Proto je tendence v nejbližší době nastolit trend zvýšení využití energetických zdrojů neprodukcujících emise. Vezme-li v úvahu narůstající spotřebu energie a téměř geometrický nárůst obyvatel, vyjde nám trvale neudržitelný stav současné energetické koncepce, co se týče spotřeby i dopadu na životní prostředí. Jako světlo na konci tunelu se jeví využití jaderné energie ve formě jaderného štěpení nebo jaderné syntézy.

## 2. Jaderná elektrárna [3,6,9]

Jaderná elektrárna je v podstatě klasická tepelná elektrárna pouze s tím rozdílem, že zdrojem tepelné energie je štěpení uranu  $U^{235}$  v jaderném reaktoru. První jaderná elektrárna byla spuštěna v roce 1954 v Obninsku u Moskvy. Elektrárna měla vodou chlazený reaktor s grafitovými regulačními tyčemi a měla na dnešní poměry velmi slabý výkon – pouze 5 MW. Nicméně se jednalo o první civilní využití jaderné energie v historii lidstva. V současné době je provozováno přes 436 jaderných reaktorů v 30 zemích světa. Celkový výkon jaderných elektráren je 372 000 MWe, takže pokrývají kolem 15% spotřeby elektrické energie ve světě. Krom toho je také provozováno 250 výzkumných reaktorů pro vědecké účely. Dalších 220 reaktorů je využíváno pro pohon lodí a ponorek.

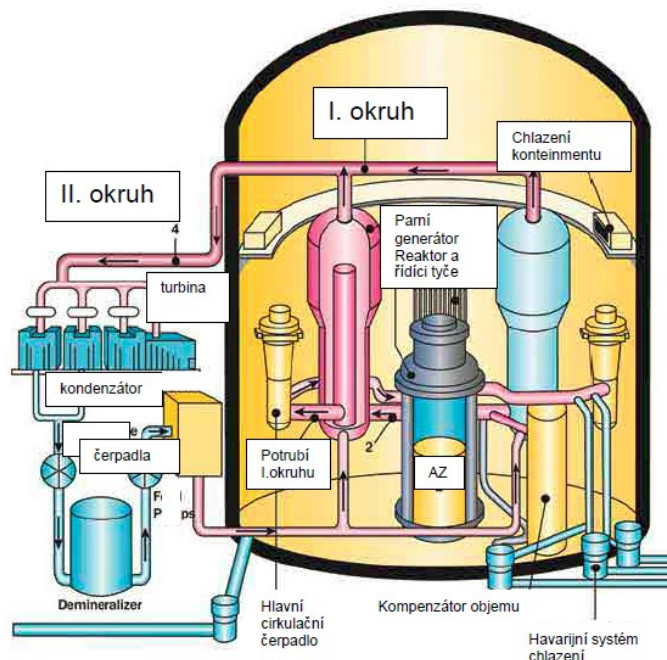


Obr.2.1 Rozmístění jaderných elektráren ve světě [3]

## 2.1 Popis částí jaderné elektrárny [6,9,3]

Jaderných elektráren je celá řada typů, avšak pro mou práci jsou relevantní jen elektrárny typu PWR (u nás použito ruské značení VVER). Tento typ jaderné elektrárny je dvouokruhový. Pracuje se dvěma okruhy: s primárním a sekundárním.

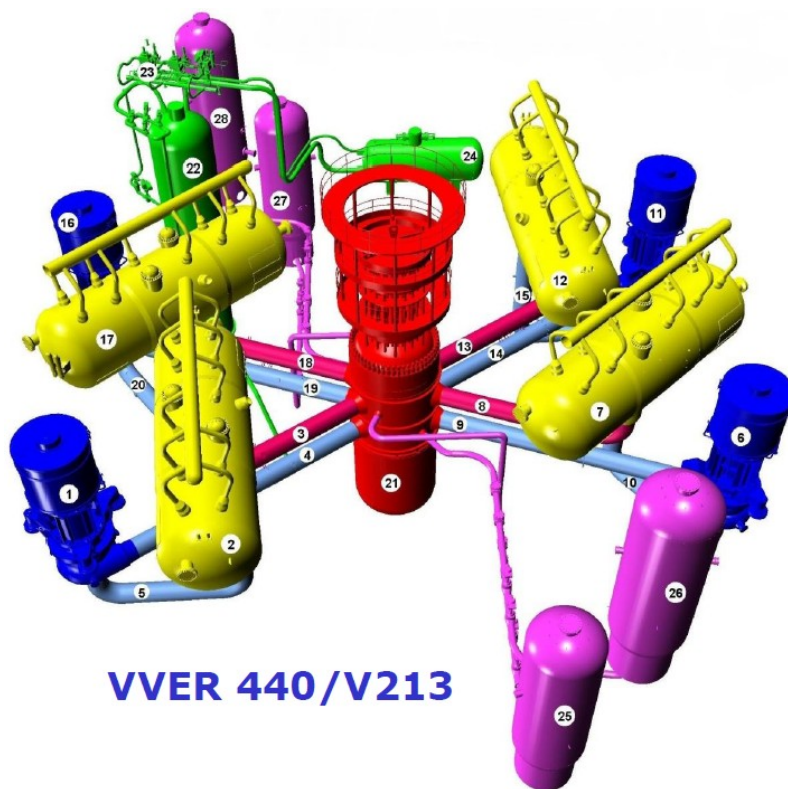
Primární okruh slouží k chlazení aktivní zóny a předává teplo sekundárnímu okruhu v parogenerátoru. Po ochlazení voda putuje zpět do reaktoru. Na sekundární straně se v důsledku intenzivního přestupu tepla generuje pára, která nejdříve prochází separátorem páry, aby se zbavila přebytečné vlhkosti. Následně putuje na turbínu, která pohání elektrický generátor. Po expanzi na turbíně pára kondenzuje v kondenzátoru a po zkapalnění je čerpána kondenzačními čerpadly do napájecí nádrže. Odtud je napájecí voda vedena zpět do parogenerátoru. Tuto koncepci můžete názorně vidět na obr.2.2.



Obr.2.2 Uspořádání I. a II. okruhu tlakovodního reaktoru PWR [3]

### 2.1.1 Primární okruh jaderné elektrárny [3,10,9,7,5]

Primární okruh, někdy nazývaný jako jaderná část elektrárny, je situován v hermeticky uzavřené ochranné obálce – kontejmentu. Součástí primárního okruhu jsou kromě reaktoru také, cirkulační potrubí, hlavní cirkulační čerpadla, kompenzátory objemu, barbotážní nádrže, hydroakumulátory a samozřejmě parogenerátory, které oddělují primární radioaktivní okruh od sekundárního neaktivního okruhu. Schéma primárního okruhu můžete vidět na obr.2.3



Č.	Technologické zařízení
1	Hlavní cirkulační čerpadlo
2	Parogenerátor
3	Horká větev cirkulační smyčky
4	Studená větev cirkulační smyčky
5	Studená větev cirkulační smyčky
6	Hlavní cirkulační čerpadlo
7	Parogenerátor
8	Horká větev cirkulační smyčky
9	Studená větev cirkulační smyčky
10	Studená větev cirkulační smyčky
11	Hlavní cirkulační čerpadlo
12	Parogenerátor
13	Horká větev cirkulační smyčky
14	Studená větev cirkulační smyčky
15	Studená větev cirkulační smyčky
16	Hlavní cirkulační čerpadlo
17	Parogenerátor
18	Horká větev cirkulační smyčky
19	Studená větev cirkulační smyčky
20	Studená větev cirkulační smyčky
21	Reaktor
22	Kompensátor objemu
23	Uzel pojistných ventilů systému kompenzace objemu
24	Barbotážní nádrž
25	Hydroakumulátor
26	Hydroakumulátor
27	Hydroakumulátor
28	Hydroakumulátor

**.Obr.2.3 Primární okruh jaderné elektrárny s reaktorem typu VVER [10]**

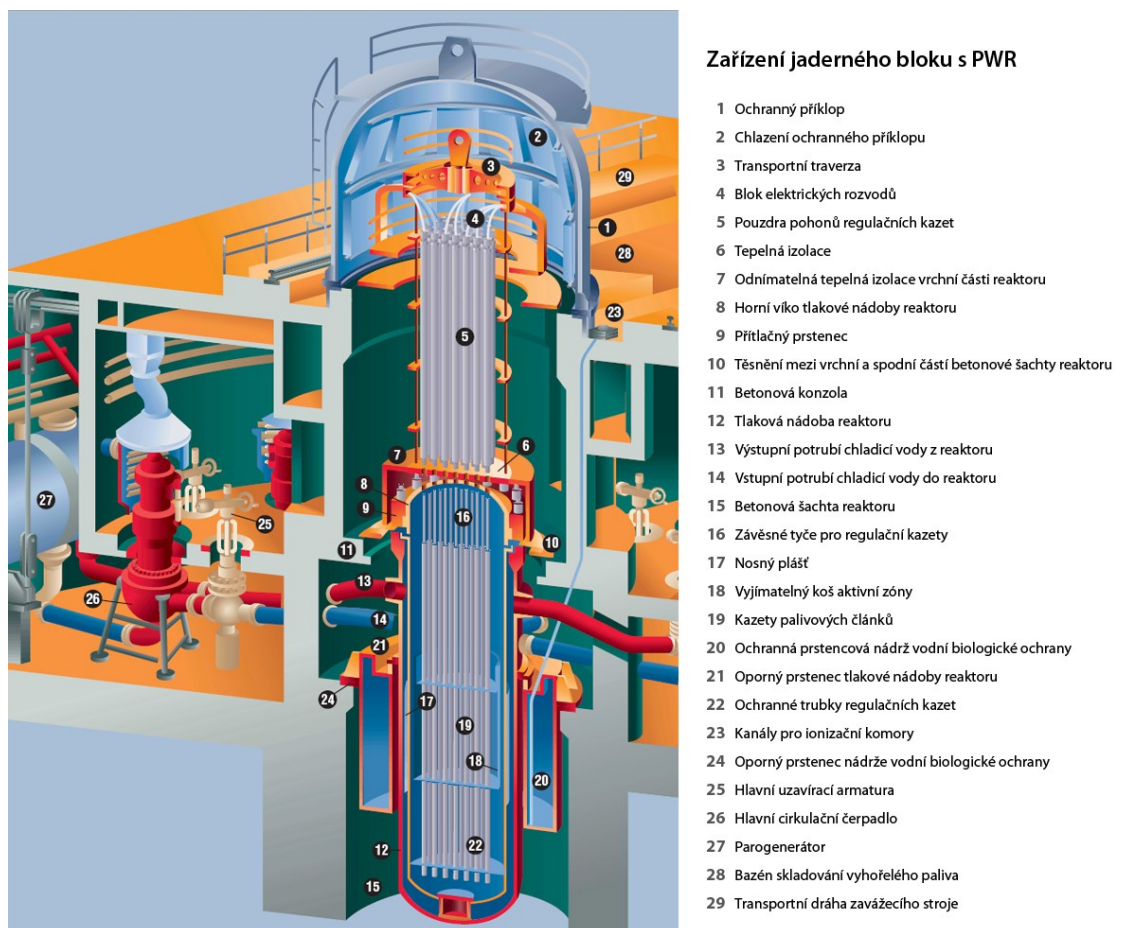
## Reaktor

Jak jsem již zmínil, jaderné elektrárny využívají tepelnou energii produkovanou štěpením uranu v reaktoru. Příklad reaktoru, který najdeme u obou našich elektráren, je na obr.2.4.

Uran se nachází v uranové rudě. Uranová ruda se těží v hlubinných nebo povrchových dolech, přičemž přírodní uran je směsí dvou izotopů – U 235 a U 238. Využitelný je pouze U 235, kterého je v rudě pouze 0,7 %. Z rozemleté rudy získáváme žlutý koncentrát  $U_3O_8$ , obsahující asi 65% přírodního uranu, ze kterého rafinujeme čistý kovový uran. Ten obohacujeme z původních 0,7 % na 2 – 4% potřebné pro použití v reaktorech. Následně necháme uran oxidovat na  $UO_2$ , který lisujeme do malých pelet. Pelety se vkládají do uzavřených trubek a tím vytvářejí palivové proutky. Soubor palivových proutků tvoří kazetu. V JE Temelín najdeme 163 palivových kazet.

Při jaderné reakci dochází ke štěpení izotopu U 235 pomalými neutrony za vzniku fragmentů a uvolnění rychlých neutronů. Jednotlivé jádra lehčích prvků (fragmenty) se odpuzují velkou rychlostí a narážejí do ostatních atomů paliva, přičemž dochází k přeměně kinetické energie na tepelnou. Uvolněné neutrony narážejí do dalších jader a udržují tak štěpnou řetězovou reakci. Je však nutné

poznámenat, že rychlé neutrony s kinetickou energií do 2 MeV nejsou vhodné pro štěpnou reakci. Pravděpodobnost štěpení jádra roste s klesající kinetickou energií neutronu. Pro štěpení je tedy ideální snížit energii neutronu na 0,025 – 0,5 eV. Toho docílíme použitím moderátoru, který neutrony zpomalí. Moderátorem je nejčastěji lehká voda, grafit nebo těžká voda. Zpomalené neutrony, které nerozštěpí jiné jádra, jsou pohlcovány stíněním reaktoru nebo regulačními tyčemi. Regulačními tyčemi regulujeme výkon reaktoru během provozu. Pro plynulé změny výkonu se používá kyselina boritá, vstřikovaná do primárního okruhu. Při krizových situacích se zasunou do reaktoru bezpečnostní tyče s mnohem větší koncentrací absorbéru.



Obr.2.4 Zařízení jaderného bloku s PWR [9]



## **Rozdělení jaderných reaktorů**

Přestože se má práce týká pouze zařízení typu PWR, tedy elektráren s tlakovodními reaktory, považuji za vhodné uvést i další typy reaktorů a jejich vývoj. Reaktory dělíme jak podle typu chlazení, tak podle generací jejich vývoje.

### **Generace I**

Reaktory této generace se stavěly v 50. a 60. letech 20. století a sloužily především jako pokusné objekty pro další výzkum a vývoj. Jako příklad uveďme reaktory typu Magnox ve Velké Británii.

### **Generace II**

Do této generace řadíme reaktory bloků jaderných elektráren postavených v rozmezí let 1965 až 1995, a tudíž do ní spadají reaktory obou našich jaderných elektráren. Při stavbě elektráren této generace se již využívaly poznatky z provozu reaktoru generace I, což umožňovalo efektivnější výstavbu nových bloků. Komerční reaktory této generace lze rozdělit do dvou skupin: reaktory s přírodním a obohaceným uranem. Reaktory s přírodním uranem jsou dražší, ale náklady na palivo jsou nižší, protože kromě absence nákladného obohacování spotřebují pro stejné množství energie o 15% méně uranu. Dnešní jaderná energetika stojí na těchto typech reaktorů:

### **Tlakovodní reaktory PWR**

Jedná se o nejrozšířenější typ reaktoru na světě. Pro mou práci je stěžejní, jelikož se zabývám parogenerátory v elektrárnách právě s těmito reaktory.

Tento typ byl vyvinut původně v USA pro pohon ponorek. Tuto koncepci později převzalo Rusko a začalo stavět reaktory označované jako VVER, který najdeme jak v Temelíně (VVER 1000), tak i v Dukovanech (VVER 440). Jak jsem již mínil výše, palivem jsou malé peletky oxidu uraničitého vkládané do palivových elementů. Každého 1 – 1,5 roku dochází k výměně paliva, kdy se nahradí 1/4 - 1/3 palivových článků. Moderátorem i chladičem je obyčejná lehká voda, která proudí primárním potrubím pod tlakem 12 – 16 Mpa z důvodu udržení kapalné fáze tekutiny.

### **Varné reaktory BWR**

Tento typ se vyznačuje absencí parogenerátoru. Napájecí voda je přiváděna do reaktorové nádoby a následně proudí do aktivní zóny, kde se ohřívá na bod varu. Vzniklá pára prochází žaluziiovými a cyklónovými separátory, kde dochází ke snížení vlhkosti na hodnotu kolem 0,1% . Vyseparovaná pára putuje na turbínu, kde expanduje. Palivem je opět mírně obohacený uran ve formě peletek, stejně jako u reaktoru PWR. Moderátorem a chladičem je lehká voda, přičemž regulační tyče se vysouvají zdola. Výměna paliva se provádí obdobně jako u předchozí typu: jednou za 1 – 1,5 roku. Elektrárny tohoto typu jsou například Forsmark (Švédsko) nebo Olkiuoto (Finsko). Zajímavostí je také elektrárna Zwentendorf, stojící nedaleko Vídně jako jediná jaderná elektrárna v Rakousku. Ačkoliv byla kompletně postavena a palivo bylo zavezeno, nikdy nebyla spuštěna.

### **Těžkovodní reaktory HWR**

Reaktor používá jako moderátor těžkou vodu ( $D_2O$ ), což umožňuje použití přírodního uranu. Chladičem může být těžká voda, lehká voda nebo  $CO_2$ . Vývoj těchto reaktorů probíhal v Kanadě, Velké Británii, Japonsku, Itálii, Švýcarsku nebo také v ČSSR. Přesto se jedná o málo rozšířený typ energetických reaktorů. V praxi se ujala pouze koncepce reaktoru chlazeného těžkou vodou vyvinutá v Kanadě (CANDU) a typ SGHWR, chlazený lehkou vodou, provozovaný ve Velké Británii. Typ CANDU je charakteristický svou válcovou ležatou nádobou aktivní zóny. Reaktory CANDU i SGHWR mají tlakové kanály. Rozdíl spočívá v situování kanálů a také ve výměně paliva. Reaktory CANDU disponují horizontálními tlakovými kanály a mají kontinuální výměnu paliva, kdežto typ SGHWR má vertikální tlakové kanály a výměna probíhá kampaňovitě. Oba typy používají jako palivo již zmíněný přírodní uran ve formě malých peletek. Pro příklad můžu uvést elektrárnu Qinshan v Kanadě.

### **Grafitové reaktory**

Reaktory, používající jako moderátor grafit, patří mezi nejstarší na světě. První reaktory tohoto typu byly spuštěny ve Velké Británii a Rusku. Můžou být chlazené buď plynem, nebo lehkou vodou.

Plynnem chlazené a grafitem moderované reaktory (Magnox GCR) používají jako chladič většinou  $CO_2$ . Byly vyvinuty ve Velké Británii a jejich aktivní zónu tvoří grafitové bloky s otvory pro palivové tyče. Palivo tvoří přírodní kovový uran v palivových elementech pokrytých oxidem hořčíku (magnesium oxid = Magnox), přičemž výměna paliva probíhá kontinuálně za provozu. Tyto reaktory se již nestaví a v podstatě už jen dosluhují. Elektrárnu v provozu najdeme ještě např. v Hartlepoolu v Anglii.

Mezi grafitové reaktory patří taky typ AGR – pokročilý plynem chlazený reaktor. Princip je obdobný jako u GCR, avšak zde byl použit obohacený uran na standardních 2,3%, čímž bylo dosaženo vyšší teploty výstupního plynu. Novinkou oproti GCR je umístění aktivní zóny do betonové nádoby.

V Rusku nese grafitový reaktor označení RBMK a je chlazen obyčejnou vodou a vychází z konceptu první jaderné elektrárny v Obninsku. Reaktor má tvar válce sestaveného z grafitových bloků s vertikálními kanály s palivovými tyčemi (obohacený uran na 1,8%). Voda se mění v páru přímo v kanálech, takže jde v podstatě o varný reaktor. Tento typ reaktoru je provozován pouze v zemích bývalého východního bloku. Asi nejznámější elektrárnou této koncepce byl Černobyl. S pochopitelných důvodů byla výstavba dalších reaktorů po roce 1986 zastavena.

Nejnovějším typem grafitových reaktorů jsou vysokoteplotní grafitové reaktory HTGR. Palivo na bázi mikročástic umožňuje vysokou výstupní teplotu chladiva za dodržení přísných bezpečnostních opatření. Palivem je vysoce obohacený uran ve formě částic (kuličky o průměru 0,9 mm) obalených vrstvami karbidu křemíku a uhlíku. Německý koncept obsahuje uranové mikročástice obalené grafitem (celkový průměr je 100 mm), který slouží jako moderátor i jako tepelná ochrana. Palivové koule jsou kontinuálně doplňovány do aktivní zóny. Po určité době se dostanou na dno aktivní zóny, kde se odebírají a vyhodnocují, zda-li jsou vyhořelé, či nikoliv. V prvním případě putují zpět do aktivní zóny. Tato koncepce umožňuje dosažení velkých teplot chladiva – helia, a tím je možno dosáhnout vysoké účinnosti okolo 40%. Nutno podotknout, že tyto reaktory jsou zatím vyvinuté pro experimentální účely v Německu, USA a Velké Británii.

### **Rychlé množivé reaktory FBR**

Tomuto typu je přisuzován dlouhodobý význam pro budoucí vývoj jaderné energetiky díky schopnosti produkovat sekundární jaderné palivo. Reaktor totiž během provozu vyprodukuje více nového plutoniového paliva, než kolik sám využije. Palivem je plutonium ve směsi oxidu plutoničitého a uraničitého. Reaktor nemá moderátor, takže štěpná reakce probíhá na základě působení rychlých neutronů. Aktivní zóna s palivovými tyčemi je obklopena pláštěm z množivého materiálu (U238). Tepelný výkon na litr objemu je 10x vyšší, než u běžných reaktorů s pomalými neutrony. Takovýto výkon konvenční chladiva nedokážou odvést, proto se používá jako chladivo sodík. Ten je však při styku s vodou nebo vzduchem výbušný, proto se mezi primární a sekundární okruh vkládá ještě jeden sodíkový. Dnes jsou spuštěny reaktory FBR v Rusku, Francii a Velké Británii.

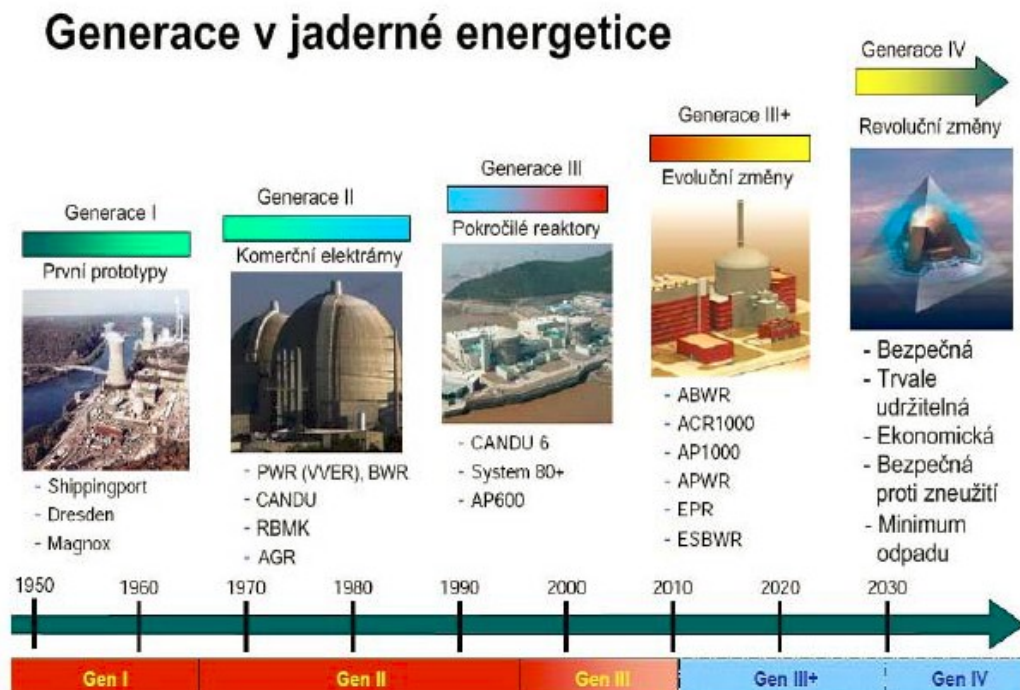
## Generace III

Pokud hovoříme o generaci III, máme tím na mysli reaktory postavené zhruba od roku 1995, přičemž se jedná hlavně o pokročilé typy PWR a BWR. Někdy se setkáváme také s označením III+. Toto pojmenování označuje reaktory generace III s vylepšenou ekonomikou provozu.

