



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

PAROGENERÁTORY TLAKOVODNÍCH REAKTORŮ

STEAM GENERATORS OF PWR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN MICHALICA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LADISLAV SUK

BRNO 2015

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá popisem jednotlivých konstrukčních řešení parogenerátorů. V první části bakalářské práce je popsán počátek jaderného průmyslu v Rusku. Samostatná práce se věnuje jednotlivým konstrukčním řešením. Poslední kapitola detailně popisuje jednotlivé části parogenerátoru VVER 1000. Součástí práce je tvorba 3D modelu parogenerátoru VVER 1000, který bude sloužit jako učební pomůcka v projektu Cenelín.

KLÍČOVÁ SLOVA

Parogenerátor, VVER-1000, PWR, historie, 3D model

ABSTRACT

This bachelors thesis describes various designs of steam generators. The first part of the thesis describes the beginning of the nuclear industry in Russia. The main part deals with individual design solutions. The last chapter describes in detail the various parts of the steam generator VVER 1000. The work includes creation of a 3D model of the steam generator VVER 1000, which will serve as a teaching aid in the project Cenelín.

KEY WORDS

Steam generator, VVER-1000 PWR, history, 3D model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MICHALICA, M. *Parogenerátory tlakovodních reaktorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Suk.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Čestně prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci Parogenerátory tlakovodních reaktorů napsal a vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Ladislava Suka a uvedl v seznamu všechny použité zdroje.

V Brně dne 29.5.2015

.....
Martin Michalica

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Ladislavu Sukovi za odborné vedení a trpělivost.

OBSAH

ÚVOD	12
1. HISTORIE RUSKÉHO JADERNÉHO PRŮMYSLU	13
2. TLAKOVODNÍ PAROGENERÁTORY	15
2.1. Nejstarší typy parogenerátorů s primárním médiem tlakovou vodou	16
2.2. Vertikální PG s primárním médiem tlaková voda	18
2.3. Horizontální typy PG s primárním médiem tlaková voda.	23
3. PAROGENERÁTOR VVER 1000	26
3.1. Těleso	26
3.2. Separace	27
3.3. Parní potrubí	28
3.4. Rozvod napájecí vody	28
3.5. Havarijní napájecí voda	30
3.6. Konstrukční prvky odluhu	30
3.7. Trubkový svazek	31
3.7.1. Kmitání teplosměnných trubek	31
3.7.2. Technologie výroby teplosměnných trubek	32
3.8. Primární kolektory PG VVER 1000	32
3.9. Ukotvení PG VVER 1000	33
ZÁVĚR	34
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	35
SEZNAM OBRÁZKŮ	36
SEZNAM PŘÍLOH	37
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ	38

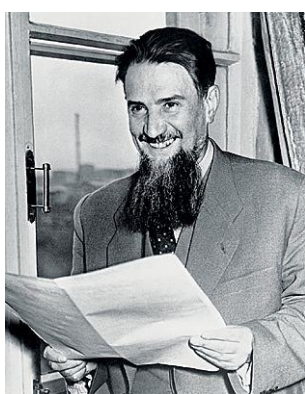
ÚVOD

Parogenerátory jsou tepelné výměníky sloužící k přenosu energie z aktivní zóny reaktoru do parní turbíny. Teplo získané v aktivní zóně štěpením jader uranu prostupuje přes pokrytí palivových článků do chladiva primárního okruhu, které proudí horkou větví cirkulační smyčky do trubkové teplosměnné plochy v parogenerátoru. Ze sekundárního okruhu se přivádí do parogenerátoru do prostoru mezi trubky teplosměnné plochy napájecí voda do níž stěnami trubek teplosměnné plochy prostupuje teplo z chladiva primárního okruhu a uvádí ji do varu. Pára vznikající v parogenerátoru odpařováním napájecí vody se odvádí parovodem do parní turbíny. Parogenerátor odděluje radioaktivní primární okruh od neradioaktivního sekundárního okruhu a proto patří mezi systémy související s jadernou bezpečností.

Tato bakalářská práce se zabývá jednotlivými konstrukčními řešeními tlakovodních reaktorů, které se postupem času vyvíjeli. Součástí práce je i 3D model parogenerátoru, který bude sloužit jako výuková pomůcka v projektu Cenelín.

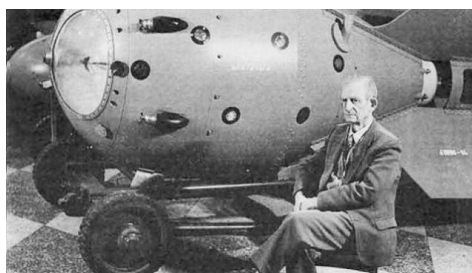
1. HISTORIE RUSKÉHO JADERNÉHO PRŮMYSLU

Ruský jaderný program začal ve velkém měřítku projekt atomové bomby. Byl zahájen v roce 1942, kdy SSSR Defence Committee vydal tajný rozkaz na výzkum uranu. Do té doby Sovětský svaz nashromáždil značné zpravodajské údaje o projektu Manhattan, které byly později používán sovětskými vědci ve svém výzkumu. Projekty zaměřené na těžbu uranu a vývoj atomové bomby začali v malé laboratoři sovětské akademie věd (nyní Kurchatov Institute National Research Centre). Obrovské vědecké a praktické úsilí zajistili rychlý pokrok. V roce 1946 sovětský jaderný fyzik Igor Kurchatov dosáhl první soběstačné jaderné řetězové reakce. O dva roky později Sovětský svaz spustil první 100 MWt reaktor pro výrobu plutonia. První test sovětské jaderné bomby byl úspěšně proveden 29. srpna 1949 u města Semipalatinsk. [1]



Obr. 1 Igor Kurchatov [2]

Jaderné soupeření mezi SSSR a USA pokračovaly v následujících letech. První sovětská H-bomba byla úspěšně testována v roce 1953. O čtyři roky později SSSR postavilo svou první jadernou ponorku. [1]



Obr. 2 H-bomba [3]



Obr. 3 První jaderná ponorka [4]

Sovětské projekty výzkumu a vývoje se také zabývali vývojem mírového využití jaderné technologie. V roce 1954 světově první jaderná elektrárna zahájila provoz v městě Obninsk. Elektrárna měla jeden grafitem moderovaný reaktor kanálového typu, který úspěšně fungoval téměř 48 let do roku 2002. [1]



Obr. 4 První jaderná elektrárna [5]

V rocích 1955 - 1956 Sovětský svaz spustil světově první reaktor nulového výkonu a pak 100 KWt rychlí reaktor. Vůbec první nukleární ledoborec pojmenovaný po Vladimíru Leninovi, byl vypuštěn v padesátých letech. [1]



Obr. 5 Nukleární ledoborec [6]

První velká sovětská jaderná elektrárna v Bělojarsku byla spuštěna v Sverdlovské oblasti roku 1964. Jako jediná na světě má jen provozní pohonnou jednotku s rychlým reaktorem. Hnací jednotky s rychlými reaktory mají lepší spotřebu jaderného paliva, a tím je minimalizován odpad zavedením uzavřeného cyklus jaderného paliva. [1]