## Generace IV

Elektrárny této generace jsou teprve ve fázi výzkumu. S jejich komerčním využitím se počítá kolem roku 2040. Tyto elektrárny musí splňovat různé požadavky. Musí být ekonomicky rentabilní, musí mít prvky pasivní bezpečnosti, musí produkovat minimum jaderného odpadu a nesmí být zneužity pro výrobu jaderných zbraní.

Jejich projektování vychází ze tří základních pilířů koncepce jaderné energetiky pro první polovinu 21. století. První pilířem bude dlouhodobý provoz již postavených jaderných bloků řazených do generace II. Bude potřeba zajistit bezpečný a ekonomický provoz a zintenzivnit studium jevů, probíhajících v jaderných systémech. Na základě získaných poznatků bude možno projektovat bezpečnější a efektivnější elektrárny. Druhý pilíř zahrnuje výstavbu pokročilých bloků generace III/III+ a výstavbu malých a středních jaderných elektráren, pro které v další kapitole navrhnu parogenerátor. Třetí pilíř představuje přechod na reaktory generace IV.



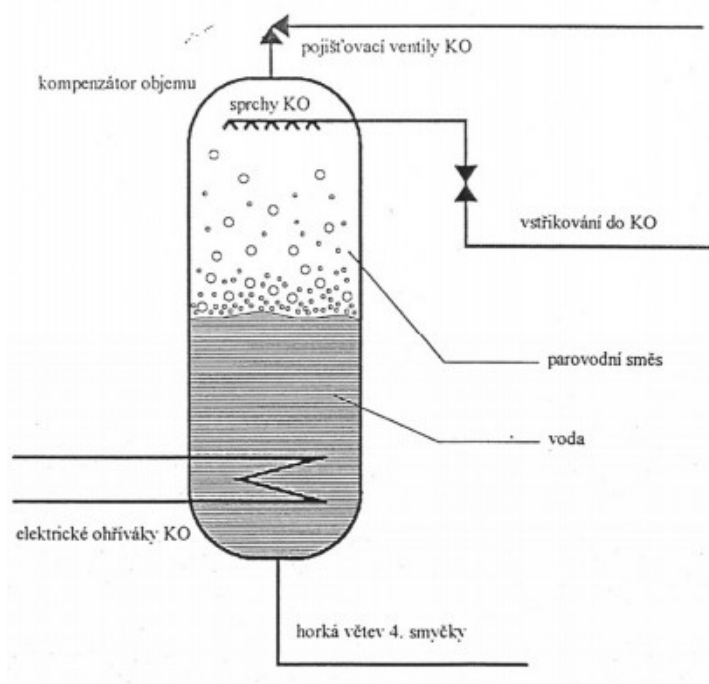
Obr.2.5 Generace jaderných elektráren [3]

## Hlavní cirkulační čerpadlo

Hlavní cirkulační čerpadlo zajišťuje cirkulaci chladicí tekutiny v primárním okruhu. Umisťuje se do chladné větve cirkulačního primárního potrubí, takže čerpá ochlazenou vodu z parogenerátoru zpět do aktivní zóny. Primární okruh má většinou tolik čerpadel, kolik má cirkulačních smyček (parogenerátorů). Například v elektrárně Temelín jsou použita čerpadla o příkonu 5,1 MW vysoká 12 m. Jedná se o vertikální odstředivá jednostupňová čerpadla.

## Kompenzátor objemu

Kompenzátor je válcová nádoba neoddělitelně spojená s primárním okruhem. Nádoba je ze 2/3 naplněna primárním médiem a z 1/3 párou. Tlak v primárním okruhu je tak dán tlakem páry v kompenzátoru objemu. Při poklesu tlaku se sepnou elektroohříváky ve spodní části, v důsledku čehož se začne zvyšovat tlak páry a dojde tak ke zvýšení tlaku v primárním okruhu. Naopak při náhlém vzrůstu tlaku se aktivuje sprchový systém, který zmenší objem páry a tím pádem i tlak v primárním okruhu. Pokud by tlak narostl tak skokově, že by sprchový systém nestačil dostatečně snížit tlak, došlo by k otevření odlehčovacího ventilu, případně k otevření pojistných ventilů. Přes pojistné ventily se pára přepouští do barbotážní nádrže, kde pára kondenzuje. Schéma kompenzátoru objemu můžeme vidět na obr.2.7.



Obr.2.6 Schéma kompenzátoru objemu [8]

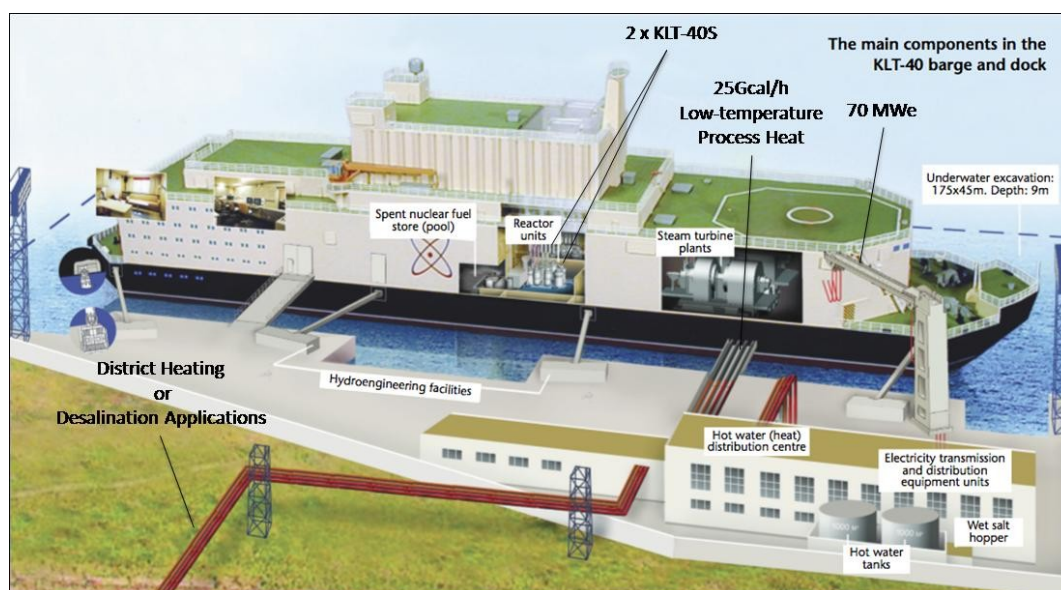
## 2.2 Budoucí vývoj jaderné energetiky [22,23,24,25,26,27]

Podle nejnovějších studií bude budoucnost jaderné energetiky patřit malým (modulárním) jaderným reaktorům o výkonu 10 – 600 MW. Již v současné době je ve výstavbě okolo 40 malých jaderných reaktorů po celém světě. Pro modulární reaktory budou použity technologie stejné, jako v běžných jaderných elektrárnách. Jde tedy o reaktory typu PWR, GCR, HWR a FBR.

Výhody malých reaktorů jsou následující: malé rozměry umožňující sériovou výrobu a snadnou logistiku, během provozu nemusí měnit palivo, a proto nevzniká problém s ukládáním odpadu, alternativní způsoby chlazení (olovo + bismut, sodík atp.), takže není třeba velkých chladicích věží, nehyzdí krajinu atp. Největším plusem této koncepce je mobilita takové elektrárny a nepoměrně nižší investiční náklady, oproti velkým jaderným blokům s cenou v řádech miliard dolarů.

Velkou výhodou je způsob využití modulárních reaktorů. Mohou nahradit současné uhelné nebo plynové elektrárny a využít jejich infrastrukturu. Malý reaktor může zásobovat energií město, či velký průmyslový podnik. O jejich výstavbě vážně uvažuje hustě obydlený Singapur, kde není místo pro velkou jadernou elektrárnu. Malá elektrárna se zakope pod zem a je téměř bezúdržbová. Stavbu takové elektrárny plánuje česká firma Lumius v roce 2020. Vývojem malých jaderných elektráren se zabývají společnosti AREVA, Westinghouse nebo Mitsubishi. V současné době pokročila s vývojem nejdále čínská společnost Chinergy, která vyvíjí vysokoteplotní reaktor o výkonu 210 MW.

Malé rozměry těchto reaktorů dovolují jejich snadné převážení na místo výstavby. Velké zkušenosti s malými reaktory má Rusko, které má několik ledoborců na jaderný pohon a tyto zkušenosti hodlá zúročit v projektu Akademik Lomosov (viz. obr.2.8). Jedná se o plovoucí jadernou elektrárnu, vybavenou dvěma modulárními reaktory. Loď je dlouhá 140 metrů a má výtlak 21 000 tun. Její nasazení je zřejmé. V Rusku je spousta odlehlých měst, hlavně na věčně zmrzlém severu, kde je obtížné vybudovat potřebou energetickou infrastrukturu. Tato loď jen zakotví v určeném přístavu a může zásobovat město elektrinou a teplem. V současné době je hotovo asi 60% a se spuštěním se počítá v roce 2016.



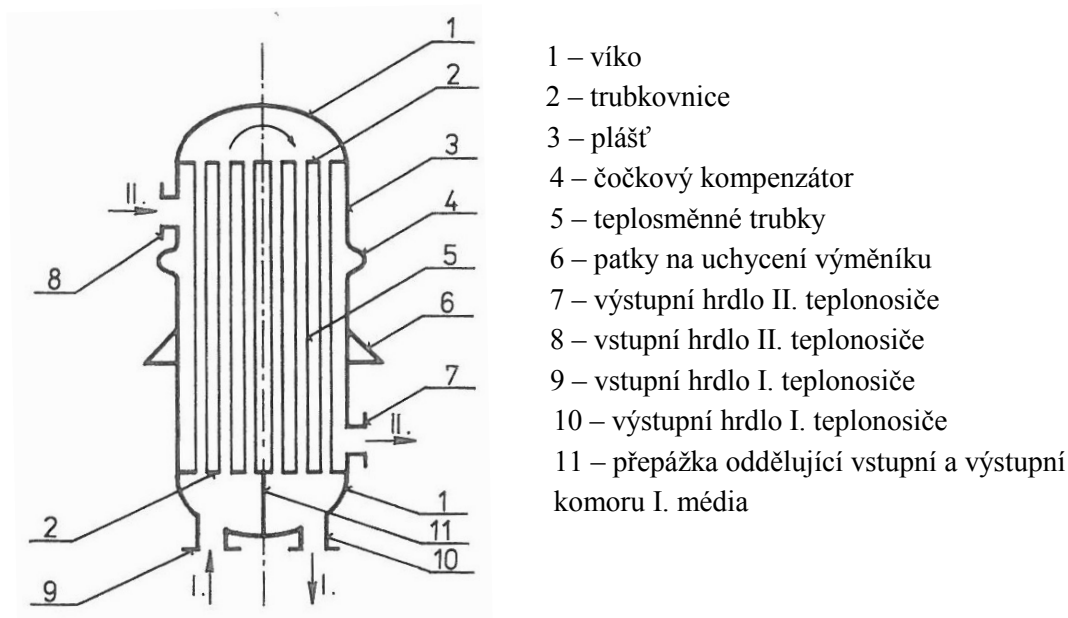
Obr. 2.7 Uspořádání jaderné elektrárny Akademik Lomosov [22]

### 3. Výměníky tepla [1]

Výměníky tepla jsou zařízení sloužící k předávání tepla z jedné látky do druhé. V jaderné energetice jsou nejdůležitější povrchové rekuperační výměníky, kde na jedné straně stěny proudí teplonosič a předává teplo souběžně proudícímu médiu na straně druhé prostupem touto stěnou.

#### 3.1 Povrchové rekuperační výměníky [1]

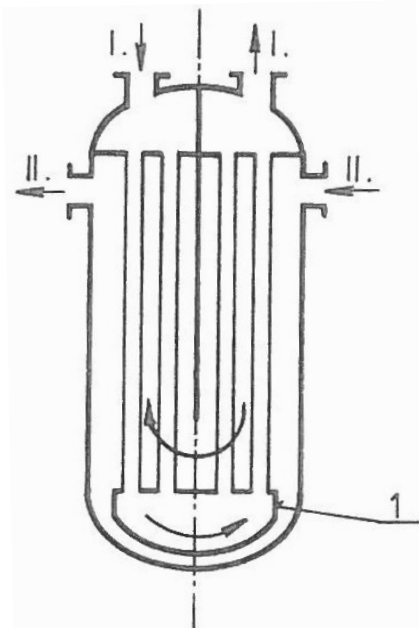
Příklad povrchového rekuperačního výměníku můžeme vidět na obr.3.1. U tohoto výměníku byly vyřešeny tepelné dilatace teplejších trubek k chladnějšímu plášti použitím čočkového kompenzátoru (4).



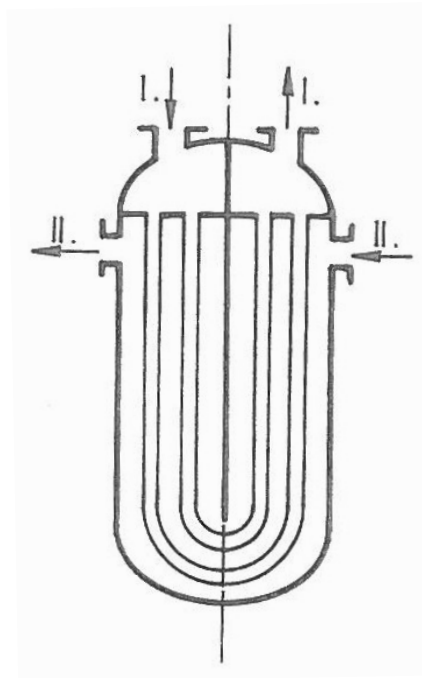
Obr.3.1 Svislý tělesový výměník tepla [1]

Na obr.3.2 můžeme vidět výměník s plovoucí hlavou (1), který řeší tepelné dilatace tím, že jsou teplosměnné trubky zaválcovány do komory, čímž je umožněn pohyb této komory vůči plášti výměníku.

Nejdokonalejší řešení tepelných dilatací nabízí výměník na obr.3.3. Jedná se o výměník se svazkem U trubek, což je hojně využívaný typ u parogenerátorů v jaderných elektrárnách. Tato koncepce řeší dilatace nejen u samotných trubek, dilatace mezi trubkami a pláštěm, ale i dilatace mezi jednotlivými trubkami, způsobené nestejným ohřevem.



**Obr.3.2 Tělesový výměník s plovoucí hlavou [1]**



**Obr.3.3 Tělesový výměník s U- trubkami [1]**

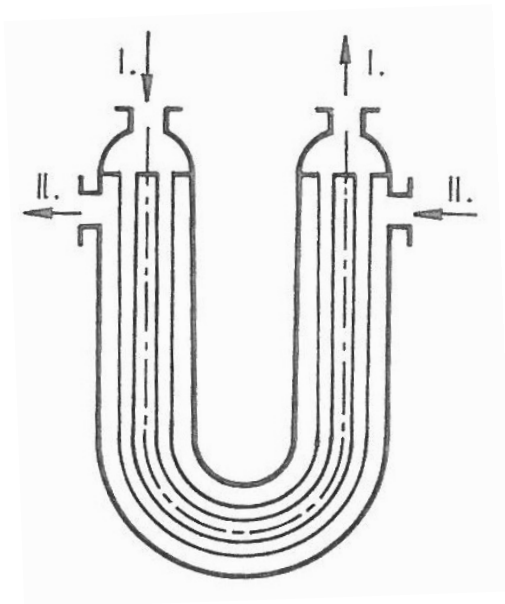
Obdobou výměníku s U-trubkami je tělesový výměník, který má krom trubek tohoto tvaru, také plášť ve tvaru U (viz. obr.3.4). Tento typ výměníku se používá tam, kde má teplonosič (II) vysoký tlak, ale malé průtočné množství. Je to z toho důvodu, že při použití tělesového výměníku by nám vycházela větší tloušťka pláště vzhledem k pevnostním požadavkům. S tím samozřejmě souvisí také náklady na výrobu. Při použití tělesa ve tvaru U můžeme také dosáhnout větší rychlosti primárního média, a tím zvýšit součinitel přestupu tepla.

Na obr.3.5 můžeme vidět výměník s Fieldovými trubkami. Primární médium (I) protéká shora dolů vnitřní Fieldovou trubicí, následně se dole proud obrací a tekutina proudí směrem nahoru mezikružím mezi vnitřní a vnější Fieldovou trubicí. Z vnější stany jsou trubky omývány sekundárním médiem (II). Pokud však médium mění skupenství, je vhodnější, aby proudilo uvnitř trubek. Výhodou jsou dobře vyřešené dilatace mezi trubkami a pláštěm. Nevýhodou je pak změna směru proudu o 180°, ke které dochází na konci vnitřní Fieldovy trubky, což způsobuje značnou erozi.

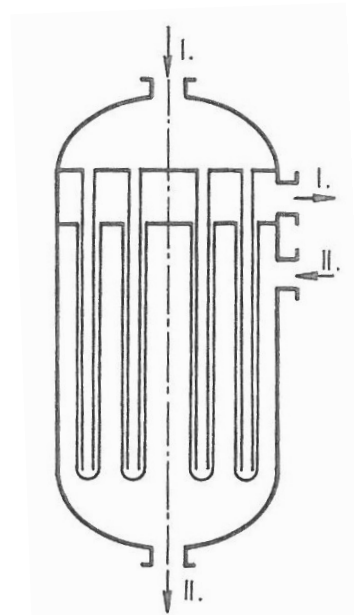
Dalším typem výměníku je tělesový výměník s trubkami ve tvaru šroubovice (viz. obr.3.6). Trubky jsou řazeny tedy do šroubovice koncipované jako vícechodý závit. Vložka (2) donutí médium I proudit napříč trubkami, a nikoliv jen mezerou uprostřed. Tento typ výměníků byl použit například ve Francii pro parogenerátory rychlého množivého reaktoru.

Posledním zástupcem je výměník s teplosměnnými trubkami řazenými paralelně, jak lze vidět na obr.3.7. Tato koncepce byla hojně použita v elektrárnách typu Magnox v Anglii.

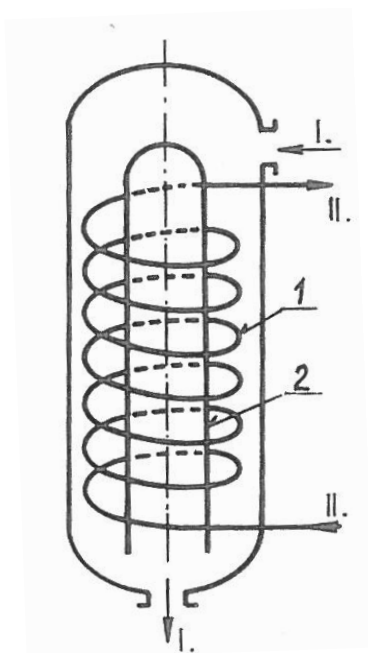




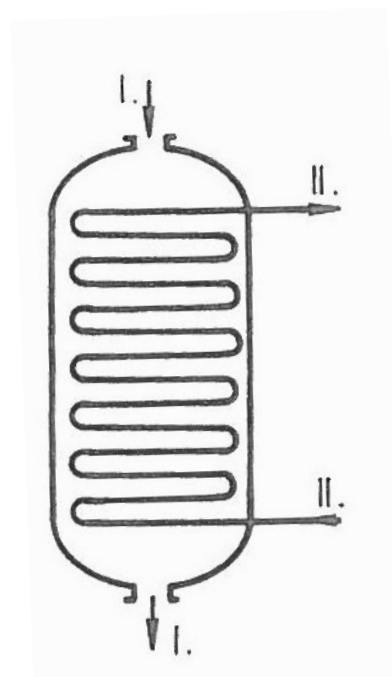
**Obr.3.4** Výměník s trubkami i s pláštěm ve tvaru U [1]



**Obr.3.5** Tělesový výměník s Fieldovými trubkami [1]



**Obr.3.6** Tělesový výměník se šroubovicovitě vinutými trubkami [1]



**Obr.3.7** Tělesový výměník s trubkovými hady [1]

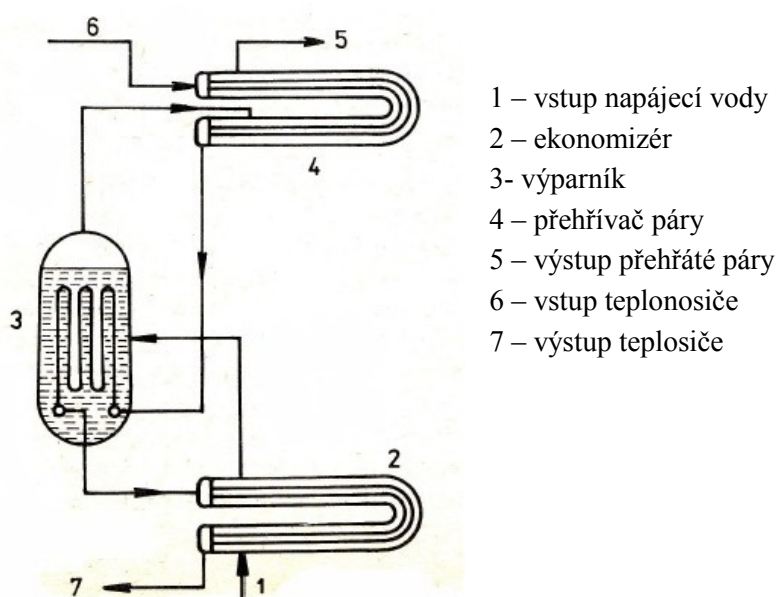
## 4. Parogenerátory [1,2,5]

Parní generátory patří mezi největší a nejdůležitější výměníky tepla v jaderných elektrárnách. Většinou jsou součástí primárního i sekundárního okruhu, protože je od sebe oddělují. Zabraňují promíchání primárního aktivního chladiva se sekundárním neaktivním chladivem a zároveň umožňují přestup tepla mezi primárním a sekundárním okruhem. Tato koncepce jaderných elektráren se nazývá dvouokruhová.