V současné době má Rusko 10 provozovaných jaderných elektráren (33 reaktorů s 25,2 GW instalovaného výkonu), generování asi 18% z celkového výkonu. Jaderná energie představuje 30% všech elektrické energie v evropské části Ruska a přesahuje 40% v ruském Severozápadě. [1]

2. TLAKOVODNÍ PAROGENERÁTORY

U jaderných elektráren typu PWR je teponositelem tlaková voda. Parní generátor je proto výměník voda-voda. Z důvodu nízké teploty média vyrábí většinou pouze sytou páru. Koncepty jsou tyto parogenerátory podobné klasickým kotlům s nepřímým odparem. Výchřevnou plochu u těchto typů parogenerátorů tvoří svazky trubek o průměru 12 až 21mm z austenitického materiálu či slitin Cr-Ni a mají tloušťku stěny 1,2 až 2,0 mm. Z hlediska pevnostního vystačí při běžných tlacích tloušťky 1,2 - 1,5 mm, nutno ji však někdy zvětšit z důvodů technologického. Zvláště s ohledem na kvalitní provedení svarů. Tím však vzrůstá spotřeba austenitické oceli a tepelný odpor, protože austenit má horší tepelnou vodivost. [7]

Trubkové svazky jsou umístěny ve válcových tělesech paralelně podél os tělesa, které je uloženo horizontálně, nebo vertikálně. Máme tedy zásadně horizontální nebo vertikální typ parogenerátorů. Většinou je primární medium uvnitř trubek a sekundární v plášti (v mezi trubkovém prostoru) a to z těchto důvodů: [7]

a) Pevnostních, protože má vyšší tlak, resp. sekundární medium má tlak nižší a plášť má menší tloušťku stěny. [7]

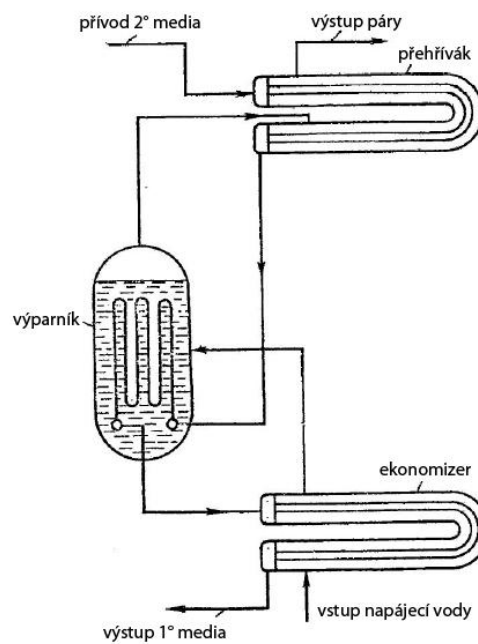
b) Uvnitř hadu lze dosáhnout větší α_w na straně vody, protože je funkcí d_e a rychlosti media, kterou můžeme uvnitř trubek kontrolovat a volit vyšší než v v mezi trubkovém prostoru. Naproti tomu na straně sekundárního media tj. vroucí vody není $\alpha_{var} = f(d_e)$ a je vyšší než α_w , takže jeho vliv na součinitel prostupu tepla k je nižší. [7]

c) V tělese výměníku můžeme výhodně umístit separační zařízení. Materiál pláště tělesa, který je ve styku se sekundárním mediem bývá perlitický, protože se nevyžadují tak dobré antikorozi vlastnosti jako na primární straně. [7]

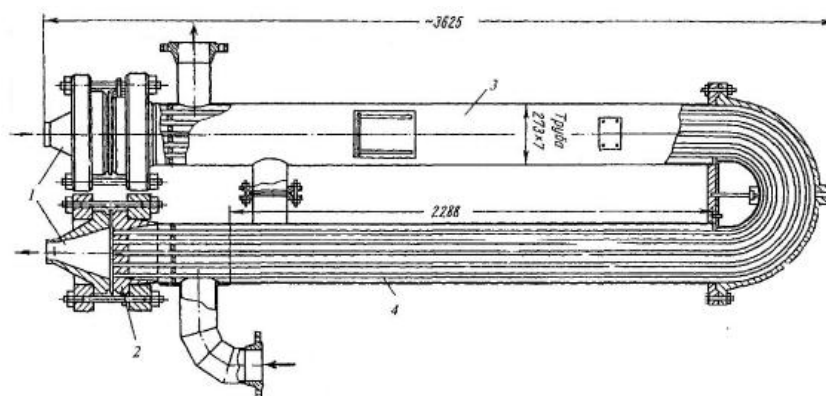
U jaderných elektráren s BWR je pracovním médiem sytá pára. Pomineme-li častější řešení, že totiž u BWR pracuje pára z reaktoru přímo v turbíně a proto parogenerátor odpadá. Hmotnostní průtok primárního media je u parogenerátorů otápěných sytou parou přibližně stejný jako hmotnostní průtok sekundárního media. Zatímco hmotnostní průtok primárního media s PWR je 10x až 15x větší, než hmotnostní průtok (parní výkon) sekundárního media. Průtok primárního media je u těchto typů parogenerátorů vesměs nucený, průtok sekundárního media bývá přirozený i nucený. [7]

2.1. Nejstarší typy parogenerátorů s primárním médiem tlakovou vodou

Jedním z nejstarších průmyslově využitých parogenerátorů tohoto typu byl v elektrárně Obninsk, jeho schéma je na Obr. 6. Byl vícetělesový, byl sestaven ze samostatného ekonomizéru, výparníku a přehříváku, přičemž ekonomizér i přehřívák byly stejné koncepce, viz Obr. 7. Byly tvořeny U tělesy z trubky průměru 273 mm s 55ti vlásenkami průměru 22mm. Zajímavým prvkem byla přihrádka (pozice 2), která zabraňovala pnutí v trubkovnici. Výparník tělesového typu vertikální koncepce měl výhřevnou plochu tvořenou 36ti plochými svazky z trubek průměru 21mm. Průměr vlastního tělesa byl cca 1100mm. Pod hladinou byly umístěny děrné štíty pro zrovnoměrnění výstupu páry - viz Obr. 8. [7]

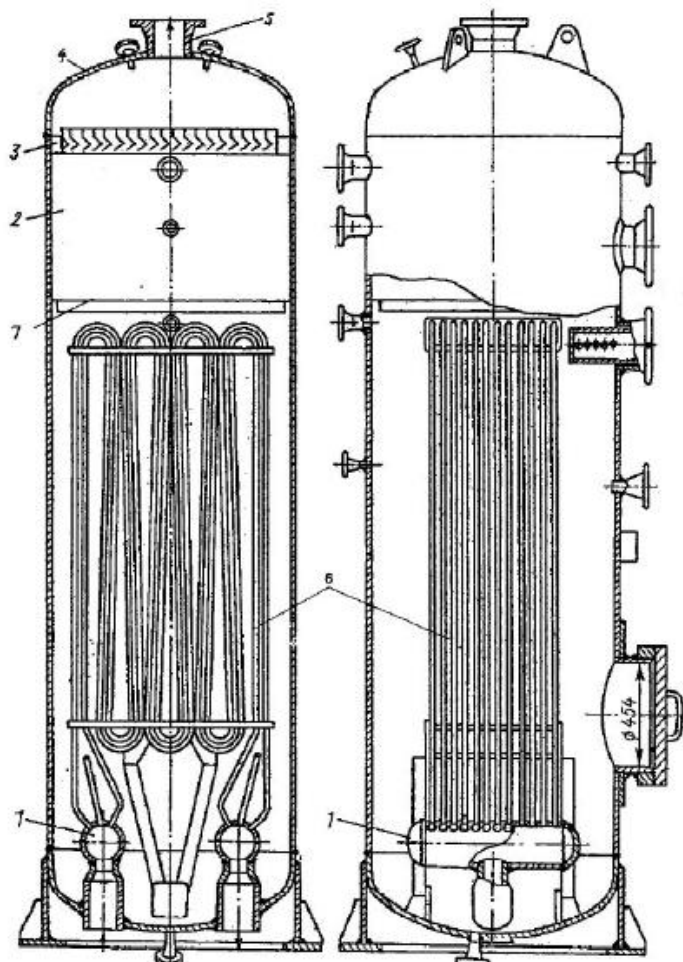


Obr. 6 Schéma PG JE Obninsk 1956 [8] [7]



Obr. 7 Konstrukce Ekonomizéru a přehříváku PG JE Obninsk [8] [7]

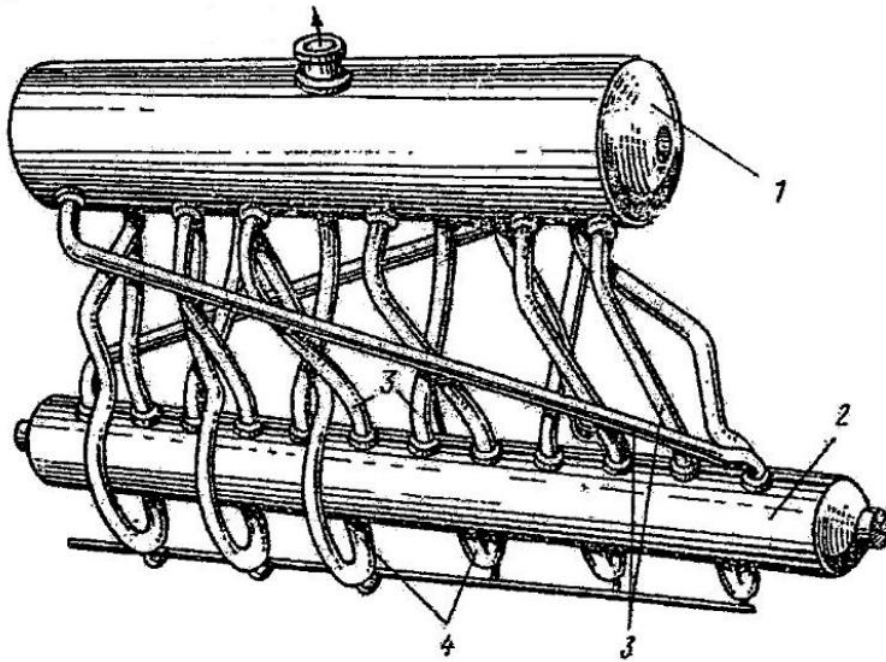
1-primární médium, 2-svorník, 3-tělo, 4-vlásenky



Obr. 8 Konstrukce výparníku PG JE Obninsk [8] [7]

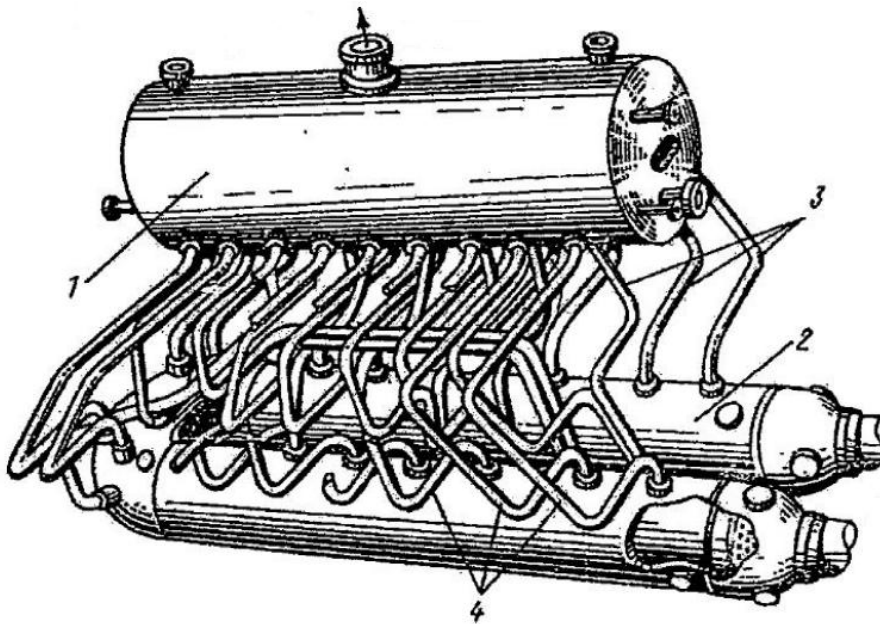
1-vnitřní rozdělovací komora primárního média, 2-parní prostor, 3-žaluziový separátor, 6-vlásenky výparníku, 7-vstup a výstup primárního média

K nejstarším typům se řadí také parogenerátor z JE Shippingport (USA), které byly navrženy ve dvou konstrukčních variantách a to s přímým tělesem a tělesem tvaru U v horizontální koncepci. Velké dilatační rozdíly trubek a pláště u přímého tělesa vedly k nutnosti provést i plášť tělesa z austenitického materiálu. Zatímco u tělesa tvaru U, viz Obr. 10, nutnost řešit problémy dilatačních rozdílů odpadla. Parogenerátor měl přirozený oběh a separace páry se prováděla v parním bubnu. Na konstrukci parogenerátorů je zřejmý silný vliv tradičních přístupů z oblasti konstrukce klasických parních kotlů. Parogenerátor měl tyto základní parametry: tlak primárního média 13 MPa, tlak sekundárního média 2,84 MPa, teplota sekundárního média 232 °C a hmotnostní průtok 250 t/h. Horizontální typy parogenerátorů se v jaderné energetice západních zemí nerozšířily a převládly parogenerátory vertikální. [7]



Obr. 9 PG JE Shippingport (USA) s přímými varnicemi [8] [7]