Ohřátá voda putuje z reaktoru primárním potrubím do parogenerátorů, kde protéká sítí trubek a předává svou tepelnou energii sekundární vodě, ze které vzniká pára. Ta putuje přes separátory na turbínu, která vyrábí elektrickou energii. Jelikož teplotní gradient je na primární straně pouze cca 30 K, musí mít primární voda mnohem větší průtok, než je parní výkon a sekundární straně.

Primární voda, jež odevzdá část své tepelné energie sekundárnímu médiu, putuje do hlavního cirkulačního čerpadla a následně zpátky do reaktoru. Na sekundární straně pára, která projde turbínou, vstupuje do kondenzátoru, který je ochlazován vodou proudící z chladících věží (terciální okruh). Pára se v kondenzátoru ochlazuje a kondenzuje. Kondenzát dále pokračuje přes NT a VT ohříváky a čerpadla zpátky do parogenerátoru.

Parogenerátory se dělí na horizontální (VVER) a vertikální (EPR, Westinghouse). Skládají se obecně z ohřívací části (ekonomizér), výparníku, separátorů páry a popřípadě z přehřívací části. Tyto části jsou soustředěny v jednu tělese nebo jsou rozdělené na samostatné aparáty umístěné za sebou v sekundárním okruhu. Na obr. 4.1 je schéma parogenerátoru první jaderné elektrárny na světě v ruském Obninsku u Moskvy, která byla spuštěna v roce 1954.

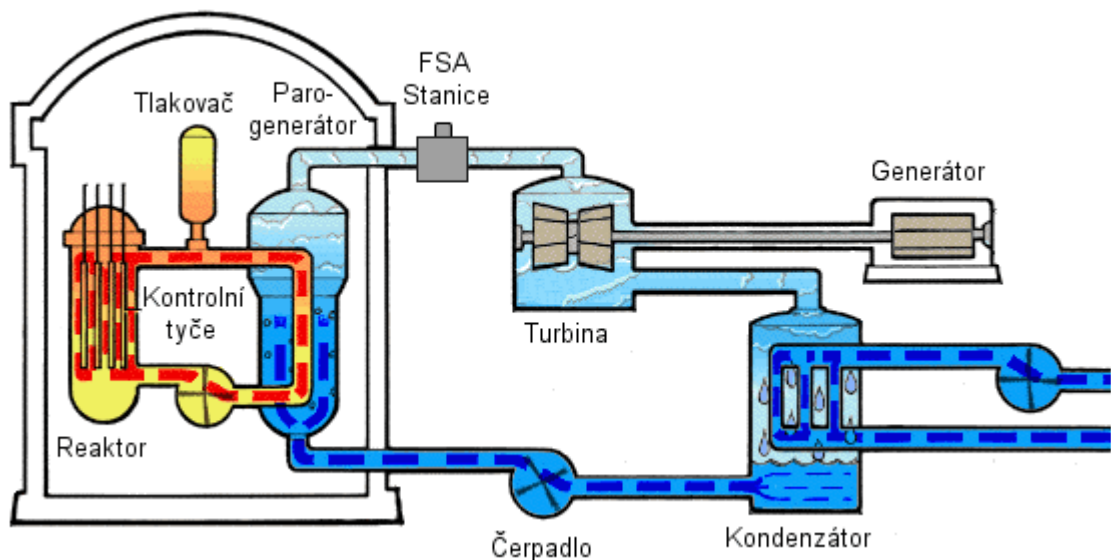


Obr. 4.1 Součásti parního generátoru [2]

Nejpoužívanějším současným koncepčním řešením je použití parního generátoru v jaderných elektrárnách s tlakovodním reaktorem (viz. Obr.4.2.). Toto řešení bylo použito například v České republice u všech parních generátorů bloků typu VVER nebo v elektrárně Biblis ve Francii. Jak již bylo popsáno dříve, parogenerátor odděluje radioaktivní primární od neradioaktivního sekundárního okruhu. Díky tomu nemusí být sekundární okruh biologicky stíněn. Voda v primárním okruhu musí proudit stále v kapalném stavu, proto musí mít tlak v rozmezí 12 – 17 MPa. Tlak na sekundární straně se pohybuje mezi 4 – 7 MPa.

Ve většině jaderných elektráren se vyrábí sytá pára, a proto pára na sekundární straně musí před vstupem do turbíny projít přes separátory a snížit tak svou vlhkost minimálně na 0,25 %. Pro dosažení co nejvyšší termické účinnosti by bylo vhodné, kdybychom vyráběli přehřátou páru a co nejvyšší teplotě. Problém je však v malém rozdílu teplot mezi primární vodou, vstupující do parního generátoru, a primární vodou z něj vystupující. Tento rozdíl činí cca 30 - 35 K. [1]

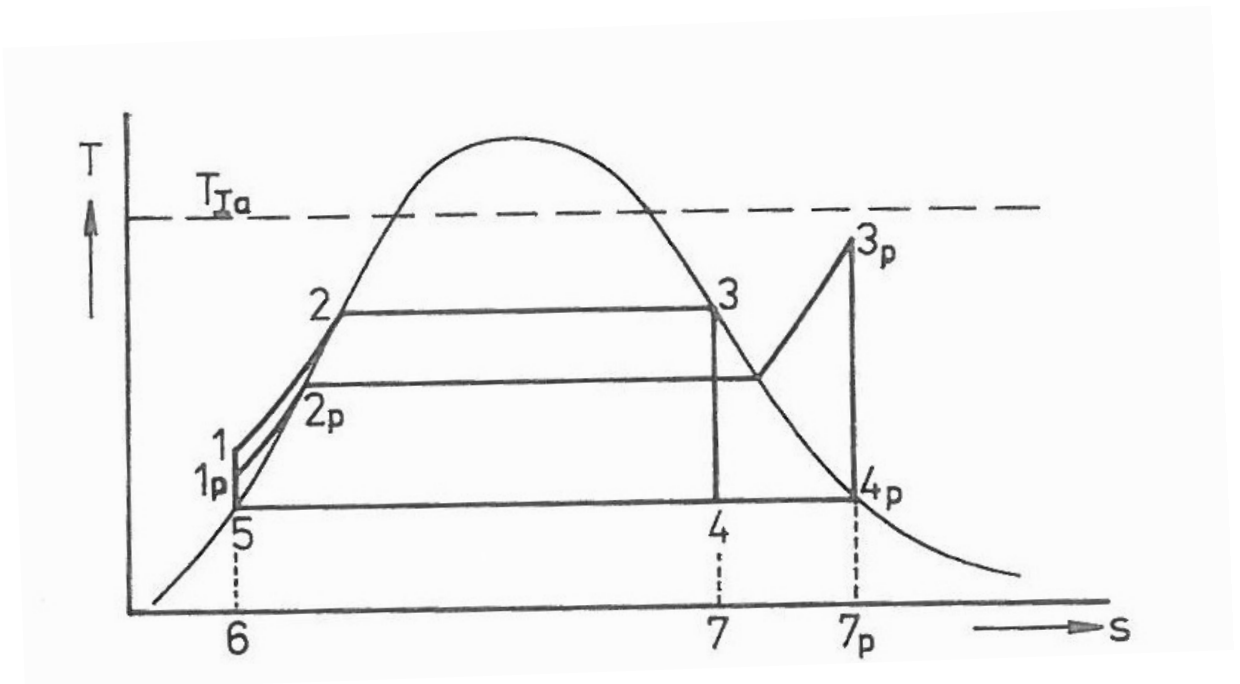
Pokud bychom chtěli vyrábět v parogenerátoru přehřátou páru, museli bychom snížit tlak páry, proto aby byl splněn požadavek na minimální tepelný rozdíl (kolem 20 K). Při zmenšování tohoto rozdílu narůstá teplosměnná plocha přehřívákové části parogenerátoru, a tím pádem i množství drahých vysoko legovaných slitin.



**Obr.4.2 Schéma dvouokruhové jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem [11]**

Snížíme-li tlak přehřáté páry, snížíme tím termickou účinnost Clausiova-Rankinova cyklu v porovnání s týmž oběhem, vyrábějícím sytou páru. Názorně si to můžeme ukázat na T-s diagramu Clausiova-Rankinova cyklu (viz.obr.4.3.) Termická účinnost oběhu syté páry je dána poměrem plochy 123451 k ploše 123761. Termická účinnost oběhu s přehřátou párou je dána poměry ploch  $1p2p3p4p51p$  a plochy  $1p2p3p7p61p$ . Jak můžeme vidět, poměr ploch je v případě oběhu syté páry značně vyšší, než u oběhu s přehřátou párou. Připomeňme, že jedním z faktorů ovlivňující výrobu syté páry, je také teplota primárního teplonosiče, která se pohybuje v rozmezí 300 – 330°C. Důvod je prostý. V primárním okruhu musíme splnit požadavek, aby se primární chladicí voda nacházela v kapalném stavu. Toho je možno dosáhnout pouze, pokud parametry vody nedosáhnou kritického bodu tj. teploty 647,15 K a tlaku 22,1 MPa.

Je třeba podotknout, že existují tlakovodní reaktory s parogenerátory, vyrábějícími mírně přehřátou páru. Parogenerátory těchto elektráren navíc logicky obsahují přehřívákovou část. Další možností, jak dosáhnout výroby přehřáté páry v elektrárnách s tlakovodními reaktory, je použití přehříváku vytápěného fosilním palivem. Taková to elektrárna byla zprovozněna například v Německu nebo v USA. Dnes již v provozu žádné takové zařízení není a důvod je nasnadě. Fosilní přehřívák sice zvyšuje termickou účinnost, ale provoz se stává nerentabilní a navíc přichází o svou velkou výhodu oproti konvenčním elektrárnám na fosilní paliva – absenci emisí skleníkových plynů.



**Obr.4.3 Clausiovy-Rankinovy oběhy s nasycenou a přehřátou párou [1]**

## 4.1 Parogenerátory v elektrárnách s tlakovodními reaktory [1,2,12,4]

Nyní se podíváme na tuto problematiku podrobněji. Pro úplnost zopakují, že primární voda je udržována pod tlakem 10 – 17 MP, aby ji bylo možno udržet v kapalném skupenství při co nejvyšší teplotě (300 – 330°C). Teplota vody na výstupu z reaktoru musí být alespoň o 20°C nižší, než je teplota varu vody při daném tlaku.

Parogenerátory se v současné době konstruuji jako rekuperační výměníky tj. proudící pracovní látky omývají jednu teplosměnnou plochu, přes kterou prochází teplo z primárního do sekundárního okruhu. Takový mechanismus umožňuje splnit následující požadavky: bezpečný provoz, projektovaný výkon, parametry páry při různých režimech a v neposlední řadě ekonomický provoz. Důležitý je požadavek na maximální výkon při nominálních parametrech. Toto je velká výhoda jaderných elektráren oproti výrobě elektrické energie z obnovitelných zdrojů, jejichž výkon je hodně proměnlivý. Současná energetická koncepce v Česku však do budoucna počítá i s cílenou regulací výkonu jaderných elektráren podle aktuálních potřeb elektrické sítě.

Parogenerátory dělíme na horizontální a vertikální. Horizontální koncepce se uplatňovala zejména v zemích bývalého východního bloku, tudíž i u nás. Horizontální parogenerátory (typ VVER) tlakovodních reaktorů mají u nás obě jaderné elektrárny. Teplosměnná plocha je zaplavena sekundárním médiem spolu se separátory páry v jednom tělese – plášti parogenerátoru. Vertikální koncepcí parogenerátorů se v současné době zabývají společnosti jako americký Westinghouse, japonské Mitsubishi nebo francouzská Areva. Jedná se opět o tělesový parogenerátor, který má ve vrchní části separační zařízení pro vystupující páru. Rozměry a hmotnosti jsou podobné horizontálním parogenerátorům, ale pro svůj malý zastavěný půdorys se více hodí pro umístění do ochranných kontejmentů.

Velký důraz musí být kladen hlavně na kvalitu svarů velkého množství trubek v parogenerátoru. Těsnost těchto svarů ovlivňuje přímo nejen životnost parogenerátoru, ale i celé jaderné elektrárny. Musí se zamezit jakémukoliv úniku primárního média do sekundárního okruhu, protože únik by znamenal obrovské problémy, zamoření sekundárního okruhu a v neposlední řadě (zvláště u reaktorů chlazených sodíkem) havárii reaktoru. Projektovaná životnost parogenerátoru se pohybuje kolem 30 – 35 let.

Parogenerátory nesmí iniciovat vznik korozních produktů v primárním okruhu. Korozní produkty se v reaktoru aktivují a ukládají v primárním potrubí. Ještě horší je usazování těchto produktů na palivových člancích. To způsobuje snížení přestupu tepla z paliva do chladicího média, což může vést k přehřátí palivových článků a následné explozi.

Z hlediska co nejnižší spotřeby materiálů a z pevnostních důvodů, proudí primární teplotní nosič uvnitř trubek a sekundární chladivo a pára v mezitrubkovém

prostoru. Toto řešení dovoluje konstruovat samotné těleso parogenerátoru se slabšími stěnami. Teplosměnné trubky mají průměr 16 – 22 mm a jsou vyrobeny z nerezových ocelí, popřípadě z legovaných nikl-chromových slitin. Vysoký tlak na primární straně (uvnitř trubek) nemá takový vliv na spotřebu materiálů, jelikož tloušťka stěn trubek se pohybuje v rozmezí 1,2 – 1,8 mm. Naproti tomu řešení s primární vodou proudící uvnitř tělesa parogenerátoru tj. vně trubek by neúměrně zvedlo investiční náklady a způsobilo značné logistické problémy, jelikož hmotnost takového to parogenerátoru by byla neúměrně velká. Pro srovnání: samotné těleso prázdného parogenerátoru reaktoru typu VVER 440 váží 170 tun.

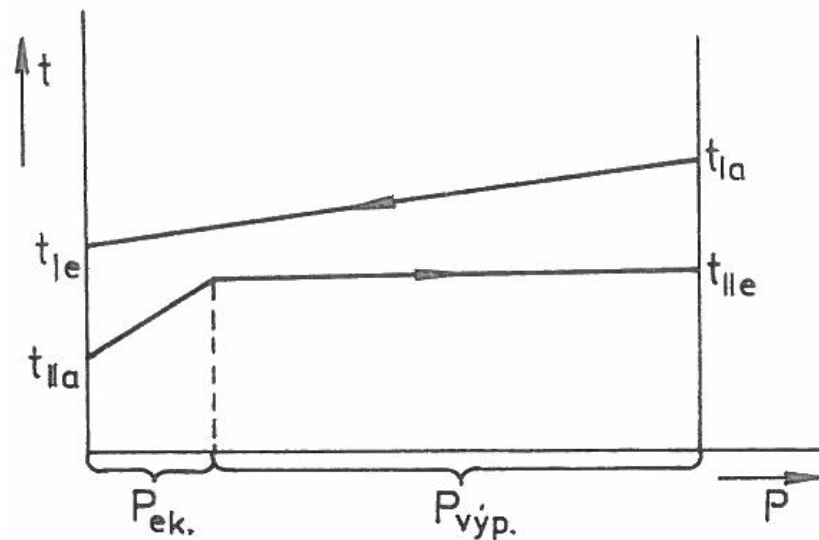
Obdobně, co se týče materiálů, je na tom celý primární okruh, který se dostává do styku s radioaktivní vodou, a proto musí být také vyroben z nerezových materiálů. Pro parogenerátory reaktorů typu VVER 440 (JE Dukovany) byla použita austenitická ocel 08CH18N10T. Pro teplosměnné trubky svislých parogenerátorů se používají vysoce legované slitiny jako Incoloy 800 (viz. příloha č.1), Inconel 600 nebo Inconel 690. Jak již bylo naznačeno, klíčový vliv na funkci nejen parogenerátoru a celé elektrárny, má kvalita provedení svarů jednotlivých těplosměnných trubek. Zde se střetává požadavek na nerezavějící materiál a svařitelnost takového materiálu. Austenitické oceli se špatně svařují a navíc mají (cca 2x) horší součinitel tepelné vodivosti, než uhlíkové oceli. Slabostěnné trubky nejdou svařovat pomocí tupých svarů, a proto se snažíme používat bezešvé trubky (délka přes 16 m) vyrobené z jednoho kusu, které se spojují s kolektory pomocí zaválcování a obvaření. Dalším problémem austenitických ocelí je sklon ke korozi pod napětím za přítomnosti chromového aniontu a kyslíku.

V tělese parogenerátoru na sekundární straně dochází k varu vody a odpařování, takže je zde velký součinitel přestupu tepla. Jelikož víme, že o velikosti výsledného součinitele prostupu tepla rozhoduje především menší z obou součinitelů, snažíme se zvýšit součinitel přestupu tepla na primární straně. Toho lze dosáhnout především zvýšením rychlosti primární vody uvnitř trubek. Navíc teplotní diference vstupní a výstupní primární vody v parogenerátoru je cca 25 – 35 K, což způsobuje, že průtok primárního teplonosiče musí být mnohonásobně vyšší, než množství vyrobené páry. Z těchto důvodů vyplývá nutnost použití nucené cirkulace vody pomocí hlavního cirkulačního čerpadla.

Součinitel prostupu bývá kolem  $4000-6000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  i více a hustota tepelného toku je  $100-230 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ . V reaktoru je hustota tepelného toku ještě o řád vyšší, což znamená vyšší citlivost primárního okruhu vůči usazeninám a nečistotám, než samotného parogenerátoru. Doplňme, že rychlost proudění primární vody se pohybuje od  $2,5$  do  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Závislost průběhu teplot primárního i sekundárního teplonosiče na množství předaného tepla za jednotku času čili předaném výkonu sekundárnímu teplonosiči zobrazuje t-P diagram (viz. Obr.č.4.4) Tento diagram platí pro parní generátory s primárním teplonosičem tlakovou vodou, vyrábějící na sekundární straně nasycenou páru. Přesněji vzato, tento diagram platí pro parogenerátor skládající se

z ekonomisérů a výparníků. Ekonomisér může být vyčleněn mimo těleso výparníku nebo být umístěn ve společném tělese spolu s výparníkem v místě, kde primární voda vstupuje z teplosměnných trubek do výstupní komory. Tato koncepce ve výsledku znamená, že výměník je protiproudý, což má za následek větší střední logaritmický rozdíl teplot, a tudíž lepší přestup tepla. Celkový tepelný výkon  $P_{pg}$  předaný sekundárnímu teplotnímu nosiči je součet tepelného výkonu předaného v ekonomisérů  $P_{ek}$  a tepelného výkonu předaného ve výparníku  $P_{výp.}$  [1,4]



**Obr. 4.4  $t$ - $P$  diagram parogenerátoru s primárním teplotním nosičem tlakovou vodou [1]**

- I – primární teplotní nosič
- II- sekundární teplotní nosič
- a – admise (vstup)
- e – emise (výstup)

## 4.2 Parogenerátory reaktorů VVER – 440 [1,2]

Tento typ parogenerátorů je nejvíce rozšířen v Rusku a Evropě. U nás jsou v současné době v provozu 4 bloky v Dukovanech, na Slovensku 4 bloky v Mochovcích a 4 bloky v Jaslovských Bohunicích. Každý reaktor VVER 440 má 6 horizontálních parogenerátorů (viz. příloha č.2). Jde o horizontální tlakovou nádobu dlouhou 11,8 m s průměrem 3,21m. Pro úplnost doplním, že reaktor 1.,2, a 4. bloku jaderné elektrárny Dukovany má výkon 456 MWe a 3. blok je provozován na zvýšeném výkonu 500 MWe. Jinak původní výkon byl, stejně jako u všech ostatních bloků tohoto typu, projektovaných 440 MWe. Jaderná elektrárna Dukovany dodá každoročně do sítě 13 TWh elektrické energie, což je asi 20% celkové spotřeby České Republiky.

Teplosměnná plocha je tvořena vodorovnými svazky U-trubek o průměru 16 mm. Svazky trubek vycházejí ze svislého vstupního kolektoru (13) primární vody a končí ve svislém výstupním (19) kolektoru primární vody [1]. Trubky jsou zaválcovány do kolektorů výbuchem, čímž je možno zaválcovat několik desítek trubek najednou. Trubky se nakonec ještě ovaří pomocí poloautomatů. Vyvrátání otvorů do kolektorů se provádí ve speciálních stojích např. u nás ve vítkovických železárnách (dnes Vítkovice Power Engineering). Přes svou náročnost jde o nepoměrně technologicky jednodušší úkon, než vyvrátání silnostěnných trubkovnic u svislých parogenerátorů.

Svazky trubek jsou ponořeny pod hladinou sekundárního média a cirkulace mezi teplosměnnými trubkami probíhá přirozeně. Jak už bylo řečeno dříve, součinitel přestupu tepla na sekundární straně je značný, z důvodu varu sekundární vody. Součinitel přestupu tepla na primární straně lze zvětšit zvýšením rychlosti tlakové primární vody a to je úkolem hlavního cirkulačního čerpadla primárního okruhu. Sekundární voda je do parogenerátoru přiváděna nátrubkem (18) a rozváděna rozdělovacím kolektorem (9) napájecí vody do teplejší poloviny svazku trubek. Na obr.4.5 v řezu A-A se jedná o levou polovinu. Tímto způsobem se vyrovnává parní zatížení hladiny. Jinak řečeno, sekundární voda je přiváděna do vodního obsahu parogenerátoru, tudíž se nedostává do styku se vznikající párou. Toto řešení tedy nesnižuje suchost páry nad hladinou a ani nesnižuje výkon parogenerátoru, protože napájecí voda má nižší teplotu, než je teplota odpovídající teplotě varu při daném tlaku.