1-separační bublen, 2-plášť výměníku, 3-vyváděcí trubky, 4-zavodňovací trubky



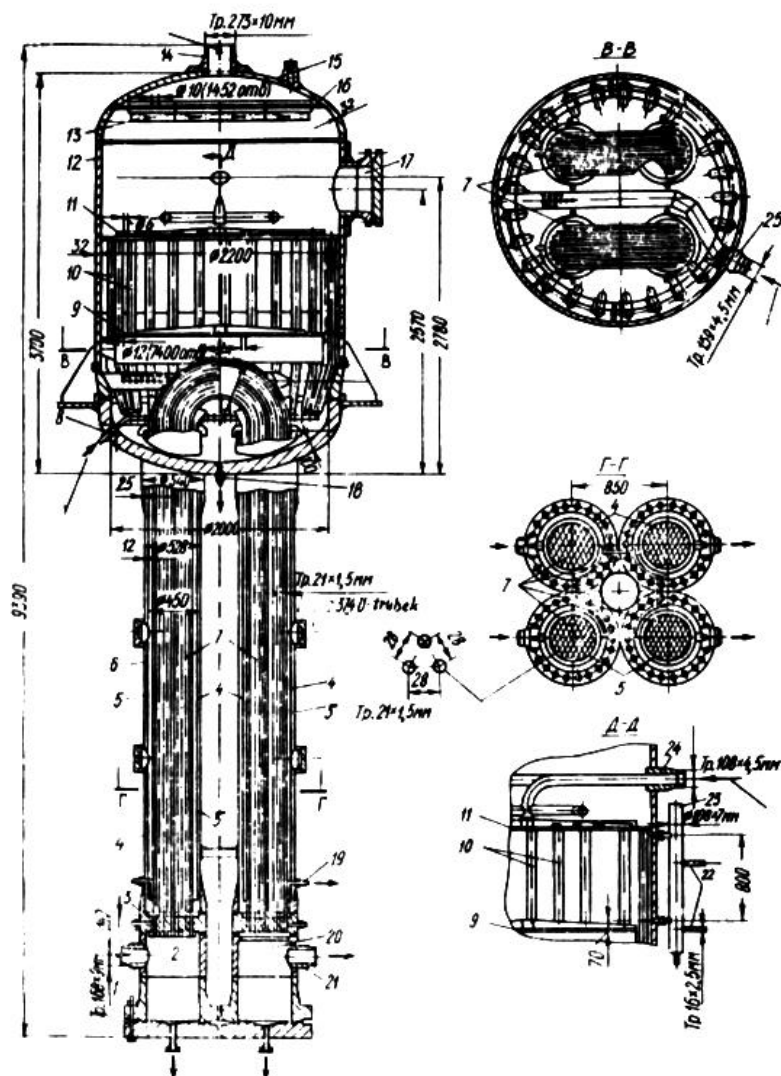
Obr. 10 PG JE Shippingport (USA) s vlásenkovými varnicemi [8] [7]

1-separační bublen, 2-plášť výměníku, 3-vyváděcí trubky, 4-zavodňovací trubky

2.2. Vertikální PG s primárním médiem tlaková voda

V SSSR v jaderné elektrárně Melekes (nyní Dimitrovgrad) byly použity parogenerátory dle Obr. 11. Základním prvkem jsou vertikální vlásenky, umístěné ve čtyřech vertikálních komorách průměru 528 mm, zaústěných do klenutého dna

vertikálního válcového tělesa průměru 2264 mm, ve kterém je ještě část výparné plochy (kolena vlásenek), napájení a separační zařízení. Parogenerátor má přirozený oběh, k zajištění čistoty páry slouží děrovaný plech pod hladinou, promývání páry a žaluziový separátor. [7]



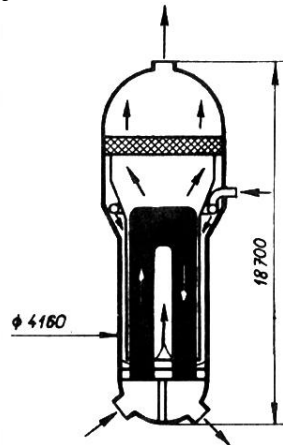
Obr. 11 Vertikální PG JE Dimitrovgrad [7]

1,21-vstup,výstup primárního média, 2,20-vstupní a výstupní komora primárního média, 3-trubkovice, 4-zavodňovací štěrbin, 5-obálka svazku, 6-tělo, 7-svazky, 8-nátrubek pro přívod fosfátů, 9-děrovaný plech, 10-spádovky, 11-promývací zařízení, 12-separační buben, 13-žaluziový separátor, 14-odvod páry, 15-nátrubek pojistného ventilu, 16-stropní štít, 17-průlez, 18-odluh, 19-odkal, 22-nátrubky vodoznaku, 24-vstup napájecí vody, 25-vstup odluhu reaktoru

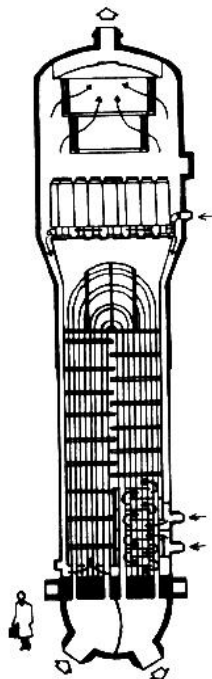
Výhodou této koncepce proti klasické koncepci vertikálního parogenerátoru je menší tloušťka trubkovic v jednotlivých vertikálních komorách. Celá trubkovička má stejnou teplotu, protože přívod a odvod primárního média je oddělen. Jednotkový výkon je však příliš malý, přibližně o řád menší, než u parogenerátoru k blokům VVER 440. Rovněž tak promývání páry kapalinou není nutné. [7]

Nejrozšířenějším typem vertikálního parogenerátoru k jaderné elektrárně s PWR bylo konstrukční řešení používané téměř výlučně všemi výrobci mimo SSSR

a ČSSR, jehož schéma je na Obr. 12. Je to jednotělesový parogenerátor s trubkovicí o tloušťce 600-800 mm, jakožto rozdělovacím elementem. Výchřevná plocha je tvořena vlásenkami z trubek o průměru 16-12 mm s tloušťkou stěny 1 až 1,5 mm. Výstupní část vlásenek může být zapojena jako ekonomizér, což vyžaduje úpravu dispozice přívodu napájecí vody dle Obr. 13. Obvyklý způsob napájení, dle Obr. 12, je přívodem pouze v úrovni separátorů do prstencové komory. Z ní napájecí voda vytéká do štěrby mezi pláštěm a "košílkou" obalující celý svazek vlásenek. Smísí se separovanou vodou z cyklonů a zavádí se nad trubkovicí, kde vstupuje radiálně do trubkového svazku. Parogenerátor pracuje s přirozeným oběhem a má dvoustupňové separační zařízení. Jako první stupeň slouží cyklony s axiálním vstupem, jako druhý stupeň žaluziové separátory. Gravitační separace se zde z důvodu velké vzestupové rychlosti páry neuplatní. Parogenerátory tohoto typu pracují s parametry: tlak primárního média 14,5 až 16,5 MPa, teplota primárního média 270 až 295°C, tlak sekundárního média 4,8 až 6,4 MPa. Mezní jednotkový výkon v provozu činí 477 kg/s tj. 939 MWt. [7]

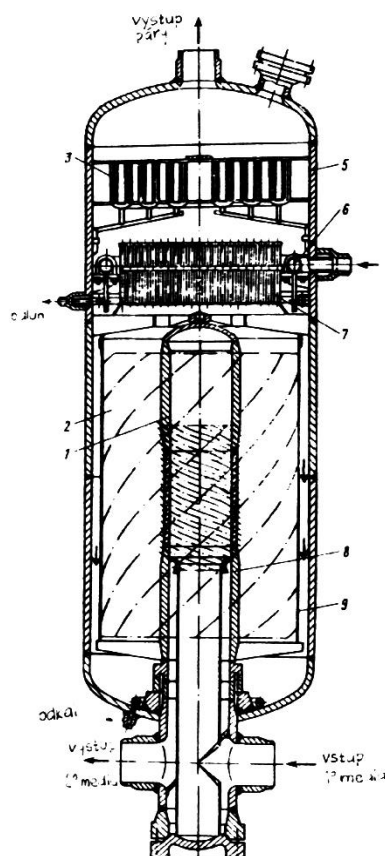


Obr. 12 Vertikální varianta PG k PWR s vlásenkovou výchřevnou plochou [7]