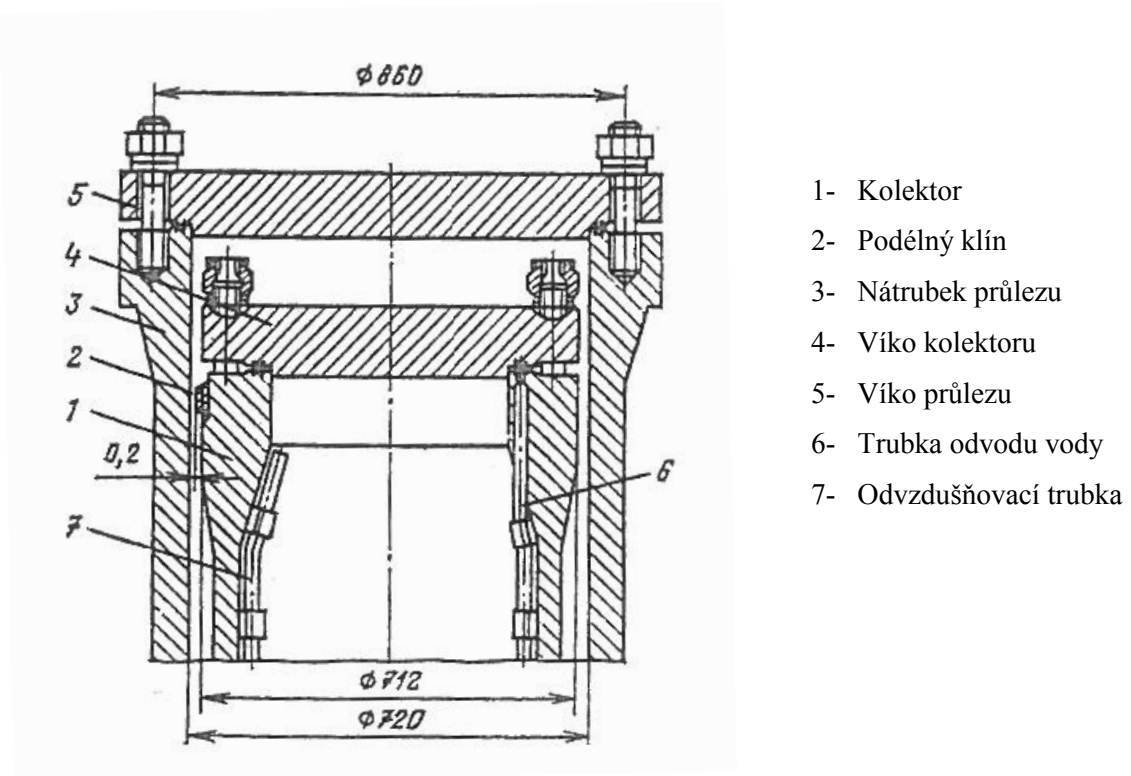
Pára je zbavována vlhkosti průchodem přes žaluziové separátory (4) a vstupuje pěti nátrubky do výstupního kolektoru nasycené páry (5). Vlhkost páry na výstupu nesmí překročit 0,25%. Pracovní objem sekundární vody činí 48,4 m<sup>3</sup> a při úplném zaplnění sekundární voda zaujímá objem 75m<sup>3</sup>. Předepsanou kvalitu páry zabezpečují trvalé a periodické odluky a odkaly, které odstraňují usazeniny na spodní části parogenerátoru.



Nepřetržitý odluh sekundární vody v hodnotě 0,4% parního výkonu se provádí nátrubky (8) ze dna parního generátoru a periodický odkal pomocí tlakové vody nátrubky (10).

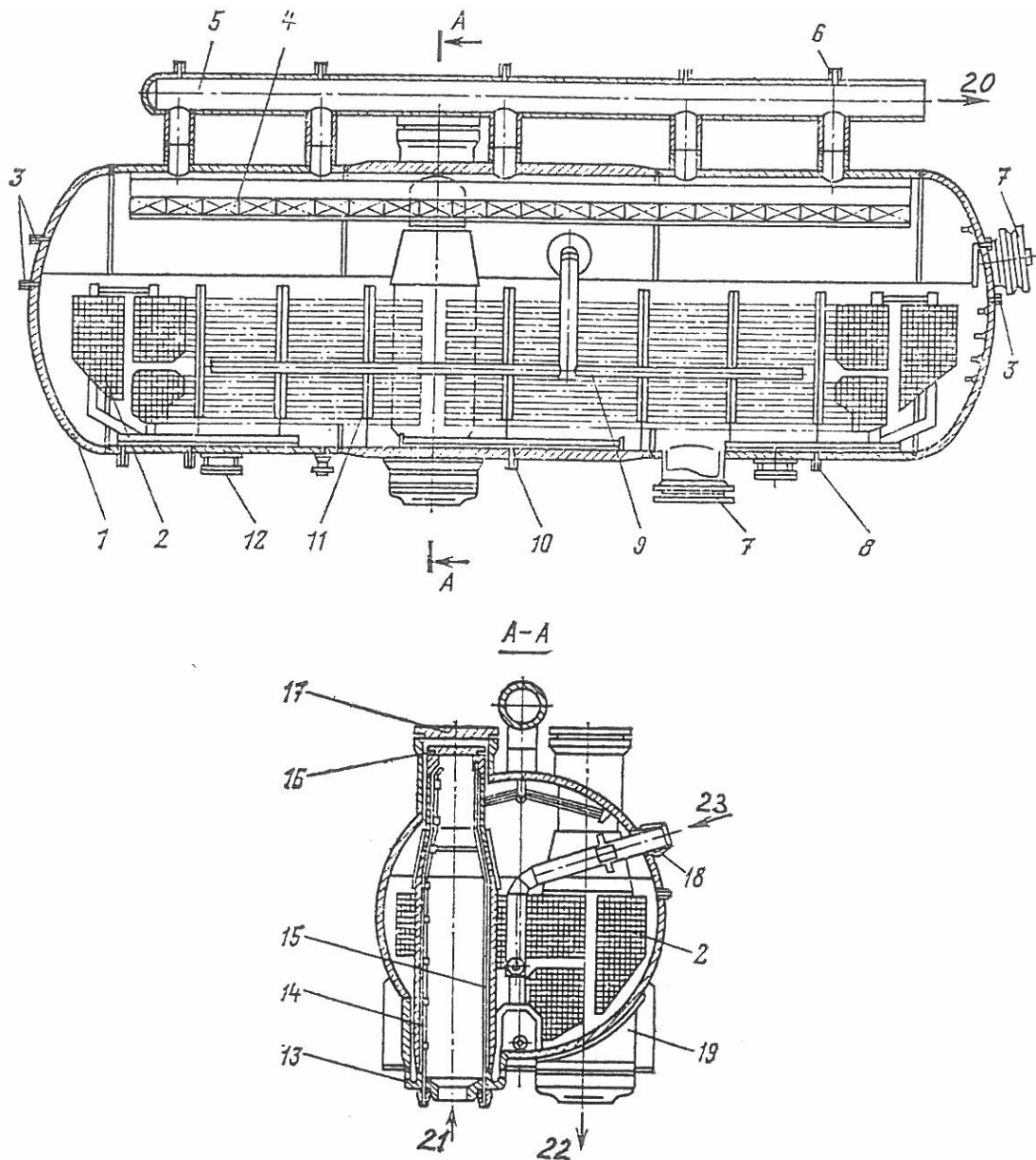
Ve srovnání s původními typy těchto parogenerátorů došlo k největší změně u vstupního a výstupního kolektoru primární vody. Rozdíl spočívá v tom, že původně byly tyto kolektory umístěny uvnitř tělesa parogenerátoru. U dnešních konstrukcí však procházejí horní částí pláště, takže je do nich umožněn přístup shora (viz. obr. 4.5). Víko kolektoru (4) je utěsněno dvěma těsnícími kroužky a případnou netěsnost lze zjistit pomocí trubky (6), napojené do prostoru mezi oba kroužky.

Při napouštění parogenerátoru je třeba odvádět vzduch, na což se používají odvzdušňovací trubky (7). Parogenerátor je přes podpěry (12) zavěšen na betonový strop tak, aby se mohl při vyrovnávání teplotních dilatací primárního a sekundárního potrubí kývat. Parogenerátor je dále vybaven dvěma hladinoměry velkého rozsahu, které se používají při plnění a vyprazdňování parogenerátoru a pěti hladinoměry malého rozsahu, používaných pro měření střední hladiny. Parogenerátor dále obsahuje další přístroje pro měření teploty, průtoku, tlaku atp.



- 1- Kolektor
- 2- Podélný klín
- 3- Nátrubek průlezu
- 4- Víko kolektoru
- 5- Víko průlezu
- 6- Trubka odvodu vody
- 7- Odvzdušňovací trubka

**Obr.4.5 Utěsnění horní části kolektoru primární vody [1]**



**Obr.4.6 parogenerátor bloku jaderné elektrárny s reaktorem VVER 440 [1]**

- |                                          |                                      |
|------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 – těleso parního generátoru            | 13 – vstupní kolektor primární vody  |
| 2 – svazek trubek teplosměnné plochy     | 14 – trubka odvodu úniku kolektoru   |
| 3 – nátrubky hladinoměru                 | 15 – trubka odvodu úniku vody        |
| 4 – žaluziový separátor vlhkosti         | 16 – víko kolektoru                  |
| 5 – kolektor nasycené páry               | 17 – víko průlezu                    |
| 6 – odvodušňovací nátrubek               | 18 – nátrubek vstupu sekundární vody |
| 7 – průlez                               | 19 – výstupní kolektor napájecí vody |
| 8 - Nátrubek nepřetržitého odvodu        | 20 – výstup nasycené páry            |
| 9 – rozdělovací kolektor sekundární vody | 21 – vstup primární vody             |
| 10 – nátrubek periodického odkalu        | 22 – výstup primární vody            |
| 11 – opěrné stojiny svazku trubek        | 23 – vstup sekundární vody           |
| 12 – vrchní část podpěry parogenerátoru  |                                      |

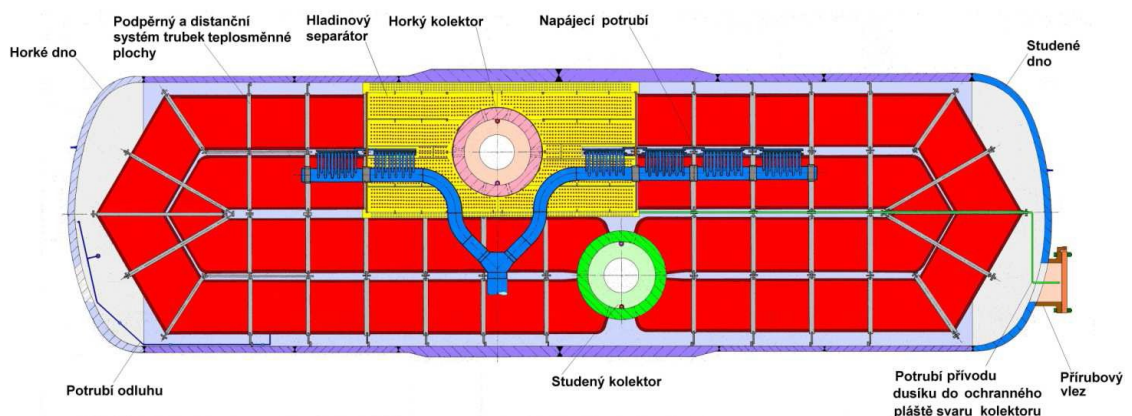
### 4.3 Parogenerátory reaktorů VVER - 1000 [1]

Tyto parogenerátory lze u nás nalézt v jaderné elektrárně Temelín. Oba bloky mají výkon 1000 MWe a na jeden blok připadají 4 parogenerátory tohoto typu. Základní údaje o těchto parogenerátorech jsou v tabulce (viz. příloha č.3).

Dá se říci, že parogenerátor reaktoru typu VVER 1000 je reakcí na celosvětový trend snižování počtu smyček u bloků jaderných reaktorů. Díky vyššímu výkonu (750 MWt) oproti typu VVER 440, stačí na jeden reaktor 4 parogenerátory.

Těleso parogenerátoru je svařeno z prstenců (lubů) zakružovaných z plechů silných 105 mm. Dva prostřední prstence mají však tloušťku 195 mm, protože jsou v nich otvory pro průchod kolektorů primární vody (viz. obr.4.8). Z pevnostních důvodů nejsou kolektory umístěny v jedné rovině kolmé k ose parogenerátoru, ale jsou mírně přesazeny tak, že každý z nich je v jednom prstenci (viz. obr.4.7).

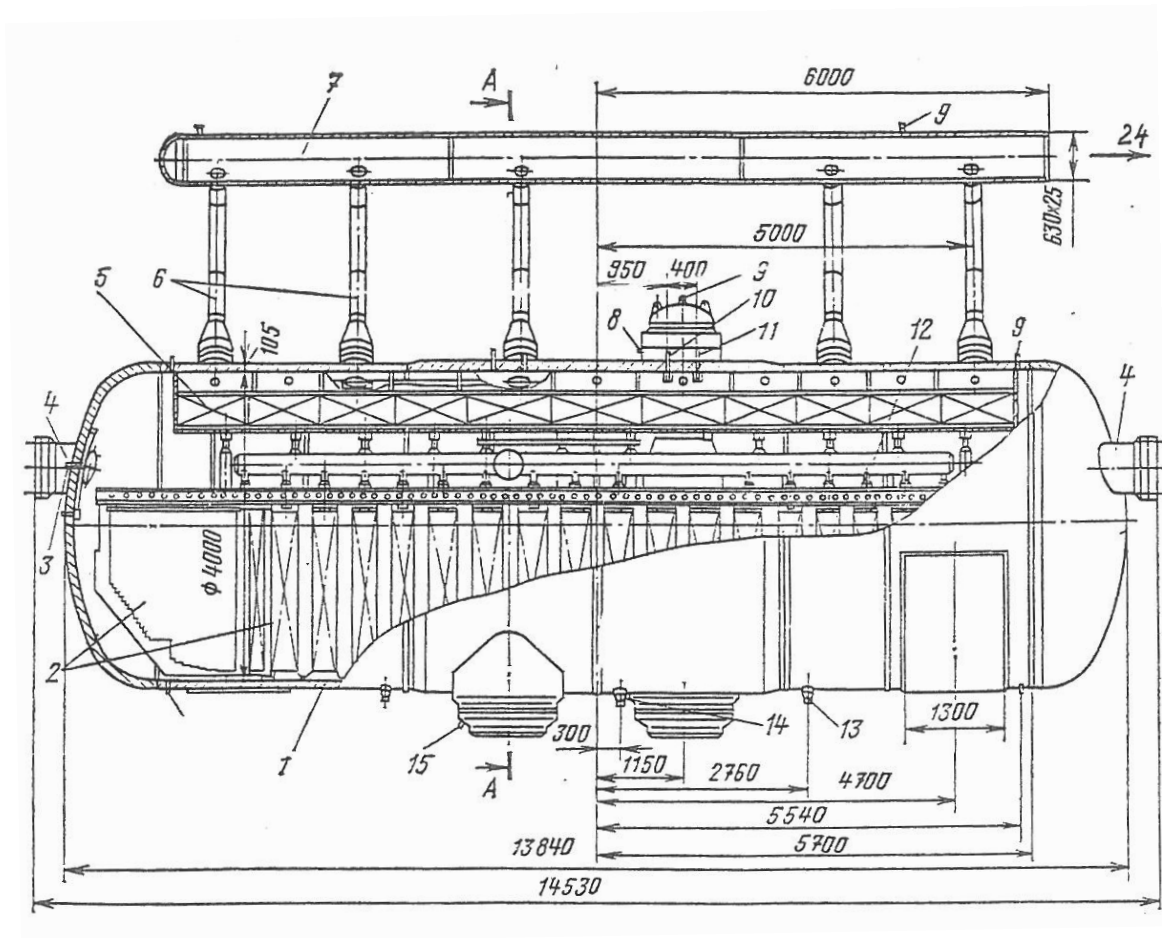
Teplosměnné trubky mají průměr 16 mm a tloušťku stěny 1,5 mm. Jsou vyrobeny z austenitické oceli 08CH18N10T a zahnuté do tvaru U. Trubky jsou zachyceny distanční mříží a je mezi nimi vertikální rozteč 19 mm. Jsou uspořádány ve vodorovných řadách do dvou svazků v levé a pravé polovině tělesa parogenerátoru. Horizontální rozteč ve svazku činí 23 mm. Kromě toho jsou ve svazcích vertikální mezery, které zlepšují přirozenou cirkulaci parovodní směsi v mezitrubkovém prostoru a usnadňují montáž. Distanční mříže jsou uchyceny ke svislým opěrným stojinám a k žebrům, přivařeným k plášti parogenerátoru. Pro úplnost doplníme, že u typu VVER 440 jsou rozteče 24 mm (vertikální) a 30 mm (horizontální), tudíž svazek trubek u typu VVER 1000 je kompaktnější. To dovoluje zvýšit teplosměnnou plochu a tím i výkon parogenerátoru při zachování podobných vnějších rozměrů.



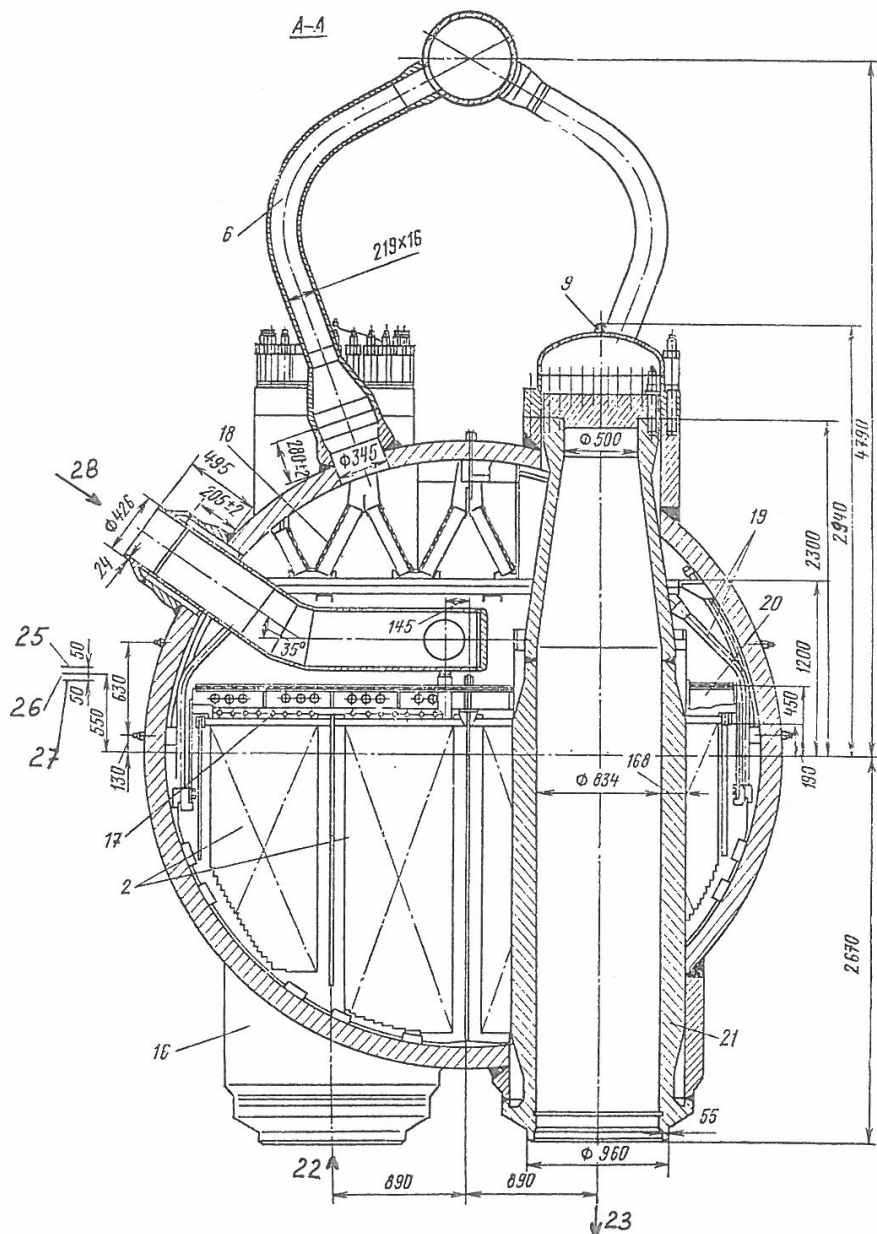
Obr. 4.7 Podélný řez tělesem parogenerátoru VVER 1000 [15]

Vstup napájecí vody (28) do parního generátoru (viz.obr.4.9) je řešen netradičně. Trubka napájecí vody, přiváděné k nátrubky, se totiž v místě průchodu pláštěm parogenerátoru nedotýká přímo pláště, aby nevznikaly teplotní pnutí v plášti parogenerátoru. Napájecí voda dále pokračuje do kolektoru (12), a pak přes rozváděcí trubky do teplejší části parogenerátoru obdobně jako u typu VVER 440.

Sekundární voda se ohřeje na teplotu varu v mezitrubkovém prostoru na účet zkondenzování části bublinek páry. K rovnoměrnějšímu rozvodu parovodní směsi v parním objemu pomáhá také děrovaný štít, uložený pod hladinou ve výši 260 mm nad svazkem trubek. To je další rozdíl oproti typu VVER 440, který jím nedisponuje. Vzniklá pára nejprve postupuje do gravitačního separátoru a posléze prochází přes žaluziový separátor. Vlhkost na výstup ze separátorů nesmí překročit 0,2 %.



Obr. 4.8 Parogenerátor bloku s VVER 1000 [1]



**Obr. 4.9 Parogenerátor bloku s VVER 1000 (příčný řez) [1]**

- |                                                |                                           |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1 – těleso parogenerátoru                      | 15 – vypouštěcí nátrubek                  |
| 2 – svazek U – trubek                          | 16 - vstupní kolektor primární vody       |
| 3 – nátrubky hladinoměru                       | 17 – trubka rozvádějící sekundární vody   |
| 4 – průlez                                     | 18 – síta separátorů vlhkosti páry        |
| 5 – sekce žaluziového separátoru               | 19 – trubky odvádějící odloučenou vlhkost |
| 6 – trubky odvádějící páru                     | 20 – děrovaný, ponořený štít              |
| 7 – kolektor nasycené páry                     | 21 - výstupní kolektor primární vody      |
| 8 – nátrubek kontroly úniku sekundární vody    | 22 – vstup primární vody                  |
| 9 – nátrubky odvzdušnění sekundárního okruhu   | 23 – výstup primární vody                 |
| 10 – nátrubek kontroly úniku primárního okruhu | 24 – výstup nasycené páry                 |
| 11 – nátrubek odvzdušnění primárního okruhu    | 25 – maximální úroveň hladiny vody        |
| 12 – kolektory rozvody sekundární vody         | 26 – normální úroveň hladiny              |
| 13 – nátrubek periodického odkalu              | 27 – maximální úroveň                     |
| 14 – nátrubek nepřetržitého odluhu             | 28 – vstup sekundární napájecí vody       |

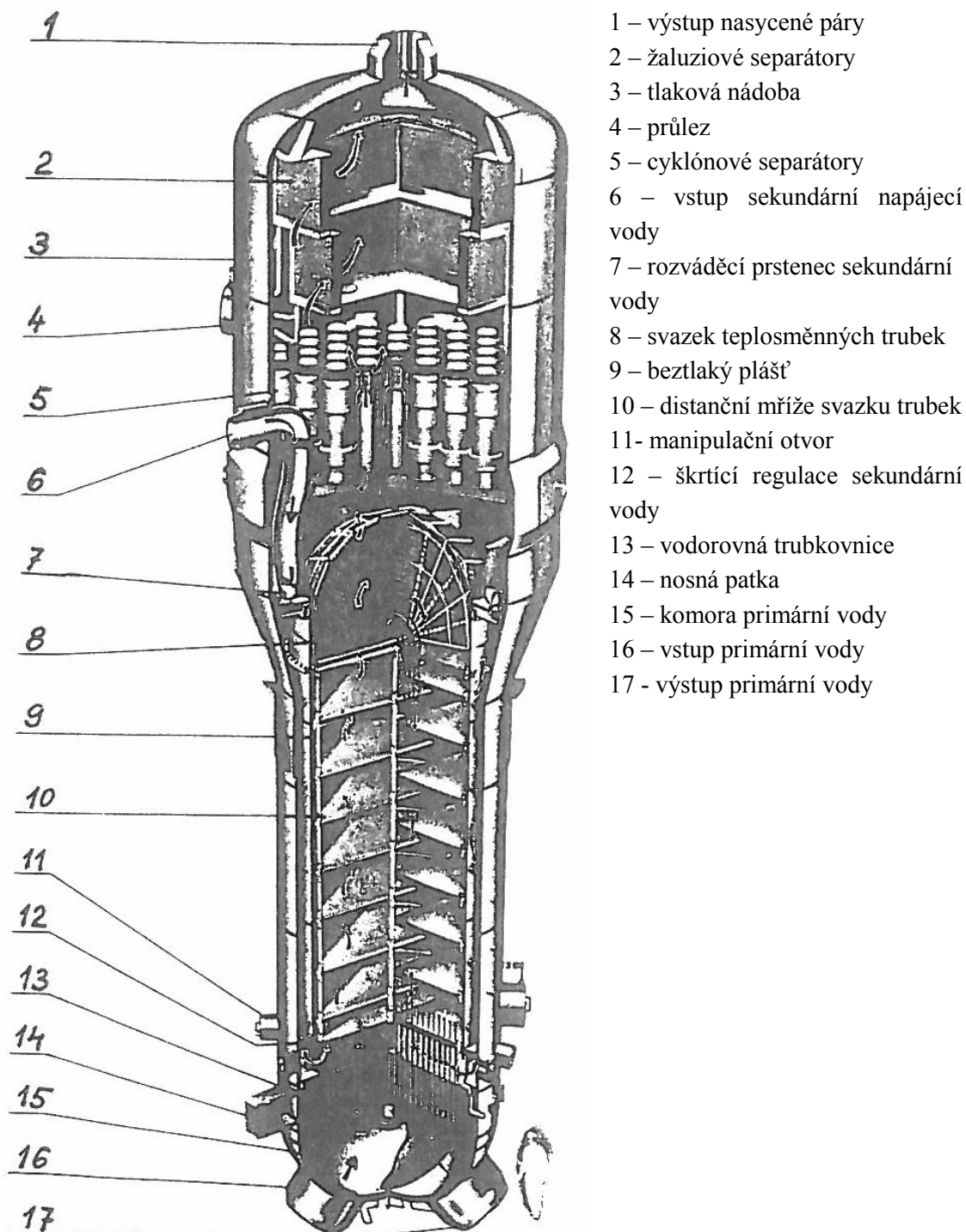
## 4.4 Svislé parogenerátory [1]

Jak již bylo zmíněno dříve, svislé parní generátory se používají především v západní Evropě a USA. Příklad takového parogenerátoru můžeme vidět na obr. 4.10. Jde o parogenerátor německé elektrárny Biblis A, kterou dodala firma Kraftwerk Union. Parogenerátory vyrobila firma Babcock-Wilcox. Na blok A o výkonu 1200 MWe připadají 4 parogenerátory. Elektrárna disponuje ještě blokem B o výkonu 1300 MWe, taktéž se čtyřmi parogenerátory. Primární voda putuje do vstupní komory (15) nátrubkem (16) a dále pokračuje do U – trubek zaválcovaných do trubkovnice (13). Poté, co primární voda předá část své tepelné energie sekundární vodě, putuje do výstupní komory a těleso parogenerátoru opouští nátrubkem (17). Do trubkovnice, ocelové desky, je navrtáno 8000 otvorů o hloubce 660 mm s přesností větší, než 0,1 mm. Proto je také tato součást parogenerátoru technologicky nejnáročnější.

Sekundární voda vstupuje nátrubkem (6) a děrovaným prstencem (7) se rozvádí po obvodu pláště parogenerátoru. Poté sekundární voda stéká dolů prostorem mezi pláštěm (3) parogenerátoru a beztlakým pláštěm (9), obsahujícím svazek teplosměnných trubek. Beztlaký plášť nedosahuje až k trubkovnici, takže sekundární voda může proudit mezi svazek trubek. Pára, která se generuje v mezitrubkovém prostoru, stoupá přirozeně nahoru do separátorů. Hladina sekundární vody dosahuje až do horní rozšířené části parogenerátoru, takže svazek teplosměnných U - trubek je zcela ponořen pod hladinou. První sekce separátorů jsou cyklónové separátory (5) a druhou sekci tvoří žaluziové separátory (2). Pára, opouštějící parogenerátor nátrubkem (1), nesmí mít vyšší vlhkost, než 0,25 %.

U horizontálních parogenerátorů jsem zmínil problém usazování nečistot na dně parogenerátoru a z toho plynoucí nutný nepřetržitý odluh a periodický odkal. U svislých parogenerátorů tento problém samozřejmě existuje taky. Problematické místo tohoto faktu je vnější povrch (na sekundární straně) trubek těsně nad trubkovnicí. Dochází zde k usazování kalů z oxidů železa. Jejich koncentrace roste při vypařování a také s rostoucí teplotou klesá jejich rozpustnost ve vodě. Kaly se usazují dole na trubkovnici a na spodní straně trubek. A zde vyvstává velký problém, protože na rozdíl od horizontálních parogenerátorů, zde nelze odvádět kal odluhem z důvodu hustého lesa trubek teplosměnné plochy. V pórech kalů dochází k vypařování vody, což způsobí zvýšení koncentrace všech příměsí, zejména aniontů chlóru a alkalických kovů. Při tlakovém namáhání austenitických ocelí způsobuje aniont chlóru korozi. To je také důvod, proč nelze použít těchto ocelí u svislých parogenerátorů. Proto se teplosměnné trubky vyrábějí z niklových ocelí, jako například Inconel 600, Incoloy 800 (viz. příloha č.1) nebo Inconel 690.

Naproti tomu, trubky horizontálních parogenerátorů lze konstruovat z levnějších austenitických nerezových ocelí třídy 08Ch18N10T. Je to dáno tím, že u tohoto typu parogenerátorů vycházejí teplosměnné trubky ze svislých kolektorů, tudíž nedochází k usazování kalů na trubkách, ale na dně tělesa parogenerátoru.



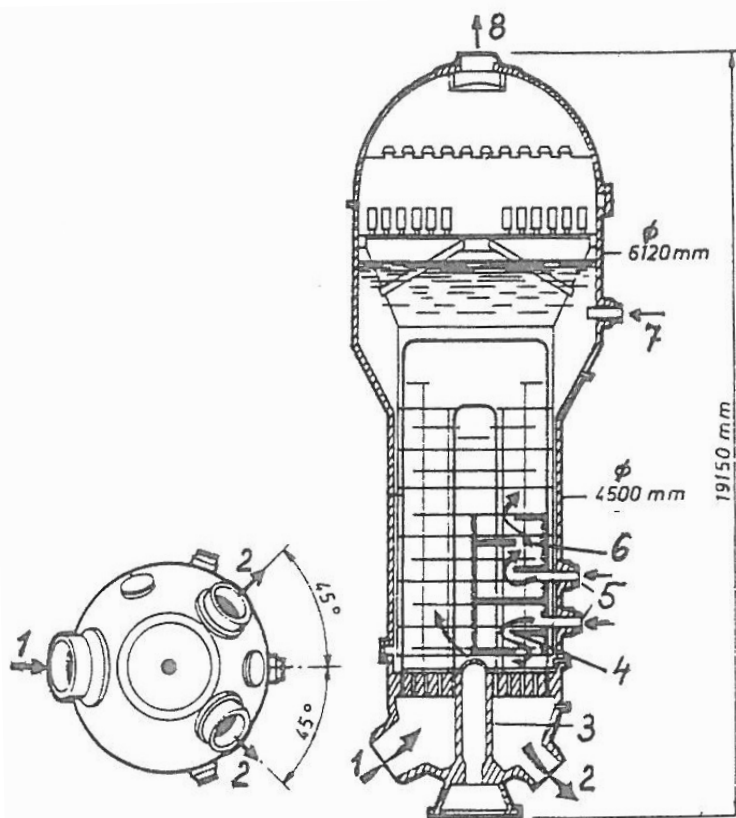
Obr. 4.10 Svislý parogenerátor elektrárny Biblis A [1]

#### 4.4.1 Svislý parogenerátor s vyztuženou trubkovnicí [1]

Je vhodné připomenout, že vodorovná trubkovnice svislých parogenerátorů je deska velkého průměru s tisíci provrtanými otvory, navíc namáhána velkým rozdílem tlaků. Konkrétně 16 MPa na primární a 5 MPa na sekundární straně. Je zřejmé, že z pevnostních důvodů musí být trubkovnice velmi silná.

Tento neduh se pokusila vyřešit firma Combustion Engineering. Ve snaze snížit její tloušťku, vyztužila trubkovnici zespodu masivním stojanem. Díky tomu se i přes zvětšení průměru trubkovnice na 4500 mm podařilo snížit tloušťku na 580 mm (klasicky 660 mm).

Tento typ parogenerátoru má výkon 1900 MWt, čemuž odpovídá elektrický výkon 650 MW. Na elektrický výkon 1300 MW tedy postačí pouze dva parogenerátory. Trubkovnice je navíc proti korozi plátována slitinou Inconel 600. Do ní jsou trubky zaválcovány výbuchem a ovařeny argonově – obloukovým svařováním. Parogenerátor je vysoký 19,5 m a šířka v jeho horní části činí 6,12 m, jak lze ostatně vidět na obr. 4.11. Parogenerátor má u své výstupní (chladnější) části svazku trubek integrálně řazené ekonomiséry (ohříváky sekundární vody). Sekundární voda vstupuje do parogenerátoru hrdly (5) a pro levou část svazku trubek se ohřívá v ohříváku (4) neboli ekonomiséru a pro pravou polovinu v ohříváku (6). Cirkulace sekundární vody je obdobná jako u parogenerátoru elektrárny Biblis v předchozí kapitole.



- 1 – vstup primární vody
- 2 – výstup primární vody
- 3 – stojan k vyztužení trubkovnice
- 4 – ohřívák napájecí vody pro levou polovinu svazku trubek
- 5 – hlavní přívody sekundární vody
- 6 – ohřívák napájecí vody pro pravou polovinu svazku trubek
- 7 – pomocný přívod napájecí vody
- 8 – výstup nasycené páry

Obr. 4.11 Svislý parogenerátor s vyztuženou trubkovnicí [1]

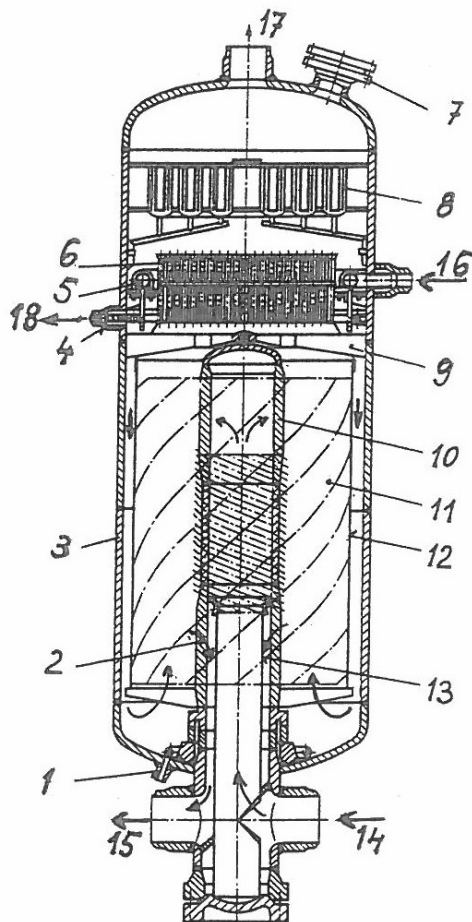


#### 4.4.2 Svislý parogenerátor se svislým kolektorem primární vody [1]

V Rusku vznikl projekt, jehož cílem bylo se vyhnout technologicky náročné trubkovnici, a tak vznikl parogenerátor se svislým kolektorem napájecí primární vody.

Primární voda vstupuje do svislého kolektoru parogenerátoru hrdlem (14). Poté proudí vzhůru vnitřní trubkou (13) kolektoru do vstupní komory (10). Komora má zesílené stěny z důvodu velkého množství navrtaných otvorů pro teplosměnné trubky šroubovicového tvaru (11). Paralelně řazené vinuté trubky jsou uspořádány ve formě vícechodého závitu. Po průchodu trubkami, primární voda vstupuje do výstupní komory svislého kolektoru (2) a posléze proudí mezidruhovým prostorem do výstupního hrdla (15).

Sekundární voda vstupuje do parogenerátoru hrdlem (16) a poté je rozdělována kolektorem prstencového tvaru (5) po obvodu pláště parogenerátoru tak, aby stékala dolů mezidruhovým prostorem mezi tělesem parogenerátoru a beztlakým pláštěm (12). Poté, co sekundární voda zesponu vstoupí mezi svazek teplosměnných trubek, ohřeje se a vznikne směs vody a páry stoupající mezitrubkovým prostorem nahoru. Sytá pára je nejprve zbavována vlhkosti v cyklónových (6) a poté v žaluziových separátorech (8). Výsledná pára, jejíž vlhkost nesmí překročit 0,25 %, poté vystupuje z parogenerátoru hrdlem (17).



- 1 – nátrubek periodického odluhu
- 2 – výstupní komora primární vody
- 3 – těleso parního generátoru
- 4 – nátrubek nepřetržitého odluhu
- 5 – kolektor napájecí vody
- 6 – cyklónové separátory vlhkosti páry
- 7 – průřez
- 8 – žaluziové separátory vlhkosti páry
- 9 – opěrné desky svislého kolektory I vody
- 10 – vstupní komora primární vody
- 11- svazek trubek teplosměnné plochy
- 12 – beztlaký plášť obepínající svazek trubek
- 13 – vnitřní trubka ve svislém kolektoru
- 14 – vstup primární vody
- 15 – výstup primární vody
- 16 – vstup sekundární napájecí vody
- 17 - výstup nasycené páry
- 18 – nátrubek nepřetržitého odluhu

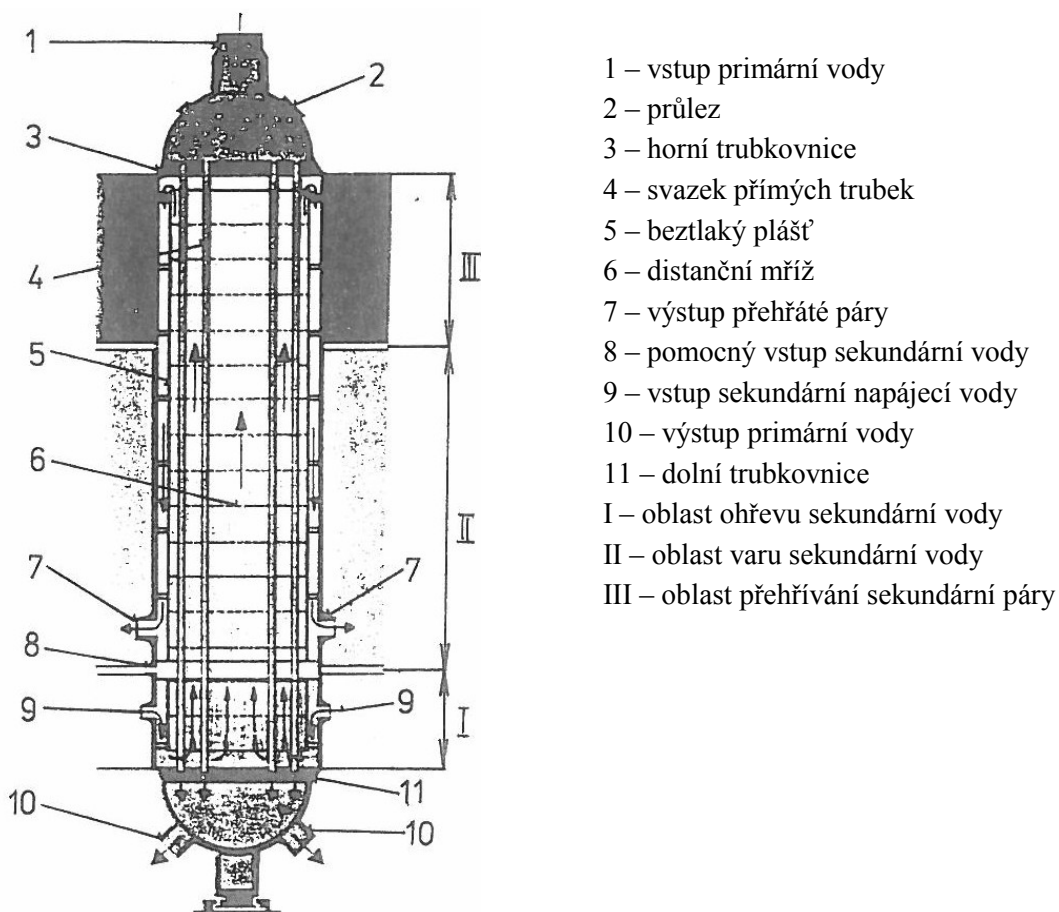
Obr. 4.12 Svislý parogenerátor se svislým kolektorem primární vody [1]

### 4.4.3 Parogenerátor s mírným přehřevem vody [1]

Tento typ parogenerátoru byl realizován především v USA. Na obr. 4.13 můžeme vidět takovýto parogenerátor od firmy Babcock a Wilcox. Tento typ byl instalován např. v elektrárně Oconee ( 3 bloky po 920 MWe, 2 parogenerátory na blok), Three Mile Island (2 bloky po 875 MWe) nebo Bellefonte ve státě Alabama (2 bloky po 1300 MWe).

Primární voda vstupuje do vstupní komory hrdlem (1). Dno vstupní komory primární vody tvoří horní trubkovnice (3), do níž je zaválcováno a zavřeno 16 000 teplosměnných přímých trubek ze slitiny Inconel 600. Vnější průměr trubek je 16 mm a tloušťka stěny 0,9 mm při 16 m délky. Primární voda proudí shora dolů a ochlazuje se z 329°C na 296°C. Po průchodu dolní trubkovnicí (11) proudí primární voda do výstupní komory a parogenerátor opouští dvěma potrubími (10) do sání hlavních cirkulačních čerpadel.

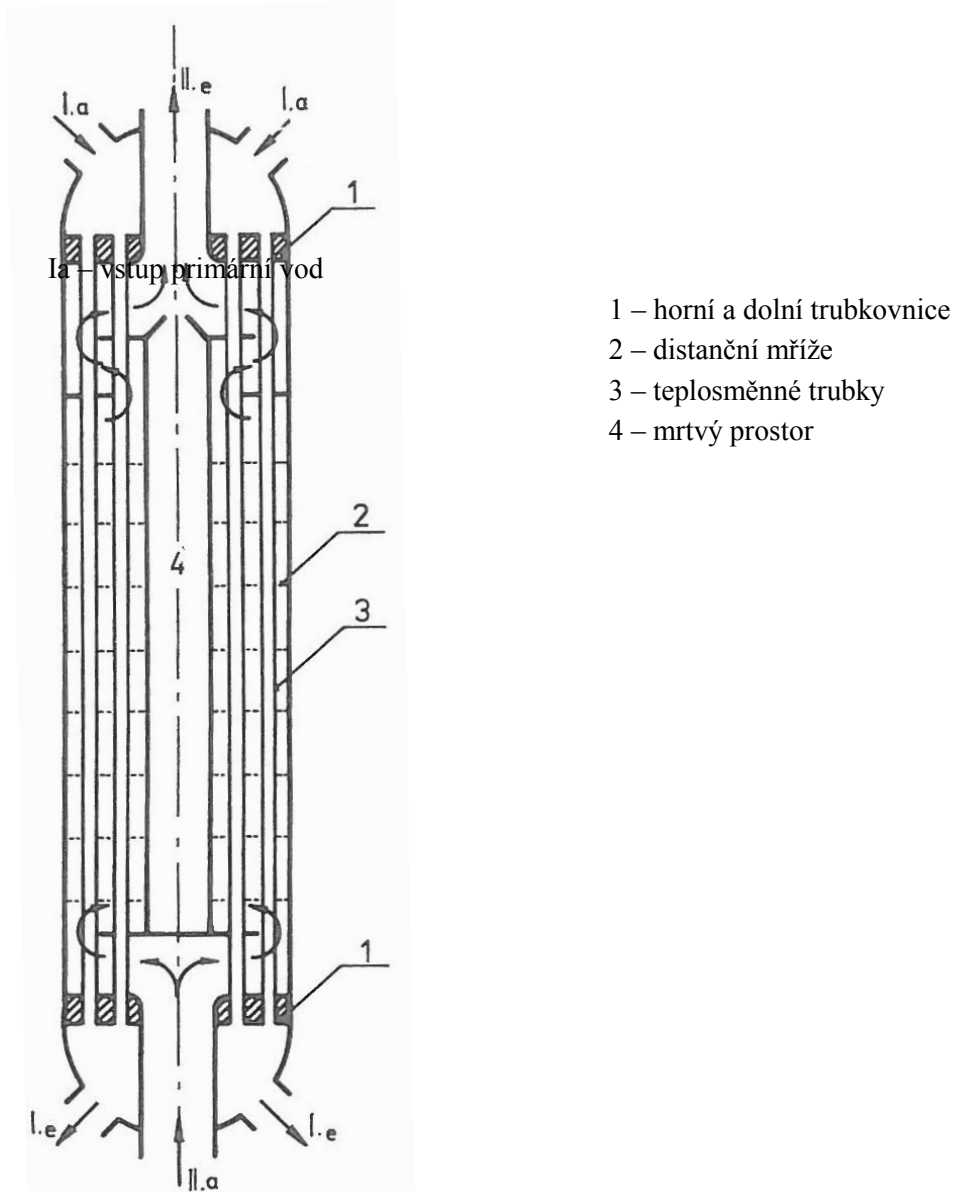
Sekundární voda je přiváděna do parogenerátoru nátrubky (9) a posléze proudí dolů mezikruhovým prostorem mezi tělesem parogenerátoru a beztlakým pláštěm (5). Beztlaký plášť nedosahuje až k dolní trubkovnici, takže vzniklou mezerou proudí sekundární voda do mezitrubkového prostoru směrem vzhůru.



**Obr. 4.13 Svislý průtočný parogenerátor s přímými trubkami a mírným přehřevem páry [1]**

#### 4.4.4 Parogenerátor Trépaud s přímými, mírně vlnitými trubkami [1]

Jedná se o francouzskou koncepci průtočného parogenerátoru vyrábějícího mírně přehřátou páru. To, čím se tento parogenerátor odlišuje od ostatních, je řešení teplotních dilatací. Teplosměnné trubky jsou totiž mírně zvlněny ve tvaru sinusoidy. Tato koncepce řeší dilatace trubek, pláště parogenerátoru i rozdíly v dilatacích jednotlivých trubek. Konstrukce takového parogenerátoru dovoluje teplotní rozdíl 200 až 300 K mezi trubkami a pláštěm, což ovšem nenastane ani při havárii jaderné elektrárny. Schéma tohoto parogenerátoru můžeme vidět na obr. 4.14. Vlnité trubky navíc zvyšují součinitel přestupu tepla na primární straně asi o 10% oproti parogenerátorům s přímými trubkami. Pro elektrárnu a výkonu 1300 MWe je počítáno se dvěma parogenerátory.