Obr. 13 Vertikální varianta PG k PWR s vlásenkovou výchřevnou plochou s ekem [7]

Firma CE (Combustion Engineering) má vypracován parogenerátor o jednotkovém výkonu 1900 MWt, tj. přibližně 3800 t/h páry, tj. 2ks PG k bloku 1300MW. Průměr pláště tohoto PG činí 4200 mm, výška přes 20 m a hmotnost 350 t. V SSSR byla k bloku 1000 MWe projekčně vypracována také varianta vertikálního jednotělesového parogenerátoru, kde rozdělovacím elementem je válcová komora a výhřevnou plochu tvoří šroubovicově vinuté trubky. V horní části tělesa je opět umístěno separační zařízení, viz Obr. 14. [7]

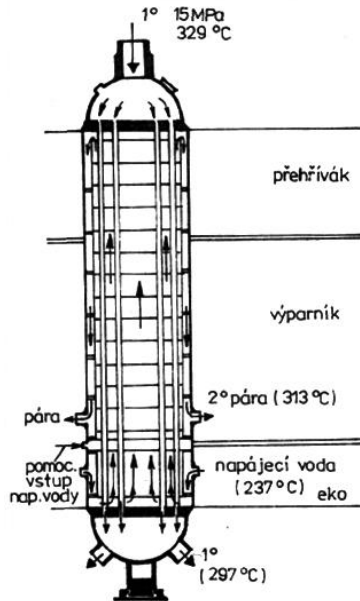


Obr. 14 Vertikální PG k VVER 1000 - SSSR [7]

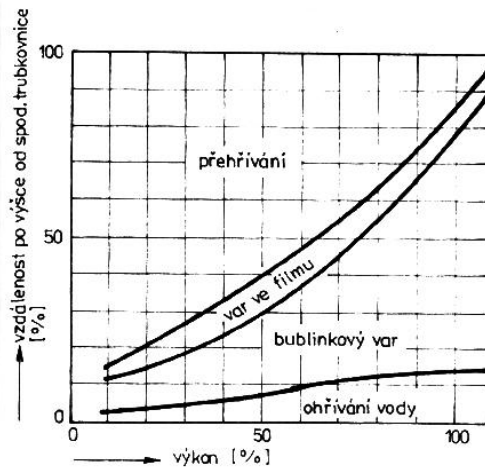
1-vstupní kolektor, 2-výhřevná plocha, 3-sekundární separace, 5-těleso, 6-rozdělovací komora napájecí vody, 7-primární separace, 8-výstupní kolektor, 9-obálka svazku vymezující zavodňovací štěrbinu

Vertikální průtočný parogenerátor výrobců Babcock-Wilcox+Brown-Boweri (BBR), který je v provozu v USA v řadě jaderných elektráren, např. Oconee a dalších, v Německu je v JE Mühlheim-Kährlich, je řešen, jak je patrné z obr. 15, nejjednodušší koncepční variantou, tj. výměníkem s přímými trubkami. Přitom obvyklý problém tohoto typu výměníků je rozdílná dilatace pláště a trubek. Řešen je vrácením přehřáté páry podél pláště. Tím se plášť ohřívá a zvyšuje se jeho dilatace, která by jinak byla menší než dilatace trubek, kterým protéká médium. Ke složení dilatačních rozdílů přispívá i volba materiálu pláště (22 NiMo Cr37) a trubek (Inconel 600- Ni=75%, Cr=16-17%, Fe=7,5%). Oba mají přibližně stejný součinitel roztažnosti. Důsledně protiproudého uspořádání parogenerátoru lze využít k přehřátí páry při jmenovitém výkonu cca o 17 K. Hranice mezi jednotlivými díly, tj. ekonomizérem, výparníkem a přehřívákem, se posouvají v závislosti na poměrném

výkonu, jak je to patrné z Obr. 16. Parametry PG jsou patrné z Obr. 15. Pro blok o výkonu 1300 MWe postačí 2 ks parogenerátoru, každý o výkonu 3640 t/h, tj. 1020 kg/s. S ohledem na mírné přehřátí je účinnost bloku proti jaderné elektrárně se stejnými parametry primárního média, avšak PG na sytou páru, cca o 1 až 1,5 % vyšší (přibližně 34,5%). Velkou výhodou tohoto typu parogenerátoru je to, že zcela odpadá potřeba separačních zařízení. Složitější je však systém sledování pnutí a dilatačních rozdílů za změřených provozních podmínek. Menší vodní obsah parogenerátoru činí citlivější na případný výpadek napáječek. [7]

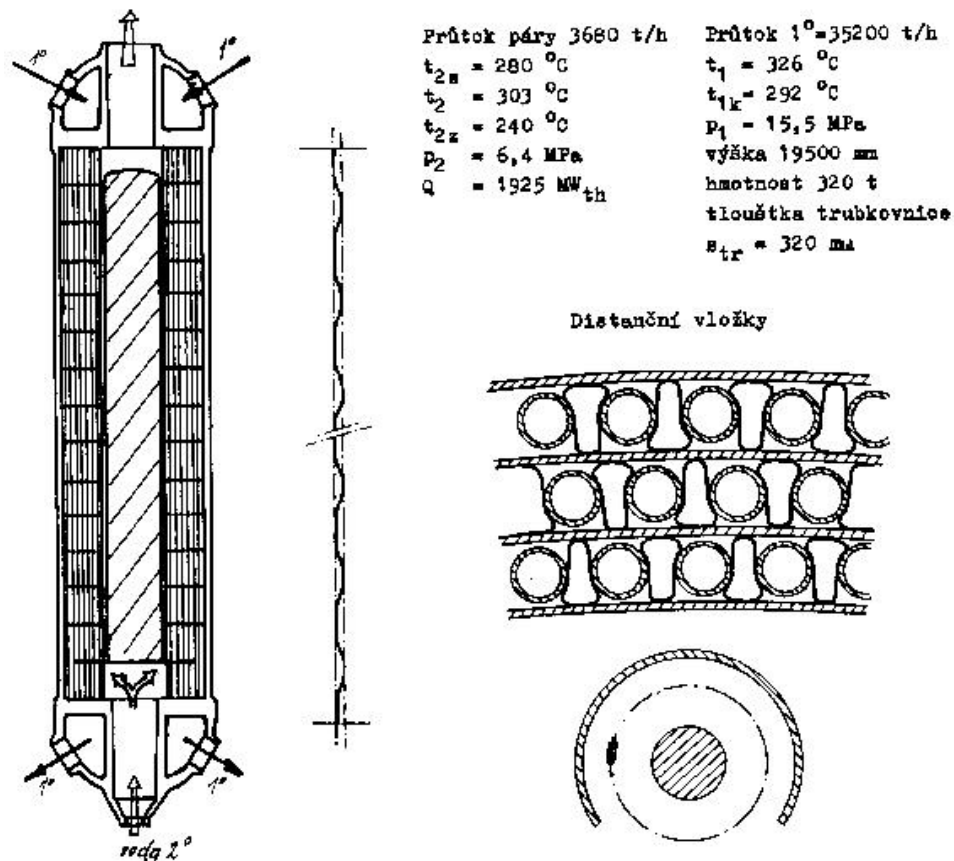


Obr. 15 Průtočný PG fy BBR [7]



Obr. 16 Posuv hranic mezi pásmem dohřívání, vypařování a přehřívání při změně výkonu [7]

Na obdobném principu byl navržen i průtočný parogenerátor fly "Trépaud", který však problém pnutí řeší použitím zvlněných trubek. Tohle řešení znamená potřebu speciálního způsobu řešení jejich distancování. Schéma parogenerátoru "Trépaud" a některé hlavní údaje jsou na obr. 17, v praxi však, pokud je známo, nebyl realizován. [7]



Obr. 17 Průtočný PG k PWR systém "Trépaud" [7]

2.3. Horizontální typy PG s primárním médiem tlaková voda.

Horizontální typy, kterými začínala jaderná energetika v USA (Shippingport) se zde dále nerozšířily. Typ výměníku s tělesem tvaru U byl použit ještě v centrále Indian Point. Bylo použito kombinace s klasickou tepelnou elektrárnou a sytá pára o tlaku 2,9 MPa byla přehřívána v klasickém kotli na fosilní palivo na 538 °C. Centrála postavená v roce 1959 měla celkový výkon 275 MWe, z toho 163 MW jaderných. Primární okruh měl parametry tlak 10,4 MPa a teplota 269/252 °C. [7]

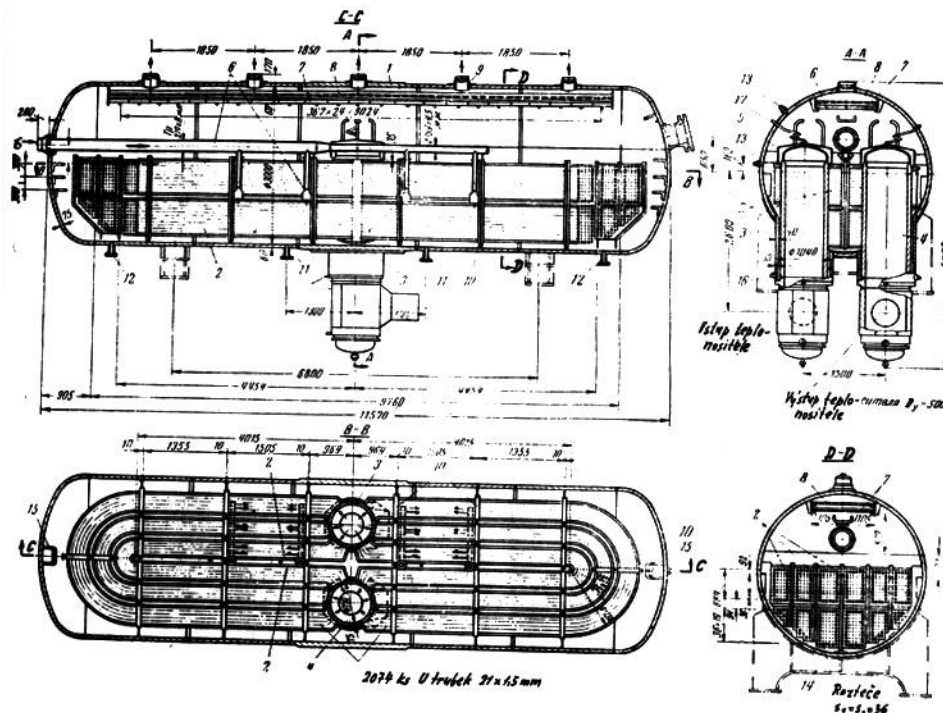
Charakteristický znak prvních amerických parogenerátorů byl zvláštní separační buben. Toto konstrukční řešení bylo brzy opuštěno a separační zařízení se umísťují uvnitř výparníkového tělesa. Naopak v SSSR se od původního vertikálního typu výparníku použitého v Obnisku přešlo téměř výlučně na PG horizontální. Byl to parogenerátor novovoronežského typu, který měl v roce 1990 již čtvrtou vývojovou variantu. První blok (1963) měl výkon 240 MWe a 6 kusů PG, druhý (1968) 400 MW a 8ks PG, třetí (1971) 440 MW a 6ks PG a čtvrtý 1000 MW a 4 ks PG. V ČSSR se v roce 1990 stavěli bloky III. a IV. varianty. Některé hlavní konstrukční údaje a parametry jsou na Tab. 1. [7]

charakteristika		varianta I.	varianta II.	varianta III	VVER 1000	
				VVER 440	horizont.	vertik.
parní výkon	t/h	230	325	452	1 460	1 460
výstupní tlak páry	MPa	3,2	3,3	4,7	6,4	6,4
výstupní teplota páry	°C	236	238	259	278	278
teplota nap.vody	°C	189	195	226	220	220
teploty teplotonositele	°C	273/252	280/252	301/266	331/295	331/295
trubky-rozměr	mm	21,5x1,5	16x1,4	16x1,4	12x1,2	12x1,2
počet	ks	2 074	3 664	5 146	14 000	14 000
teplosměnná plocha	m ²	1 300	1 800	2 500	5 000	5 000
vnitřní Ø a délka tělesa	m	3010/ 12,4	3 010/ 12,4	3 200/ 13	3 800/ 13	3 900/ 14,5
hmotnost PG	t	104,2	112	145	200	200
měrná spotřeba kovu na jednotkový výkon	$\frac{kg \cdot s}{kg}$	0,45	0,344	0,32	0,137	0,137

Tab. 1 Hlavní charakteristiky PG typů novovoronežská a VVER 1000 [7]

Předností horizontálních typů parogenerátorů proti vertikálním je to, že místo trubkovnice jsou použity jako rozdělovací element válcové komory, které jsou výhodnější po stránce pevnostní a mají i menší tepelná pnutí. Rovněž korozní problémy v místě spoje trubky s rozdělovacím elementem jsou zde podstatně menší. Vzestupná rychlost páry je zde nižší (větší plocha hladiny), proto lze využít k separaci přirozené sedimentace gravitačním účinkem. Nevýhodou se naopak jeví velký zastavěný půdorys, což vadí zvláště u elektráren s ochrannou obálkou, protože horizontální parogenerátory se zde obtížně umisťují. Rovněž objemový ukazatel je horší a v roce 1990 dosažený maximální jednotkový tepelný výkon horizontálního PG (750 MWt) je proti výkonu vertikálního typu (1900 MWt) podstatně menší, což pochopitelně zvyšuje investiční náklady na jadernou elektrárnu. Jednotkový maximální výkon horizontálního typu parogenerátoru je omezen také transportními možnostmi, protože musí být kompletně zhotoven v závodě a následně transportován jako celek. U vertikálních typů parogenerátorů lze odděleně v závodě vyrobit spodní díl se svazky a se vstupní a výstupní komorou a horní díl se separačními vestavbami a oba díly se potom svaří až na místě. [7]