Obr. 4.14 Průtočný parní generátor Trépaud s přímými mírně vlnitými trubkami [1]

Primární voda (326°C, 15,5 MPa) vstupuje do parogenerátoru dvěma hrdly (Ia) a proudí dolů trubkami do výstupních hrdel (Ie). Při výstupu z parogenerátoru má primární voda teplotu 292°C. Za hodinu proteče parogenerátorem 35 200 t primární vody. Sekundární voda je přiváděna centrálně hrdlem (IIa) a má teplotu 230°C.

Nad dolní trubkovnicí (1) se proud sekundární vody rozděluje do trubek o průměru 17 mm. Uprostřed se nachází mrtvý válcový prostor (4), který je zdola uzavřen tak, aby sekundární voda musela proudit mezi trubkami vzhůru. Jelikož je tento parogenerátor průtočný, je cirkulace sekundární vody vyvozena napájecím čerpadlem, a proto nehrozí tak velké nebezpečí koroze v usazeném kalu nad trubkovnicí, jak je tomu u parogenerátorů s U – trubkami, protože tyto parogenerátory mají přirozenou cirkulaci.

Sekundární voda se postupně průchodem ohřívá na bod varu (ekonomizérová část), mění v páru (výparníková část) a pod horní trubkovnicí se pára mírně přehřívá (přehříváková část). Pára o teplotě 303°C a tlaku 6,4 MPa vystupuje z parogenerátoru centrálním hrdlem (IIe).

Parametry parogenerátoru jsou následující. Výška činí 19,5 m a vnější průměr 3,77 m a hmotnost 320 t. Průtok páry činí 3680 t/h. Vnější průměr je dokonce menší, než u parogenerátorů s přímými trubkami, který navíc obsahuje mezidruhový prostor mezi tělesem parogenerátoru a beztlakým pláštěm kolem svazku trubek. Výhodou parogenerátoru je také tloušťka trubkovnice (350 mm), které je mnohem menší, než u parogenerátorů s U-trubkami (přes 600 mm). Určitou nevýhodou se může zdát vnitřní mrtvý prostor o průměru 1,4 m, který se však využívá pro montáž trubek.

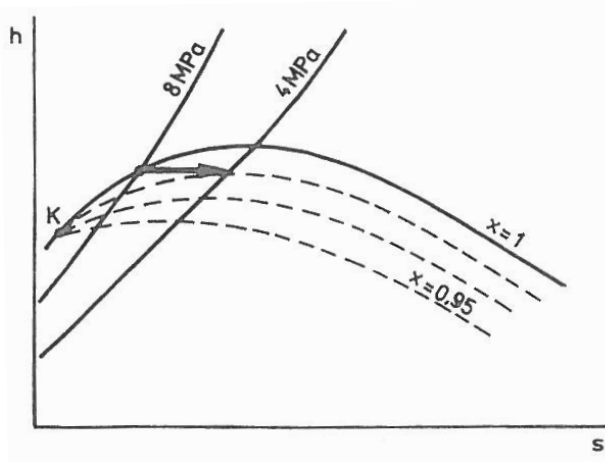
## 4.5 Porovnání svislých a horizontálních parogenerátorů [1]

Výhodou horizontálních parogenerátorů se svislými kolektory primární vody je možnost použití teplosměnných trubek vyrobených z oceli 08Ch18N10T. Tato ocel je mnohem levnější, než drahé niklové slitiny používané u svislých parogenerátorů z důvodu koroze trubek nad vodorovnou trubkovnicí. Další výhodou horizontálních parogenerátorů je snadnější vrtání otvorů pro trubky do tenkých svislých parogenerátorů, než do silných vodorovných trubkovnic svislých parogenerátorů. Do třetice bych mohl zmínit ještě mnohem menší zatížení parní hladiny oproti svislým parogenerátorům, což vede k menšímu strhávání kapalné fáze do páry, a usnadňuje tak následnou separaci.

Na druhou stranu nevýhodou horizontálních parogenerátorů je větší půdorysná plocha potřebná pro instalaci parogenerátoru do ochranného kontejnmentu. Pro elektrické výkony větší, než 250 MW připadající na jeden parogenerátor, je také lepší použít svislý parogenerátor. Z hlediska spolehlivosti není mezi těmito koncepcemi rozdíl.

Plocha teplosměnných trubek se obvykle volí větší asi o 20%, než je vypočtená potřebná plocha pro zajištění požadovaného výkonu. Tímto dimenzováním se berou v úvahu tolerance přesnosti součinitelů přestupu tepla, vliv usazenin na přenos tepla a především pak se vytváří rezerva pro zaslepování trubek poškozených během provozu. Zejména trubky tvaru U nelze vyměnit, a proto je nutné je zaslepit zátkami v trubkovnicích nebo kolektorech.

Poznámka: Obvykle se snažíme u parogenerátorů zvyšovat termickou účinnost tím, že zvyšujeme parametry páry vstupující do turbíny. Problém však nastane, pokud parogenerátor vyrábí sytou páru. Při škrcení páry vstupující do turbíny se zvýší vlhkost, což je nežádoucí pro životnost turbíny. Vyplyvá to z tvaru horní mezní křivky a křivek konstantní suchosti u vodní páry, jak můžeme vidět v h-s diagramu na obr. 4.15. Z tohoto diagramu vyplývá, že při zvýšení tlaku páry vstupující do turbíny nad 4 MPa, dochází při škrcení páry ke zvýšení její vlhkosti, což má nepříznivý vliv na práci a účinnost turbíny. Proto při zvyšování tlaku páry ji musíme zároveň přehřát alespoň o 20 K.



**Obr. 4.15 Zvyšování vlhkosti páry při jejím seškrcení na vstupu do turbíny při zvýšení admisního tlaku [1]**

## **4.6 Rozdělení parogenerátorů z hlediska proudění sekundární vody [1]**

V první řadě je nutno poznamenat, že všechny typy parogenerátorů mají nucený průtok primární vody. Je to z důvodu změny entalpie primární vody. Ta je mnohonásobně menší, než změna u sekundární vody, která prochází stanovou změnou. Z toho logicky vyplývá, že vyžaduje mnohonásobně větší průtok primární vody, čehož lze dosáhnout pouze hlavním cirkulačním čerpadlem.

Parogenerátory tedy dělíme na:

- 1) Parogenerátory s přirozeným oběhem sekundární vody
- 2) Parogenerátory s nuceným oběhem sekundární vody
- 3) Parogenerátory s nuceným průtokem sekundární vody, průtočné parogenerátory

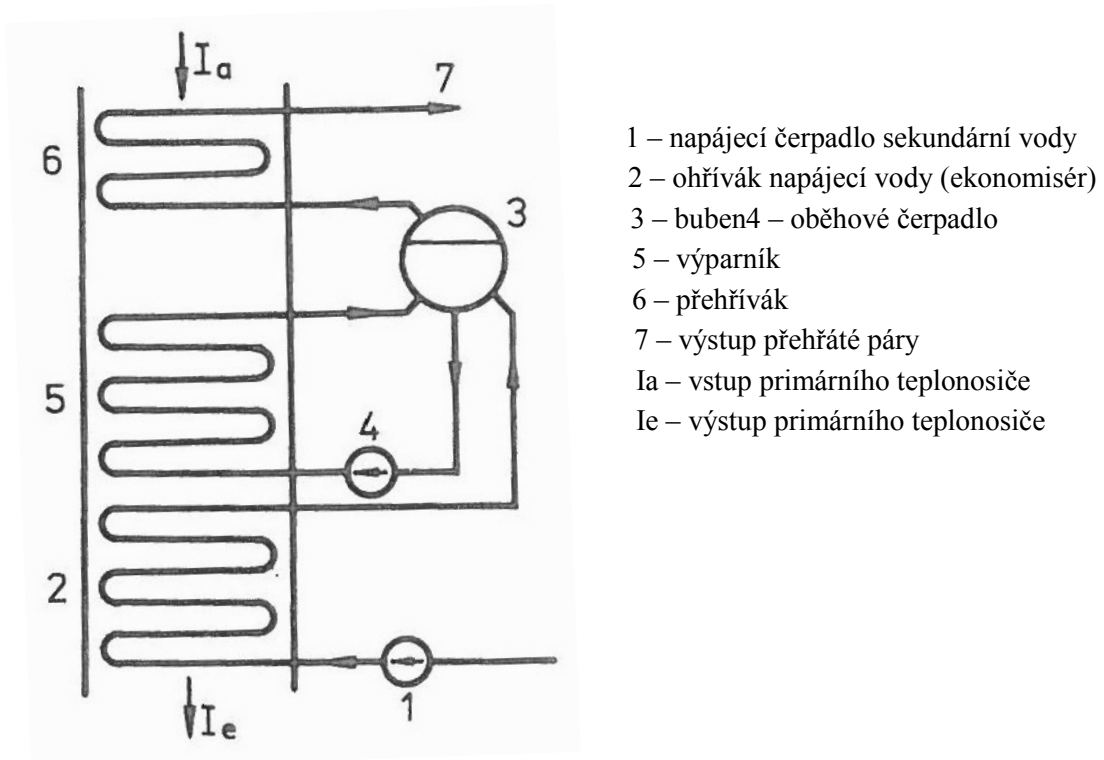
### **4.6.1 Parogenerátory s přirozeným oběhem sekundární vody [1]**

Příklad tohoto parogenerátoru můžeme vidět na obr. 4.12. Jak už název napovídá, využíváme zde přirozený termosifonový efekt. Chladnější voda proudí směrem dolů a ohřátá směs vody a páry proudí směrem nahoru. Čím vyšší je parogenerátor, tím pochopitelně zajistíme lepší přirozenou cirkulaci. Tyto parogenerátory můžeme nalézt například v elektrárně Biblis A nebo v Temelíně.

## 4.6.2 Parogenerátory s nucenou cirkulací sekundární vody [1]

Parogenerátory s nucenou cirkulací sekundární vody používáme v případech, kdy potřebujeme zintenzivnit přenos tepla na sekundární straně z ekonomických nebo technologických důvodů. Při zintenzivnění přestupu tepla lze vyrobit menší parogenerátor při stejném výkonu a uspoříme tak místo i materiál, který není zrovna nejlevnější. Na druhou stranu vzroste energetická potřeba pro pohon oběhových čerpadel, avšak v poměru s výkonem dnešních elektráren jde o nepatrnou změnu. Názorně můžeme vidět schéma tohoto typu parogenerátoru na obr. 4.20. Pro větší názornost je zde uveden konkrétně typ s primárním teplotní nosičem plynem.

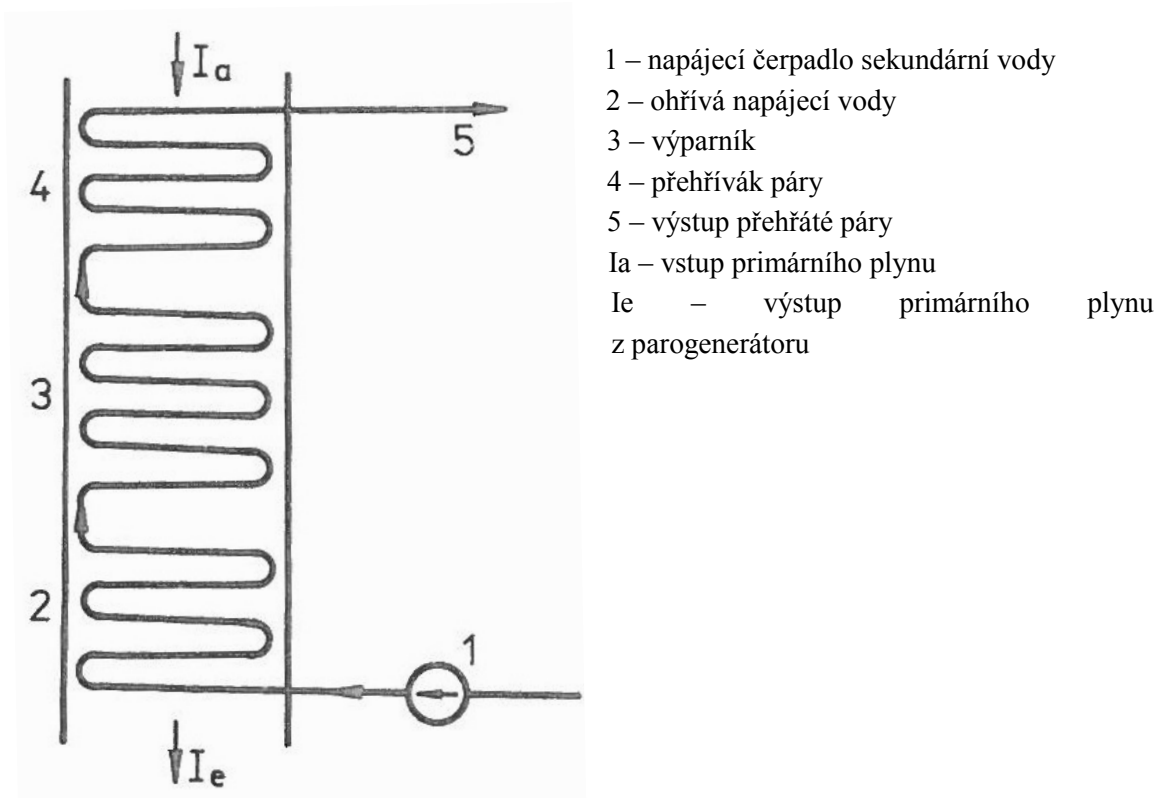
Nucenou cirkulaci zajišťuje oběhové čerpadlo (4). Voda je dopravována z bubnu (3) do výparníku (5). Z výparníku proudí směs vody a páry do bubnu, který oddělí vodu od syté páry. Pára následně protéká přehřívákem (6) a opouští parní generátor (7). Voda je dopravována do ohříváku (ekonomisér) napájecím čerpadlem (1), takže jde o nucený průtok. Tato koncepce byla použita například v elektrárnách Jaslovské Bohunice nebo Calter Gall v Anglii.



Obr. 4.16 Parogenerátor s nuceným oběhem sekundární vody [1]

### 4.6.3 Parogenerátory průtočné [1]

Tyto parní generátory se používají pro vyšší tlaky páry a výkony. Sekundární voda je protlačována napájecím čerpadlem celým parogenerátorem až po výstup páry z parogenerátoru [1]. Jejich nevýhodou je značná tlaková ztráta na sekundární straně a vysoké nároky na úpravu vody, jelikož je nutné dokonalé odstranění solí, který by se mohly usazovat v trubkách zejména na konci výparníku, kde dochází k vypařování. Toto je velký rozdíl oproti parogenerátorům s přirozenou cirkulací, kde je možno soli jednoduše odstranit odluhem z bubnu. Názorný schéma parogenerátoru tohoto typu lze vidět na obr. 4.17. Jedná se opět o typ s primárním teplonosičem plynem.



4.17 Průtočný parní generátor s primárním teplonosičem plynem [1]



## 4.7 Charakteristika procesů probíhajících v parogenerátoru [2,3]

Funkce a životnost parogenerátorů závisí na mnoha faktorech a jevech, probíhajících při výměně tepla. Nejdříve bychom si mohli trochu objasnit vliv mechanismů přestupu tepla z teplonosiče na teplosměnné trubky parogenerátoru.

Předávání tepla se nejčastěji děje v podmínkách stacionárního turbulentního proudění, jelikož částice tekutiny se pohybují nahodile. Díky tomuto neuspořádanému pohybu částic vznikají na teplosměnné ploše pulzace teplot, které jsou zvláště silné u parogenerátorů pracujících s tekutými kovy jako primárním teplonosičem. Tyto pulzy, přenášené do stěny teplosměnné plochy, jsou funkcí tepelného toku, fyzikálních vlastností teplonosiče, druhu proudění atp. Mezi tekutinou a teplosměnnými trubkami však není dokonalý styk. Tyto anomálie způsobují přechodný tepelný odpor, který ovlivňuje charakter pulzace teplot tím, že snižuje jejich amplitudu a frekvenci. V důsledku pulzace teplot v teplosměnné ploše vznikají tepelná pnutí. Ty jsou zvláště nebezpečná, pokud se na povrchu trubek vyskytne trhlinka nebo pokud trubky nemají předepsanou drsnost. Tyto vady způsobují koncentrace napětí vedoucí k porušení celistvosti teplosměnné plochy, což by mohlo mít vážné následky. Proto je nutné tepelná pnutí brát v úvahu při pevnostních výpočtech a zajistit podmínky pro snadnou opravu teplosměnné plochy. Nyní si objasníme procesy probíhající v sekundárním teplonosiči a jejich vliv na teplosměnnou plochu.

Na sekundární straně jsou stěny teplosměnných ploch namáhány tlakem a teplotou. Nebezpečí nastává také ve výparníku, kde jsou stěny navíc zatíženy tepelným namáháním vyvolaným charakterem přestupu tepla při varu vody. Pokud jde o část ekonomisérovou a přehřívákovou, zde nebezpečí nehrozí, jelikož zde máme defakto stálé součinitele přestupu tepla. Jak jsem již naznačil, nejvíce namáhanou částí parogenerátoru je výparník. Je to z důvodu proměnlivého součinitele přestupu tepla, který se mění po délce trubek. Počínaje bublinkovým varem, součinitele roste až po var objemový a následně dochází k prudkému poklesu při blánovém varu. Toto vede k tzv. krizi varu, kdy se parní fáze v chladiivu rozšíří na celou teplosměnnou plochu a vytvoří tenký film se značným tepelným odporem. Hranice, kdy dochází ke krizi varu, je stabilní a pohybuje se v mezích určených geometrickými, hydraulickými a tepelnými poměry v teplosměnných trubkách. Pulzace teplot, v závislosti na výše uvedených podmínkách, ve výparnících parogenerátorů vyhřívaných tekutými kovy mohou dosáhnout 100 – 130 °C.

Snahou konstruktérů je samozřejmě tyto vlivy odstranit. Nejjednodušší řešením je zapojení separátoru páry tak, aby se začala odlučovat kapalná fáze od plynné dřív, než dosáhne blánového varu. Tímto se dá zamezit pulzací teplot vyplývajících z náhlého poklesu součinitele přestupu tepla. Další možnou cestou je zintenzivnění přestupu tepla po dosažení krize varu, tak aby následný pokles nebyl tolik výrazný a tím by snížily tepelné pulzy. Toho lze dosáhnout pomocí speciálních vířičů,

spirálových žeber nebo magnetickou úpravou stěny. Lze se taky vydat opačnou cestou. Tím mám na mysli snížit tepelný tok před dosažením krize varu zvýšením tepelného odporu stěny teplovýměnné plochy. Nutno podotknout, že tyto řešení nejsou úplně běžné, hlavně u starších zařízení. V zásadě tak platí, že při návrhu parogenerátoru musíme, jak jsem již zmínil výše, zabezpečit bezproblémovou opravu teplosměnné plochy. Nyní bychom si mohli objasnit, jak ovlivňují tepelné pulzace životnost parogenerátorů.

Asi nepřekvapí, že tepelné pulzace mají vliv na tepelnou stabilitu materiálu, přičemž se uvádí, že počet vysokoteplotních pulzů se pohybuje řádově kolem  $10^5$  cyklů za životnost teplosměnné plochy. Iniclace únavových trhlinek závisí na charakteru tepelných pulzací, na velikosti a počtu tepelných rázů, na havarijních stavech, na vlastnostech konstrukčního materiálu atd. Hlavním faktorem ovšem zůstává hladina provozních teplot. Analýzy ukázaly, že vysokocyklické teplotní namáhání způsobuje tvorbu mikro a makrotrhlinek již po několika tisících provozních hodin. Když vezmeme v úvahu, že životnost jaderné elektrárny, plánovaná na desítky let, prakticky závisí na životnosti parogenerátoru, je tento problém zcela zásadní. Možností, jak prodloužit životnost je již zmíněné snížení tepelného toku nebo snížení teploty primárního média, což ale vede ke zvětšení teplosměnné plochy. Zvětšení plochy ovšem znamená zvýšení váhy tělesa parogenerátoru a z toho vyplývající důsledky. Při návrhu parogenerátoru je tedy nutné brát v úvahu všechny výše zmíněné okolnosti a zajistit hlavně snadnou opravu porušené oblasti.

Dalším faktorem, který ovlivňuje životnost parogenerátorů je koroze. Ta je opět závislá na mnoha faktorech, které spolu koexistují v danou chvíli. Jedná se např. o rychlost proudění, nečistoty, teplotní gradienty, metalurgické zpracování materiálů nebo také způsob čištění. Uvedme ještě pro pořádek typy konstrukčních materiálů pro parogenerátory. Běžně se používají austenitické oceli třídy 17, vysoce legované austenitické oceli, perlitické, feritické nebo chromolybdenové oceli. Konkrétní výběr konstrukčního materiálu závisí na provozních podmínkách dané elektrárny (použití primární médium atp.). Krom výše zmíněných problémových faktorů, ovlivňující životnost a výběr konstrukčního materiálů, nesmíme opomenout ještě jeden podstatný faktor – čistotu vody.

Čistota napájecí vody je důležitým faktorem, jelikož při vysoké koncentraci iontů kyslíku nebo chlóru pod napětím se projeví tzv. mezikrystalová koroze. Její intenzita roste s rostoucím napětím a působením cyklického namáhání. Zvláště austenitické oceli třídy 17 jsou náchylné na mezikrystalovou korozi, a proto se pomalu přešlo na použití oceli feritických nebo perlitických ocelí třídy 15. Tyto oceli sice odolávají mezikrystalové korozi pod napětím, na druhou stranu však mají nízkou odolnost vůči důlkové korozi a vůči křehnutí vlivem působení vodíku. Vzhledem k uvedeným podmínkám je nutné dbát na čistotu napájecí vody. Udává, že povolená koncentrace chlóru a flóru je 10 ppb, kyslíku pod 5 ppb, železa a mědi

pod 10 ppb a celkový obsah pevných látek nesmí překročit 50 ppb. Hodnota pH by měla oscilovat v rozmezí hodnot 8,8 – 9,2.

#### 4.7.1 Konstrukční a projekční specifikace parogenerátorů [2]

Před navrhováním parogenerátoru je nutné si uvědomit několik věcí. Zejména parametry a charakter primárního teplonosiče, jelikož například pro rektory chlazené sodíkem je nutno použít tří okruhové řešení elektrárny. Dále je nutno znát parametry páry a napájecí vody a v neposlední řadě řešení teplotních dilatací. Ovšem konstrukce a koncepce parogenerátoru je nejvíce závislá na typu použitého reaktoru a jeho chlazení. Připomeňme tedy, že se v současnosti používají pro chlazení reaktorů plyny, voda, organické látky a tekuté kovy.