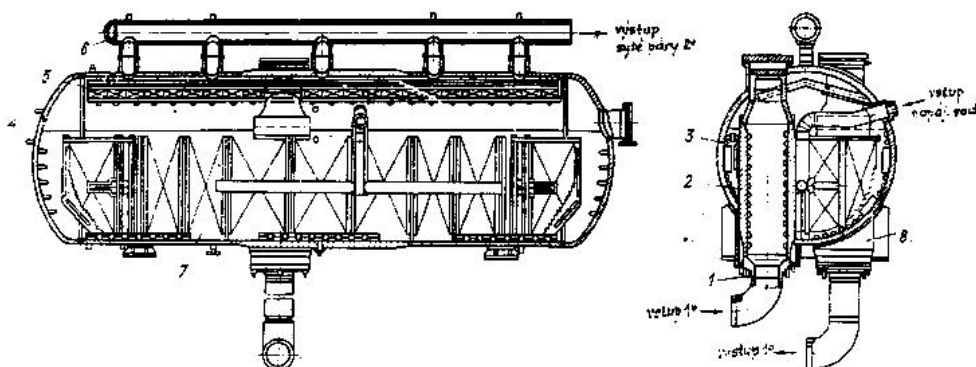
Bližší údaje a funkční principy jsou patrné z Obr 2-14. Jedná se horizontální PG varianty I., který měl ještě průměr trubek 21 a tloušťku stěny 1,5 mm. Toto znamenalo horší využití objemu a větší spotřebu austenitu. Rozdělovací i sběrná komora nebyla ještě vyvedena ven vrchní částí tělesa, proto při opravách byl vstup do komor možný jen po rozebrání primárního potrubí, tedy spodem. [7]



Obr. 18 PG novovoronežského typu varianta I. [7]

1-tělo, 2-hady výhřevné plochy, 3-vstupní komora primárního média, 4-výstupní komora primárního média, 5- ochranný plášť, 6-přívod napájecí vody, 7-žaluziový separátor, 8-děrovaný stropní štít, 9-vývody páry, 10-nosné přepážky

Parogenerátor varianty III, použité u našich JE V 1 a V 2 mají již komory přístupné svrchu, jak je to patrné z Obr. 19 a používají již trubek průměru 16 mm a tloušťku stěny 1,4 mm. Odlišný je způsob přívodu a rozvodu napájecí vody. [7]



Obr. 19 PG novovoronežského typu varianta III.(VVER 440) [7]

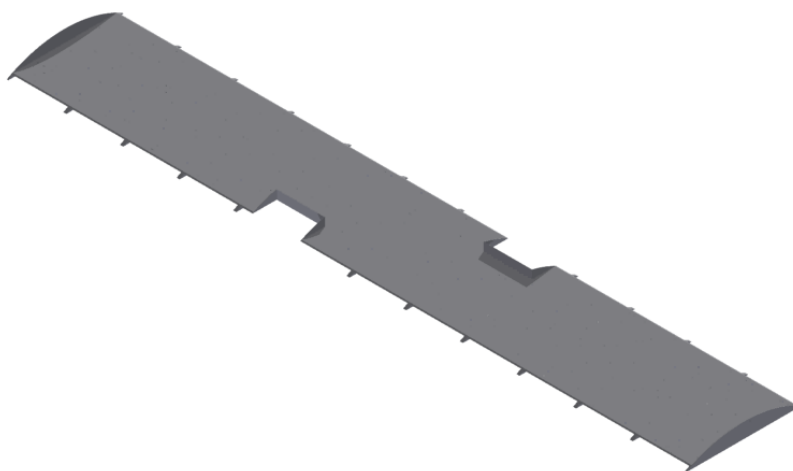
1-nátrubky odkalu a odvzdušnění sborníku, 2-vstupní sborník primárního média, 3-tělo, 4-nátrubky vodoznaku, 5-žaluziový separátor, 6-sběrač syté páry, 7-výhřevná plocha, 8-výstupní sborník

Horizontální parogenerátor pro VVER 1000 má termický výkon 750 MWt. Konceptním řešením se podobá PG VVER 440. Potřebného zvětšení výkonu bylo dosaženo zmenšením průměru použitých trubek a tím zlepšením objemového ukazatele zabudované výhřevné plochy. Tímto zvětšením mírným nárůstem vnějších rozměrů a zvětšením středního teplovodního spádu mezi primárním a sekundárním médiem. Řešení je patrné z následující kapitoly, kde je popsán podrobně. [7]

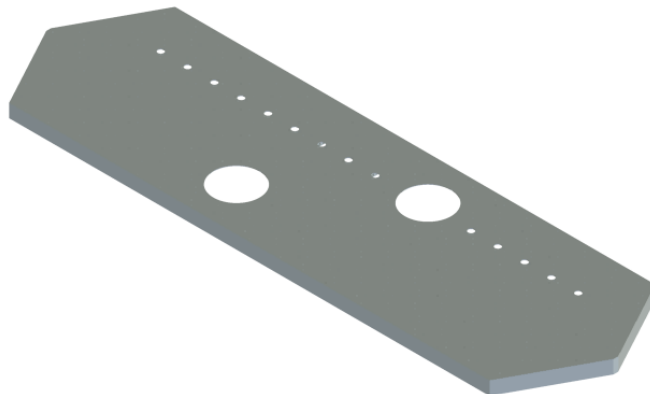
odkalu DN 80 je ve spodní části PG. Nátrubky DN 10 a DN 20 sloužící k připojení jednokomorových hladinoměřů, dvoukomorových hladinoměřů, k vyvedení odběrů pro cejchování hladinoměřů systémem KHP, k měření těsnosti přírubových spojů, k odvzdušnění obou primárních kolektorů, popř. jsou rezervní. Čtyři pouzdra jsou pro uchycení termočlánků k měření teploty povrchu pláště. Nátrubek DN 80 je určen pro chemickou diagnostiku. Tlaková nádoba je celá vyrobena z nízkolegované oceli ruského značení 10GN2MFA. [9]

3.2.Separace

K zabránění nerovnoměrnému vývinu páry po celé ploše hladiny (největší odpar je na "horké" straně, kde je nejvyšší teplota chladiva I.O.) je nad teplosměnnými trubkami na nosné konstrukci z uhlíkové oceli připevněn nerezový děrovaný plech. K posílení tohoto účinku se zavádí napájecí voda částečně nad trubkový svazek parogenerátoru a do oblastí nejvyšších tepelných toků. Lze tím tedy dosáhnout jak promývání páry napájecí vodou, tak vyrovnaní parního zatížení po celé ploše hladiny. Ponořený děrovaný plech se skládá ze segmentů o ploše 44,41 m². V tomto plechu je vyvrtáno 26 002 otvorů o průměru 13 mm s průtočnou plochou 3,45 m². Děrovaný plech je za provozu ponořen asi 100 mm pod hladinou. Na okraje ponořeného děrovaného plechu navazuje svislý obtokový plech výšky 768 mm. Děrovaným plechem tvořeným segmenty s 889 otvory o průměru 13 mm je překryta i mezera mezi okrajem ponořeného děrovaného plechu nad teplosměnnými trubkami a pláštěm na "horké" straně, kde se nachází "horký" kolektor. Na této straně dochází vlivem větší teploty chladiva v teplosměnných trubkách k největšímu předávání tepla. Překrytí mezery zabraňuje přestříkům vody do parního prostoru a předchází zhoršování vlhkosti vyráběné páry. Vyvinutá pára stoupá od hladiny a následně dochází k její gravitační separaci. V parním prostoru 1 200 mm nad ponořeným děrovaným plechem je šrouby připojen na rámové konstrukci nerezový děrovaný plech. Tento plech je také sestaven ze segmentů. Tento plech zrovnoměňuje výstup páry z parogenerátoru a dokončuje separaci páry. V separačním děrovaném plechu je navrtáno 12 194 otvorů o průměru 10 mm. [9]