Velký vliv na koncepční řešení parogenerátoru mají tepelná pnutí, vznikající nedokonalou vzájemnou kompenzací jednotlivých částí. Proto je nutné použít speciální kompenzátory, které mohou být součástí pláště nebo samotné teplosměnné plochy. Parogenerátor lze ovšem také navrhnout tak, aby jeho teplosměnná plocha měla možnost tzv. samokompence. Nejjednodušší řešení tohoto typu jsou klasické trubky ohnuté do „U“. Lze také použít tzv. Fieldovy trubky.

Dalším důležitým faktorem, ovlivňující koncepci parogenerátoru, je vyřešení otázky cirkulace pracovní látky (sekundárního média) ve výparníku. Nejčastěji se setkáváme s tím, že plocha výparníku je zcela zaplavena sekundární vodou a proto přichází v úvahu pouze cirkulace přirozená. Termosifonový efekt způsobuje, že pára stoupá vzhůru, avšak stále obsahuje příliš velký podíl vody. Jelikož vlhkost páry proudící do turbíny nesmí přesáhnout 0,25 %, je nutné vybavit parogenerátor vícestupňovou separací založenou na principu rozdílu hmotností páry a vody.

Kritickou částí, co se spolehlivosti týče, je spojení trubek s trubkovnicí. Příčiny poruch jsou následující: špatná konstrukce spoje, nedostatečná kontrola, nedostatečná ochrana trubkovnice při přechodových stavech, špatné provedení spoje nebo nedostatečné tepelné dilatace. Spolehlivost hodně ovlivňuje nespojitost mezi trubkou a trubkovnicí, proto je vhodné vybrat takové konstrukční řešení, které bude obsahovat lehce svařitelné a kontrolovatelné spoje. Rovněž je potřeba dávat pozor na případný vznik různých štěrbin, který by se mohly stát shromaždištěm nečistot a usazenin způsobujících korozi. Spoj by měl také odolávat tepelnému namáhání a umožňovat tak axiální i radiální dilatace.

Radiální dilatace se nejčastěji řeší vhodným návrhem distančních mříží a axiální dilatace použitím U trubek. V praxi často při navrhování parogenerátoru hledáme kompromis mezi protichůdnými požadavky, jako je dobré rozdělení proudění a zároveň nízká tlaková ztráta. Přičemž musíme brát v úvahu různý charakter provozu např. zanášení teplosměnných ploch, nízké zatížení atp. Proto se doporučuje volit rychlost primárního média na vstupu i výstupu stejnou nebo menší, než rychlost pracovního (sekundárního) teplonosiče. V opačném případě musíme na vstup i

výstup zabudovat speciální elementy zabezpečující rovnoměrné proudění teplotní energie po průřezu. Toto je zvláště důležité u parogenerátorů, které mají vstup primárního média kolmo ke svazku trubek.

Potřebné je také zajistit kvalitní výrobní proces svařování v místě spojení trubek a trubkovnice. Musíme se vyhnout vadám, jako je ostré přechody nebo náhlé změny tvaru, a proto je nutné zajistit maximální kvalitu provedení každého spoje a následné kontroly.

Vážný problém, vyskytující se u parogenerátorů, jsou vibrace trubek. Vibrace jsou způsobeny nárazem proud primárního média na stěny trubek, což způsobuje jejich poruchy. Tento problém se na první pohled dá vyřešit jednoduše instalací nárazových prepážek, které snadno zabraňují vibracím a navíc zmírňují erozi, avšak mohou způsobit vibrace tam, kde se předtím nevyskytovala. Jedná se zejména o oblast volného konce trubek. Je nutno proto dobře zavážit, jaké opatření budou vhodná pro provoz zařízení. Tato antivibrační opatření musíme vždy nejdříve vyzkoušet u modelu parogenerátoru v dostatečném měřítku.

#### **4.7.1.1 Výrobní a provozní specifikace horizontálních parogenerátorů pro VVER [2]**

Jak již jsem dříve zmínil, parogenerátory v elektrárnách typu VVER se nacházely převážně v zemích bývalého Východního bloku. Podmínky pro volbu parogenerátoru byly následující: spolehlivost tepelné charakteristiky, minimální nároky na montáž, možnost dodávky plně smontovaného parogenerátoru, spolehlivost konstrukčních částí a minimální výrobní náklady. Jako nejlepší se jevil horizontální parogenerátor s kruhovými kolektory vody. Proto nepřekvapí, že jej najdeme v obou našich jaderných elektrárnách.

Životnost a provozuschopnost parogenerátorů závisí, krom dříve uvedených faktorů (materiál, tepelné pulzy, čistota vody atp.), také kvalitě samotné výroby parogenerátoru v závislosti na ceně. Jednou z hlavních částí, ovlivňující prostorové ukazatele, je těleso parogenerátoru. Vzhledem ke své velikosti je velmi náchylné na špatnou výrobu a montáž. Velmi důležité je dodržení tolerancí v hrdlech, které ovlivňují montáž svazku trubek teplosměnné plochy. Dále dodržení kruhovitosti jednotlivých částí parogenerátoru, což se ověřuje sestavením tělesa parogenerátoru několikrát během samotné výroby. Neméně důležité je dodržet během výroby potřebnou jakost vnitřního povrchu tělesa parogenerátoru pomocí konzervačních prostředků. Na rozdíl od svislých, mají horizontální parogenerátory svislou trubkovnici – kolektor. Výroba kolektorů je velmi složitá a opět ji ovlivňuje několik zásadních faktorů.

Trubky teplosměnné plochy se do kolektorů zaválcovávají výbuchem, proto jednotlivé otvory musí být vyvrtné v dané minimální rozteči. Pro průměr trubky 12 – 18 mm se udává rozteč 5 mm. Dříve se trubky do kolektorů válcovaly nejdříve mechanicky, až později se přešlo k válcování výbuchem, což vede k urychlení a zefektivnění výrobního procesu. Značnou pozornost si vyžadují také jednotlivé trubky, které musí mít dokonalou povrchovou úpravu a musí být ohýbány na předepsaný poloměr. Dříve se trubky ohýbaly na požadovaný poloměr, ovšem postupně se přešlo na jednotný poloměr ohýbání 100 mm, přestože se trubky musí lámat. Připomeňme ještě, že výhodou horizontálních parogenerátorů je menší rychlost stoupající páry a tím menší parní zatížení hladiny. Uvádí se, že v oblasti vstupního kolektoru může rychlost páry dosáhnout až dvojnásobku střední rychlosti, což negativně ovlivňuje separační schopnosti separátoru páry. Ostatně výhody horizontálních parogenerátorů jsem pospal v dřívějších kapitolách.

## 5. Tepelný výpočet parogenerátoru [4,16,17,18,19,20]

Tepelný výpočet slouží pro určení celkové tepelné bilance parogenerátoru. K výpočtu jsem použil literaturu [4],[16],[17],[18],[19],[20]. Hodnoty tepelných charakteristik a entalpií jsem určil interpolací z tabelovaných hodnot.

### 5.1 Zadané parametry

Tepelný výkon parogenerátoru	$Q_{PG} = 230$	[MWt]
Parní výkon parogenerátoru	$G_{PG} = 452$	[t/hod]
Tlak syté páry	$p_s = 4,6$	[MPa]
Tlak v primárním okruhu	$p_I = 12,25$	[MPa]
Teplota média v I. okruhu na vstupu do PG	$t_{I1} = 297$	[°C]
Teplota média v I. okruhu na výstupu do PG	$t_{I2} = 267$	[°C]

#### **Střední teplota primárního média**

Výpočet této teploty je nutný pro určení tepelných charakteristik.

$$t_{stř} = \frac{t_{I1} + t_{I2}}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.1)$$

$$t_{stř} = \frac{297 + 267}{2} = 282 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

## Charakteristiky primárního média při jeho střední teplotě a při tlaku 12,25 MPa

Hustota	$\rho = 747$	[kg/m <sup>3</sup> ]
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 57,07 \cdot 10^{-2}$	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
Měrný objem	$v = 0,001338$	[m <sup>3</sup> /kg]
Dynamická viskozita	$\eta = 9,73 \cdot 10^{-5}$	[N.s.m <sup>-2</sup> ]
Kinematická viskozita	$\nu = 0,1308 \cdot 10^{-6}$	[m <sup>2</sup> /s]
Prandtlovo kritérium	$Pr = 0,906$	[-]

### Entalpie primárního média

Entalpie I. média na vstupu do PG	$i_{I1} = 1681,23$	[kJ/kg]
Entalpie I. media na výstupu z PG	$i_{I2} = 1344$	[kJ/kg]

### Entalpie sekundárního média

Entalpie syté kapaliny	$i' = 1134,45$	[kJ/kg]
Entalpie syté páry	$i'' = 2796,07$	[kJ/kg]
Entalpie napájecí vody	$i_{NV} = 1015,08$	[kJ/kg]

## 5.2 Počet teplosměnných trubek a celková průtočná plocha PG

Pro materiál trubek volím trubky  $\varnothing 16 \times 1,5$  mm vyrobené z materiálu 08Ch18N10T.

### Zvolené parametry

Vnitřní průměr trubky  $d_1 = 13$  [mm]

Vnější průměr trubek  $d_2 = 16$  [mm]

Střední rychlost proudění I. media  $w_v = 1,53$  [m/s]

### Hmotnostní tok primárního média

$$\dot{m}_I = \frac{Q_{PG}}{(i_{I1} - i_{I2}) \cdot \eta_{PG}} \text{ [kg/s]} \quad (5.2)$$

$$\dot{m}_I = \frac{230 \cdot 10^6}{(1681,23 - 1344) \cdot 0,98} = 695,946 \text{ [kg/s]}$$

$\eta_{PG}$  – účinnost parogenerátoru [-]

### Celková teoretická průtočná plocha

$$S = \frac{\dot{m}_I}{w_v \cdot \rho} \text{ [m}^2\text{]} \quad (5.3)$$

$$S = \frac{695,946}{1,53.747} = 0,61 \text{ [m}^2\text{]}$$

### Průtočná plocha jedné trubky

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \text{ [m}^2\text{]} \quad (5.4)$$

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,013^2}{4} = 1,327 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$$

### Teoretický počet trubek

$$n = \frac{S}{S_{tr}} \text{ [-]} \quad (5.5)$$

$$n = \frac{0,61}{1,327 \cdot 10^{-4}} = 4597 \text{ [-]}$$

### Skutečný počet trubek

S ohledem na zaslepování trubek během provozu parogenerátoru, zvyšují počet trubek o 20%.

$$n_{tr} = n \cdot 1,2 \text{ [-]} \quad (5.6)$$

$$n_{tr} = 4597 \cdot 1,2 = 5516 \text{ [-]}$$



### **Celková skutečná průtočná plocha**

$$S_C = S_{tr} \cdot n_{tr} \quad [m^2] \quad (5.7)$$

$$S_C = 1,327 \cdot 10^{-4} \cdot 5516 = 0,732 \quad [m^2]$$

### **Skutečná rychlost proudění I. média**

$$w = \frac{\dot{m}_I}{S_C \cdot \rho} \quad [m/s] \quad (5.8)$$

$$w = \frac{695,946}{0,732 \cdot 747} = 1,27 \quad [m/s]$$

## **5.3 Výpočet součinitele přestupu tepla mezi I. médiem a stěnou trubky**

Před samotným výpočtem nejdříve určíme Reynoldsovo číslo, které nám určuje, zda-li je proudění laminární ( $Re < 2320$ ) nebo turbulentní ( $Re > 2320$ ). Slouží také pro výběr Nusseltova kritéria, potřebného pro výpočet součinitele tepla.

### **Reynoldsovo číslo**

$$Re = \frac{w \cdot d_1}{\nu} \quad [-] \quad (5.9)$$

$$Re = \frac{1,27 \cdot 0,013}{0,1308 \cdot 10^{-6}} = 126223 \quad [-]$$

Z výpočtu je patrné, že proudění je jasně turbulentní.

### **Teoretická střední teplota stěny trubky**

$$t_{trs} = \frac{t_{stř} + t_s}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (5.10)$$

$$t_{trs} = \frac{282 + 259,9}{2} = 270,95 \quad [^{\circ}C]$$

$t_s$  [ $^{\circ}C$ ] – teplota syté páry při tlaku 4,6 MPa

### Nusseltovo kritérium

Pro výpočet Nusseltova kritéria využijeme kromě již zmíněného Reynoldsova čísla také Prandtlovo kritérium, určené v závislosti na středních teplotách stěny trubky a I. média.

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{tr}}\right)^{0,25} \quad [-] \quad (5.11)$$

$$Nu = 0,021 \cdot 126223^{0,8} \cdot 0,906^{0,43} \cdot \left(\frac{0,906}{0,882}\right)^{0,25} = 244,12 \quad [-]$$

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

$$t_{stř} = 282 \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad Pr = 0,906 \quad [-]$$

Pr<sub>tr</sub> [-] - Prandtlovo kritérium pro střední teplotu stěny trubky

$$t_{trs} = 270,95 \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad Pr = 0,882 \quad [-]$$

### Součinitel přestupu tepla mezi I. médiem a stěnou trubky

$$\alpha_1 = Nu \cdot \frac{\lambda}{d_1} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.12)$$

$$\alpha_1 = 244,12 \cdot \frac{57,07 \cdot 10^{-2}}{0,013} = 10717 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

## 5.4 Součinitel přestupu tepla mezi stěnou trubky a parovodní směsí

Pro výpočet součinitele přestupu tepla na straně II. média potřebujeme znát hustotu tepelného toku, který nejprve zvolíme a posléze provedeme zpětnou kontrolu tak, aby námi zvolená hustota tepelného toku byla v požadované toleranci. Až nám odchylka klesne pod 1%, dosáhneme požadované přesnosti.

### Volba hustoty tepelného toku

Postupnou iterací jsem zvolil tuto hustotu tepelného toku.

$$q_v = 70000 \quad [W \cdot m^{-2}]$$

### Součinitel přestupu tepla

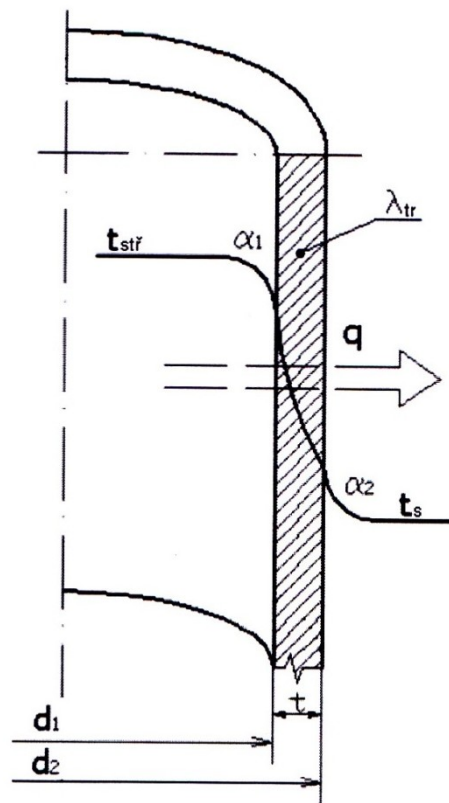
$$\alpha_2 = \frac{10,45}{3,3 - 0,00113 \cdot (T - 373)} \cdot q_v^{0,7} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.13)$$

$$\alpha_2 = \frac{10,45}{3,3 - 0,00113 \cdot (533,02 - 373)} \cdot 70000^{0,7} = 17261,6 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

T [K] – teplota syté páry při daném tlaku  $p_s = 4,6$  MPa

### 5.5 Součinitel prostupu tepla

Prostup tepla probíhá nejdříve konvekcí na vnitřní straně, kondukcí ve stěně trubky a konvekcí na vnější straně trubky.



Obr.5.1 Prostup tepla stěnou [21]

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{2 \cdot \lambda_{tr}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_1}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.14)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{10717} \cdot \frac{0,016}{0,013} + \frac{0,016}{2 \cdot 18,69} \cdot \ln \frac{0,016}{0,013} + \frac{1}{17261,6}} = 3821,8 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$\lambda_{tr}$  [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ] - součinitel tepelné vodivosti materiálu trubky pro materiál 08Ch18N10T -  $\lambda_{tr} = 18,69$  [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

### **Střední logaritmická teplota**

#### **Teplotní rozdíl mezi primárním a sekundárním médiem na vstupu do PG**

$$\Delta t_1 = t_{i1} - t_s \quad [^{\circ}C] \quad (5.15)$$

$$\Delta t_1 = 297 - 259,9 = 37,1 \quad [^{\circ}C]$$

#### **Teplotní rozdíl mezi primárním a sekundárním médiem na výstupu z PG**

$$\Delta t_2 = t_{i2} - t_s \quad [^{\circ}C] \quad (5.16)$$

$$\Delta t_2 = 267 - 259,9 = 7,1 \quad [^{\circ}C]$$

### **Střední logaritmický teplotní spád**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad [^{\circ}C] \quad (5.17)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{37,1 - 7,1}{\ln \frac{37,1}{7,1}} = 18,14 \quad [^{\circ}C]$$

### **Zpětná kontrola tepelného toku**

Nyní si ověříme, zda dříve navržená hustota tepelného toku odpovídá toleranci. Nejdříve si spočítáme tepelný tok:

$$q = k \cdot \Delta t_{ln} \quad [W/m^2] \quad (5.18)$$

$$q = 3821,8 \cdot 18,14 = 69327,45 \quad [W/m^2]$$

### Zjištění odchylky tepelného toku

$$\Delta q = \left| \frac{q_v - q}{q} \right| \cdot 100 \text{ [%]} \quad (5.19)$$

$$\Delta q = \left| \frac{70000 - 69327}{69327} \right| \cdot 100 = 0,9 \text{ [%]}$$

Odchylka je menší, než 1%, což je povolená tolerance.

### Kontrola navržené teploty stěny

#### Teplo sdělené 1m stěny trubky

$$q_l = q \cdot d_2 \cdot \pi \text{ [W/m]} \quad (5.20)$$

$$q_l = 69327 \cdot 0,016 \cdot \pi = 3481,15 \text{ [W/m]}$$

#### Povrchová teplota stěny trubky na straně primárního média

$$t_{trI} = t_{stř} - \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.21)$$

$$t_{trI} = 282 - \frac{3484,75}{\pi} \cdot \frac{1}{10717,0,013} = 274 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

#### Povrchová teplota stěny trubky na straně sekundárního média

$$t_{trII} = t_{stř} + \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.22)$$

$$t_{trII} = 282 + \frac{3484,75}{\pi} \cdot \frac{1}{10717,0,016} = 263,9 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

#### Střední teplota stěny trubky

$$t_{trS} = \frac{t_{trI} + t_{trII}}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.23)$$

$$t_{trS} = \frac{274 + 263,9}{2} = 268,95 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### Relativní chyba volené hodnoty střední teploty stěny trubky

$$\Delta t_{trRel} = \left| \frac{t_{trs} - t_{trS}}{t_{trS}} \right| \cdot 100 \text{ [%]} \quad (5.24)$$

$$\Delta t_{trRel} = \left| \frac{270,95 - 268,95}{268,95} \right| \cdot 100 = 0,7 \text{ [%]}$$

Odchylka leží v povolené toleranci.

## 5.6 Výpočet teplosměnné plochy a střední délky trubek

### Celková teplosměnná plocha

$$S_C = \frac{Q_{PG}}{q} \text{ [m}^2\text{]} \quad (5.25)$$

$$S_C = \frac{230 \cdot 10^6}{69327,45} = 3317,6 \text{ [m}^2\text{]}$$

### Celková délka trubek parního generátoru

$$L = \frac{S_C}{\pi \cdot d_2} \text{ [m]} \quad (5.26)$$

$$L = \frac{3317,6}{\pi \cdot 0,016} = 66002 \text{ [m]}$$

### Střední délka trubky

$$L_{tr} = \frac{L}{n_{tr}} \text{ [m]} \quad (5.27)$$

$$L_{tr} = \frac{66002}{4597} = 14,36 \text{ [m]}$$

## 5.7 Parní a tepelný výkon parogenerátoru

### Výparné teplo

$$l_v = i'' - i' \text{ [kJ/kg]} \quad (5.28)$$

$$l_v = 2796,07 - 1134,45 = 1661,62 \text{ [kJ/kg]}$$

### Parní výkon parogenerátoru při teplotě napájecí vody 220°C

$$G = \frac{Q_{PG}}{l_v + 1,01 \cdot (i' - i_{NV})} \quad [kg/s] \quad (5.29)$$

$$G = \frac{230 \cdot 10^3}{1661,62 + 1,01 \cdot (1134,45 - 1015,08)} = 129,1 [kg/s]$$

### Kontrola vypočteného parního výkonu vzhledem k zadanému

$$\Delta G_{PG} = \left| \frac{G_{PG} - G}{G} \right| \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.30)$$

$$\Delta G_{PG} = \left| \frac{125,56 - 129,1}{129,1} \right| \cdot 100 = 2,7 \quad [\%]$$

Odchylka je v povolné toleranci

### Vypočítaný tepelný výkon

$$Q_{PGv} = G \cdot (i' - i_{NV}) \quad [kW] \quad (5.31)$$

$$Q_{PGv} = 129,1 \cdot (2796,07 - 1015,08) = 229925,809 \quad [kW]$$

### Kontrola vypočteného tepelného výkonu vzhledem k zadanému

$$\Delta G_{PGrel} = \left| \frac{Q_{PG} - Q_{PGv}}{Q_{PGv}} \right| \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.32)$$

$$\Delta G_{PGrel} = \left| \frac{230 \cdot 10^3 - 229925,809}{229925,809} \right| \cdot 100 = 0,03 \quad [\%]$$

Odchylka mezi vypočteným a zadaným tepelným výkonem leží v povolené toleranci.

## 6. Hydraulický výpočet [1,15]

Při proudění média parogenerátorem dochází k hydrodynamickým ztrátám, kterou jsou závislé na mnoha aspektech jako je geometrická charakteristika kanálů, konstrukce a vlastnosti primárního média.

Při proudění v dlouhém potrubí dochází k ztrátám, způsobených třením tekutiny a o stěny potrubí. Dále dochází k tzv. místním ztrátám při změně směru nebo rychlosti proudění tekutiny. Výpočet celkových ztrát je důležitý pro návrh příkonu cirkulačních čerpadel. Pro výpočet jsem použil lit. [1],[15].

### Vlastnosti média pro hydraulický výpočet

Hmotnostní tok primárního média	$\dot{m}_1 = 695,946$	[kg/s]
Hustota média	$\rho_p = 714,5$	[kg/m <sup>3</sup> ]
Teplota na vstupu do PG	$t = 297$	[°C]
Vnitřní průměr přívaděcího potrubí	$d_p = 0,427$	[m]
Vnitřní průměr přívaděcího kolektoru	$d_k = 0,6$	[m]
Délka přívaděcího kolektoru	$L_k = 1,6$	[m]
Průtoční plocha teplosměnných trubek	$S_c = 0,732$	[m <sup>2</sup> ]

### Střední rychlost proudění média pro přívodové potrubí

$$w_p = \frac{\dot{m}_1}{\pi \cdot \frac{d_p^2}{4} \cdot \rho_p} \quad [m/s] \quad (6.1)$$

$$w_p = \frac{695,946}{\pi \cdot \frac{0,427^2}{4} \cdot 714,5} = 6,8 \quad [m/s]$$

### Ztrátový součinitel pro přívaděcí kolektor

$$\xi_{k1} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{d_p^2}{d_k^2}\right) \quad [-] \quad (6.2)$$

$$\xi_{k1} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{0,427^2}{0,6^2}\right) = 0,246 \quad [-]$$



## 6.1 Tlaková ztráta v příváděcím potrubí

Ztráta tlaku je následek změny průřezu potrubí.

$$p_{z1} = \xi_{k1} \cdot \frac{w_p^2}{2} \cdot \rho_p \quad [Pa] \quad (6.3)$$

$$p_{z1} = 0,246 \cdot \frac{6,8^2}{2} \cdot 714,5 = 4063,73 \quad [Pa]$$

### Střední rychlost proudění pro příváděcí část kolektoru

$$w_k = \frac{\dot{m}_1}{\pi \cdot \frac{d_k^2}{4} \cdot \rho_p} \quad [m/s] \quad (6.4)$$

$$w_k = \frac{695,946}{\pi \cdot \frac{0,6^2}{4} \cdot 714,5} = 3,445 \quad [m/s]$$

### Součinitel ztrát pro příváděcí část kolektoru

$$\xi_{k2} = 0,8 - 0,015 \cdot \frac{L_k}{d_k} \quad [-] \quad (6.5)$$

$$\xi_{k2} = 0,8 - 0,015 \cdot \frac{1,6}{0,6} = 0,76 \quad [-]$$

## 6.2 Tlaková ztráta pro příváděcí část kolektoru

$$p_{z2} = \xi_{k2} \cdot \frac{w_k^2}{2} \cdot \rho_p \quad [Pa] \quad (6.6)$$

$$p_{z2} = 0,76 \cdot \frac{3,445^2}{2} \cdot 714,5 = 3222,29 \quad [Pa]$$

### Střední rychlost média vstupující do střední řady trubek

$$w_{st} = \frac{\dot{m}_1}{S_c \cdot \rho_p} \quad [m/s] \quad (6.7)$$

$$w_{st} = \frac{695,946}{0,732 \cdot 714,5} = 1,33 \quad [m/s]$$

### Součinitel ztrát pro střední řadu trubek

$$\xi_{k3} = 0,5 [-]$$

### 6.3 Tlaková ztráta pro střední řadu trubek

$$p_{z3} = \xi_{k3} \cdot \frac{w_{st}^2}{2} \cdot \rho_p [Pa] \quad (6.8)$$

$$p_{z3} = 0,5 \cdot \frac{1,33}{2} \cdot 714,5 = 315,97 [Pa]$$

### Parametry pro výpočet tlakové ztráty střední řady trubek

Reynoldsovo číslo	Re = 126233	[-]
Střední délka trubek	L <sub>tr</sub> = 14,36	[m]
Střední teplota I. media	t <sub>stř</sub> = 282	[°C]
Hustota I. média při střední teplotě	ρ = 747	[kg/m <sup>3</sup> ]
Střední rychlost I. media	w <sub>v</sub> = 1,27	[m/s]
Vnitřní průměr trubek	d <sub>1</sub> = 0,013	[m]

### Součinitel tření při turbulentním proudění

$$\lambda = 0,0056 + 0,05 \cdot (Re)^{-0,32} [-] \quad (6.9)$$

$$\lambda = 0,0056 + 0,05 \cdot (126233)^{-0,32} = 5,6 \cdot 10^{-3} [-]$$

### 6.4 Tlaková ztráta teplosměnných trubek při turbulentním proudění

$$p_{z4} = \lambda \cdot \frac{L_{tr}}{d_1} \cdot \frac{w_v^2}{2} \cdot \rho [Pa] \quad (6.10)$$

$$p_{z4} = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{14,36}{0,013} \cdot \frac{1,27^2}{2} \cdot 747 = 3726,47 [Pa]$$

### Ztrátové koeficienty změnou směru o 180°

$$L = f \left( \frac{r}{d_1} \right) = 0,03$$

$$Q = 1,4$$

$$R = 1$$

$$\xi_{k4} = L \cdot Q \cdot R \quad [Pa]$$

$$\xi_{k4} = 0,03 \cdot 1,4 \cdot 1 = 0,042 \quad [Pa] \quad (6.11)$$

### 6.5 Tlaková ztráta změnou směru o 180°

$$p_{z5} = \xi_{k4} \cdot \frac{w_v^2}{2} \cdot \rho \quad [Pa] \quad (6.12)$$

$$p_{z5} = 0,042 \cdot \frac{1,27^2}{2} \cdot 747 = 25,3 \quad [Pa]$$

### Tlaková ztráta změnou směru o 180°

Teplota média na výstupu z PG  $t_1 = 267 \quad [^{\circ}C]$

Hustota při dané teplotě  $\rho_{vy} = 722,8 \quad [kg/m^3]$

### Výstupní střední rychlost ze střední řady trubek

$$w_{stvy} = \frac{\dot{m}_1}{S_c \cdot \rho_{vy}} \quad [m/s] \quad (6.13)$$

$$w_{stvy} = \frac{695,946}{0,732 \cdot 722,8} = 1,23 \quad [m/s]$$

### Ztrátový součinitel

$$\xi_{k5} = 1 \quad [-]$$

## 6.6 Tlaková ztráta na výstupu z teplosměnných trubek

$$p_{z6} = \xi_{k5} \cdot \frac{w_{stvy}^2}{2} \cdot \rho \quad [Pa] \quad (6.14)$$

$$p_{z6} = 1 \cdot \frac{1,23^2}{2} \cdot 772,8 = 584,6 \quad [Pa]$$

### Tlaková ztráta na výstupu

Vnitřní průměr kolektoru  $d_{k1} = 0,6 \quad [m]$

Délka kolektoru  $L_{k1} = 1,6 \quad [m]$

Vnitřní průměr odvodového potrubí  $d_{od} = 0,427 \quad [m]$

### Střední rychlost ve vystupující části kolektoru

$$w_{k1} = \frac{\dot{m}_1}{\pi \cdot \frac{d_k^2}{4} \cdot \rho_{vy}} \quad [m/s] \quad (6.15)$$

$$w_{k1} = \frac{695,946}{\pi \cdot \frac{0,6^2}{4} \cdot 772,8} = 3,18 \quad [m/s]$$

### Ztrátový součinitel ve vystupující části kolektoru

$$\xi_{k6} = 2,5 - 0,025 \cdot \frac{L_{k1}}{d_k} \quad [-] \quad (6.16)$$

$$\xi_{k6} = 2,5 - 0,025 \cdot \frac{1,6}{0,6} = 2,43 \quad [-]$$

## 6.7 Tlaková ztráta ve výstupní části kolektoru

$$p_{z7} = \xi_{k6} \cdot \frac{w_{k1}^2}{2} \cdot \rho_{vy} \quad [Pa] \quad (6.17)$$

$$p_{z7} = 2,43 \cdot \frac{3,18^2}{2} \cdot 772,8 = 9495,06 \quad [Pa]$$

### **Střední rychlost proudění média ve výstupním potrubí**

$$w_{od} = \frac{\dot{m}_1}{\pi \cdot \frac{d_{od}^2}{4} \cdot \rho_{vy}} \quad [m/s] \quad (6.18)$$

$$w_{od} = \frac{695,946}{\pi \cdot \frac{0,427^2}{4} \cdot 772,8} = 6,29 \quad [m/s]$$

### **Ztrátový součinitel ve výstupním potrubí**

$$\xi_{k7} = \left(1 - \frac{d_{od}^2}{d_{k1}^2}\right)^2 \quad [-] \quad (6.19)$$

$$\xi_{k7} = \left(1 - \frac{0,427^2}{0,6^2}\right)^2 = 0,244 \quad [-]$$

### **6.8 Tlaková ztráta v odváděcím potrubí**

$$p_{z8} = \xi_{k7} \cdot \frac{w_{od}^2}{2} \cdot \rho_{vy} \quad [Pa] \quad (6.20)$$

$$p_{z8} = 0,244 \cdot \frac{6,29^2}{2} \cdot 772,8 = 3730,17 \quad [Pa]$$

### **6.9 Celková tlaková ztráta**

$$p_{zc} = p_{z1} + p_{z2} + p_{z3} + p_{z4} + p_{z5} + p_{z6} + p_{z7} + p_{z8} \quad [Pa] \quad (6.21)$$

$$p_{zc} = 4063,73 + 3222,29 + 315,97 + 3726,47 + 25,3 + 584,6 \\ + 9495,06 + 3730,17 = 25163,59 \quad [Pa]$$

Z výpočtu vyplývá, že k největší tlakové ztrátě dochází ve výstupní části kolektoru. Nutno podotknout, že výsledky výpočtu jsou pouze orientační z důvodu zjednodušeného hydraulického výpočtu.

## 7. Závěr

Bakalářská práce se zabývá koncepcí parogenerátorů v jaderných elektrárnách s tlakovodními reaktory. V úvodu jsem popsal současný stav energetické koncepce ve světě a možný budoucí vývoj. Následně jsem popsal princip fungování jaderné elektrárny včetně popisu některých základních částí. U reaktorů jsem navíc uvedl jejich historický vývoj, včetně koncepce různých druhů v současnosti používaných v jaderné energetice a nastínil jsem budoucí trend vývoje. Hlavní pozornost jsem v teoretické části práce věnoval samotné koncepci parogenerátorů v elektrárnách s tlakovodními reaktory ve světě i u nás. Porovnal jsem dva hlavní typy a uvedl projekční a provozní specifikace, včetně charakteristiky procesů, probíhajících v parogenerátorech.

Ve výpočtové části jsem provedl zjednodušený tepelný výpočet. Hodnoty pro návrh parogenerátoru byly zadané mým vedoucí bakalářské práce. Výsledky jsou následující: v parogenerátoru o tepelném výkonu 230 MW proudí v primárním okruhu 695,946 kg vody za sekundu rychlostí 1,27 m/s. Parogenerátor má celkem 5516 teplosměnných trubek, o střední délce 14,36 m, vyrobených z oceli 08Ch18N10T, které tvoří celkovou průtočnou plochu o hodnotě 0,732 m<sup>2</sup>. Součinitel prostupu tepla v trubkách parogenerátoru má hodnotu 3821,8 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>, přičemž trubky tvoří teplosměnnou plochu s celkovým povrchem 3317,6 m<sup>2</sup>. Parogenerátor vyrobí celkem 461,76 tun páry za hodinu. Pro informaci dodojme, že se jedná o parogenerátor jaderné elektrárny malého výkonu. Při dvouokruhovém uspořádání může dávat 100 MWe a až 150 MW v teple.

Hydraulickým výpočtem jsem určil velikosti místních a třecích ztrát, které vznikají z důvodu působení hydrodynamických dějů v trubkách parogenerátoru. Jako první ztrátový prvek jsem zvolil přívodní a jako poslední prvek výstupní potrubí kolektoru. Celková hydraulická ztráta má hodnotu 25163,54 Pa, přičemž k největší tlakové ztrátě dochází ve výstupní části kolektoru. Je však nutné brát v potaz, že jde o zjednodušený výpočet pro orientační účely.

Má práce může sloužit jako obecný podklad pro návrh horizontálního parogenerátoru se svislými kolektory primární vody. Krom výhod horizontálních provedení, které jsem zmínil v kapitole 4.5, jsem se rozhodl doporučit tento typ také proto, že české firmy mají s výrobou těchto parogenerátorů dlouhodobé zkušenosti. Jako příklad uvedu Vítkovice Power Engineering, která dodává součástky pro zahraniční firmy jako Areva nebo Westinghouse. Krom toho také Vítkovice vyrobily parogenerátory pro Dukovany (VVER 440) i Temelín (VVER 1000). V souvislosti s budoucím trendem stavby malých a středních jaderných elektráren, považuji výrobu u nás za perspektivní, jelikož můžeme využít poznatky z výroby parogenerátorů reaktorů typu VVER 440, které do této kategorie spadají.

## Poděkování

Touto formou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, panu prof. Ing. Pavlovi Kolatovi, DrSc., za odborné vedení, připomínky a rady, které mi poskytl během psaní mé práce.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren díl 2*. ČVUT Praha, 2005. 211s. ISBN 80-01-03189-6
- [2] RAJČOK, Matúš, BÖHMER, Branislav. *Stroje a zariadenia JE*. EF SVTŠ Bratislava, 1978, 199s, ÚŠP RVT P – 09 -125 – 201/08
- [3] KOLAT, Pavel. *Úvod do jaderné energetiky*. Skripta Fakulty strojní VŠB – TU v Ostravě, 2012, 178s
- [4] KADLEC, Zdeněk. *TERMOMECHANIKA : návody do cvičení*. Skripta Fakulty strojní VŠB – TU v Ostravě, 2012, 101s, ISBN 978-80-248-1736-1
- [5] Encyklopedie energie. [online]. [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: [http://www.energyweb.cz/web/index.php?display\\_page=2&subitem=2&sl\\_mode=hrch&slovník\\_page=candu.html](http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=2&sl_mode=hrch&slovník_page=candu.html)
- [6] Jaderná energie. [online]. [cit. 2014-15-04]. Dostupné z: <http://www.jaderna-energie.cz/jaderny-reaktor-typy.htm>
- [7] MOTYČKA, Vojtěch a Martin ČERMÁK. *Jaderné informace: Jaderné elektrárny*. [online]. [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://jaderneinfo.webnode.cz/jaderna-elektrarny/>
- [8] ÚSTAV ENERGETIKY, Fakulta strojní ČVUT Praha. *Jaderné systémy I & Jaderné reaktory a parogenerátory*. [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: [http://energetika.cvut.cz/files/JS1\\_JR\\_prednasky\\_3.cast%20-%20komponenty%20a%20systemy.pdf](http://energetika.cvut.cz/files/JS1_JR_prednasky_3.cast%20-%20komponenty%20a%20systemy.pdf)
- [9] Jaderná energetika: Miniencyklopedie. [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: [http://www.cez.cz/edee/content/miniencyklopedie/1\\_miniencyklopedie\\_jaderna\\_energetika/cs/index.html#db4a01431](http://www.cez.cz/edee/content/miniencyklopedie/1_miniencyklopedie_jaderna_energetika/cs/index.html#db4a01431)
- [10] ÚSTAV ENERGETIKY, Fakulta strojní ČVUT Praha. *Jaderné systémy I: Základní pojmy*. [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/files/JS1%20-%201.%20prednaska%20-%20uvod.pdf>
- [11] BRABEC, Petr a Filip BARTŮNĚK. *Fyzika 007: Jaderný reaktor, jaderná elektrárna*. [online]. [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/fyzika-mikrosveta/jaderny-reaktor-jaderna-elektrarna>



- [12] ROUPEC, Petr. *ANALÝZA PESTUPU TEPLA V PAROGENERÁTORECH BLOKŮ VVER 440*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Hugo Šen. [online]. [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=27387](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27387)
- [13] Special Metals: The Alloy Expert. [online]. [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.specialmetals.com/documents/Incoloy%20alloys%20800H%20800HT.pdf>
- [14] Temelín: Hlavní technické údaje. [online]. [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elekriny/jaderna-energetika/jaderne-elekrarny-cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/2.html>
- [15] HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren díl 1*. ČVUT Praha, 2005. 166s. ISBN 80-01-03190-X
- [16] KOLAT, Pavel. *Přenos tepla a hmoty*. VŠB-TUOstrava, 1986. 266s
- [17] Materiály poskytnuté panem prof. Ing. Pavlem Kolatem, DrSc.
- [18] BLAHOŽ, Vladimír a Zdeněk KADLEC. *SDRUŽENÍ POŽÁRNÍHO A BEZPEČNOSTNÍHO INŽENÝRSTVÍ V OSTRAVĚ. Základy sdílení tepla*. 2. vyd. Ostrava: Tiskárna Kleinwächter Frýdek - Místek, 2000. ISBN 80-902001-1-7.
- [19] VÍT, Tomáš. *Základy přenosu tepla a hmoty I: přenos hybnosti tepla - výměníky tepla*. 1998.
- [20] VÍT, Tomáš. *Základy přenosu tepla a hmoty II: Konvektivní přenos tepla*. 1998.
- [21] NEVŘELA, Petr. *Parní generátory svislé v jaderných elektrárnách*. Ostrava, 2010. Dostupné z: <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/81394>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní. Vedoucí práce Pavel Kolat.
- [22] VĚTROVEC, Vladislav. Blog.iDNES.cz: Plovoucí jaderné elektrárny. [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://vetrovec.blog.idnes.cz/c/323759/Plovouci-jaderne-elekrarny.html>
- [23] ČAPEK, Michal. Malá jaderná elektrárna: Malý jaderný reaktor. [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://michalcapekatvz.blogspot.cz/2013/03/maly-jaderny-reaktor.html>

- [24] HNBYZNYS: Český Lumius plánuje vlastní jadernou elektrárnu s kapesním reaktorem. V podzemí. [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://byznys.ihned.cz/c1-59783250-mala-jaderna-elektrarna-reaktor-lumius>
- [25] Parlamentní listy: Malé jaderné elektrárny – budoucnost moderní energetiky?. [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.parlamentnilisty.cz/zpravy/tiskovezpravy/Male-jaderne-elektrarny-budoucnost-moderni-energetiky-279508>
- [26] E15.cz: Po světě rostou malé jaderné elektrárny, Česko na své zatím čeká. [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://zpravy.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/po-svete-rostou-male-jaderne-elektrarny-cesko-na-sve-zatim-ceka-1007813>
- [27] ČEZ: Malé jaderné reaktory prý mohou snadno nahradit dosluhující tepelné elektrárny. [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyzkum-a-vzdelavani/veda-a-vyzkum/zpravy-ze-sveta-vyzkumu-a-vyvoje/14.html>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Jaderné elektrárny ve světě [3].....	13
Obr. 2.2 Uspořádání I. a II. okruhu PWR [3].....	14
Obr. 2.3 Primární okruh JE [10].....	15
Obr. 2.4 Reaktor zařízení s PWR [9].....	16
Obr. 2.5 Generace v jaderné energetice [3].....	20
Obr. 2.6 Schéma kompenzátoru objemu [8].....	21
Obr. 2.7 Uspořádání jaderné elektrárny Akademik Lomosov [22].....	22
Obr. 3.1 Povrchový rekuperační výměník [1].....	23
Obr. 3.2 tělesový výměník s plovoucí hlavou [1].....	24
Obr. 3.3 Výměník s U-trubkami [1].....	24
Obr. 3.4 Výměník s trubkami [1].....	25
Obr. 3.5 Tělesový výměník s Fieldovými trubkami [1].....	25
Obr. 3.6 Tělesový výměník se šroubovitě vinutými trubkami [1].....	25
Obr. 3.7 Tělesový výměník s trubkovými hady [1].....	25
Obr. 4.1 Schéma parogenerátoru [2].....	26
Obr. 4.2 Schéma dvouokruhové jaderné elektrárny [11].....	27
Obr. 4.5 Utěsnění horní části kolektoru primární vody [1].....	33
Obr. 4.6 Parogenerátor typu VVER 440 [1].....	34
Obr. 4.7 Podélný řez PG VVER 1000 [15].....	35
Obr. 4.8 Podélný řez PG VVER 1000 [1].....	36
Obr. 4.9 VVER 1000 příčný řez [1].....	37
Obr. 4.10 Parogenerátor elektrárny Biblis A [1].....	39
Obr. 4.11 Parogenerátor s vyztuženou trubkovnicí [1].....	40
Obr. 4.12 Parogenerátor se svislým kolektorem vody [1].....	41
Obr. 4.13 Parogenerátor s mírným přehřevem páry [1].....	42
Obr. 4.14 Parogenerátor Trepaud s přímými, mírně vlnitými trubkami [1].....	43
Obr. 4.16 Parogenerátor s nuceným oběhem sekundární vody [1].....	47
Obr. 4.17 Průtočný parní generátor s primárním teplonosičem plynem [1].....	48
Obr. 5.1 Prostup tepla stěnou [21].....	59

## SEZNAM DIAGRAMŮ

Obr. 4.3 Rankin-Clausiusův cyklus s nasycenou a přehřátou párou [2].....	28
Obr. 4.4 t-P diagram parogenerátoru PWR [1].....	31
Obr. 4.15 h-s diagram [1].....	45

## PŘÍLOHY

**Příloha č.1 – Chemické složení slitiny INCOLOY 800 [13]**

Prvek	Složení [%]
Nikl	30 -35
Chrom	19 – 23
Železo	39.5 min.
Uhlík	0.1 max.
Hliník	0.15 -0.6
Titan	0.15 -0.6
Hliník + Titan	0.3-1.2

**Příloha č. 2 – Technický popis a parametry PG VVER 440 [12]**

Parametr	Jednotka	Hodnota
Rozměry: délka tělesa	mm	11 800
Vnitřní průměr	mm	3210
Hmotnost: prázdného	kg	169000
Zcela zaplněného	kg	216000
Teplosměnná plocha výrobní	m <sup>2</sup>	2620,73
Teplosměnná plocha výpočtová	m <sup>2</sup>	2227,62
Rezerva pro zateplení	%	15
Jmenovitý výkon	t <sub>páry</sub> /hod	452
Vlhkost páry	%	0,25
Vstupní teploty primárního média	°C	297 ± 2 (při 100% výkonu)
Výstupní teplota primárního media	°C	267 ± 2
Vstupní teplota sekundárního media	°C	164 ÷ 223
Min. povolená vstupní teplota sek. media	°C	155 (max. 50x za rok)
Výstupní teplota syté páry	°C	260
Provozní tlak I.O	MPa	12,26
Tlak při těsnostní zkoušce I.O. (ZT)	MPa	13,72
Tlak při pevnostní tlakové zkoušce I.O. (TZ)	MPa	16,34 (výdrž tlaku 20 min.)
Tlak při těsnostní zkoušce II.O. (ZT)	MPa	5,49
Tlak při pevnostní tlakové zkoušce (TZ)	MPa	7,65
Jmenovitý tlak syté páry	MPa	4,7
Průtok chladiva	kg/s	1524,67
Průtočný průřez svazku trubek v 1 PG	m <sup>2</sup>	0,7576

**Příloha č.3 – Technické parametry parogenerátoru reaktoru VVER 1000**  
**[14]**

<b>Parametr</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Hodnota</b>
Počet na blok	ks	4
Vstupní/výstupní teplota na I. straně	°C	320/290
Vstupní/ výstupní teplota na II. straně	°C	220/278,5
Tlak páry	MPa	6,3
Množství vyrobené páry	t/hod	1470
Objem primární/sekundární strany	m <sup>3</sup>	21/66
Průměr tělesa parogenerátoru	m	4,1
Maximální délka parogenerátoru	m	14,8
Hmotnost parogenerátoru	t	416