Obr. 21 Separální děrovaný plech



Obr. 22 Ponořený děrovaný plech

3.3.Parní potrubí

Generovaná sytá pára vystupuje ze separačního zařízení do 10-ti sběrných potrubí a to přes nátrubky odvodu páry DN 350. Sběrné potrubí je přivařeno s parním kolektorem o průměru 630 mm a tloušťce stěny 25 mm. Parní kolektor je napojen do parovodu. Pak je vedena tato pára přes hlavní parní kolektor k turbínám. [9]



Obr. 23 Parní potrubí

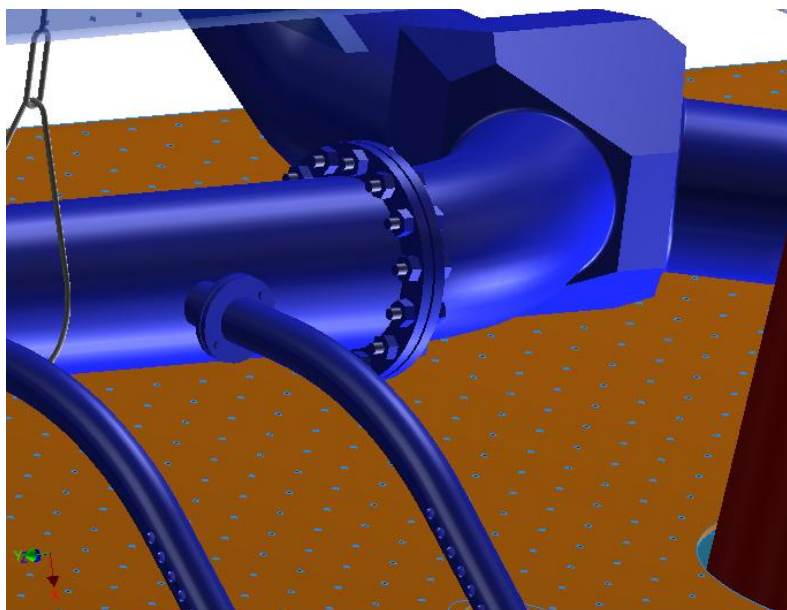
3.4.Rozvod napájecí vody

Řešení systému napájení vodou uvnitř PG VVER 1000 je provedeno podobně jako inovované provedení téhož systému v PG VVER 440. Napájecí voda je přiváděna napájecím potrubím o rozměru DN 400 z uhlíkové oceli, který prochází pláštěm PG přes nátrubek DN 400 (nátrubek je opatřen válcovým pláštěm sloužícím jako ochrana proti tepelným šokům na materiál nátrubku při prudké změně teplot napájecí vody). Je veden do nerezového rozdělovacího kusu ve tvaru „Y“, který je umístěn nad trubkovým svazkem parogenerátoru. Z rozdělovacího kusu je na obě strany vyvedena trubka o průměru 273 mm a tloušťkou stěny 11 mm skládající se z osmi nerezových segmentů, ze kterých jsou vyvedeny dvojice rozváděcích trubek o průměru 89mm. Rozváděcí trubky jsou zaváděné do hloubky cca 1 m ve svislém koridoru. Umístěné jsou mezi teplosměnné svazky a pouze na "horkou" stranu. Napájecí voda je přiváděna otvory v rozváděcích trubkách a to částečně do svislého koridoru a částečně nad děrovaný plech. Rozváděcí trubky se zaslepenými konci mají po celé délce různý počet otvorů pro rozvod napájecí vody. Ve svislém koridoru jsou mezi teplosměnnými svazky otvory vyvrtány tak, aby napájecí voda nebyla vstříkována přímo na teplosměnné trubky nebo na "horký" primární kolektor.

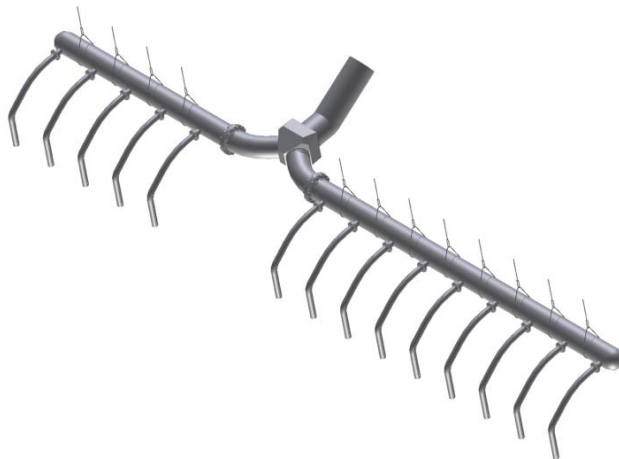
Pět osmin napájecí vody je dodáváno do poloviny PG blíže ke "studenému" dnu a tři osminy jsou dodávány do druhé poloviny PG blíže k "horkému" dnu. [9]



Obr. 24 Přívod napájecí vody



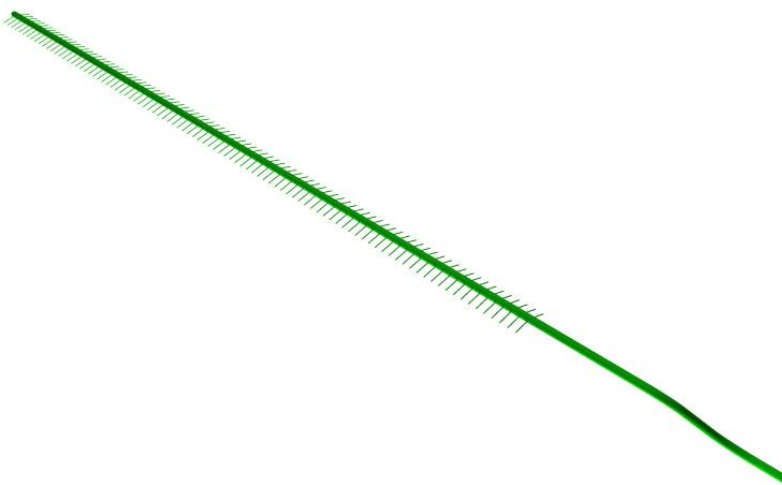
Obr. 25 Přívod napájecí vody ve 3D modelu



Obr. 26 Rozvod napájecí vody

3.5. Havarijní napájecí voda

V horní části PG je v celé délce pod rámovou konstrukcí děrovaného plechu připevněno nerezové potrubí o průměru 89 mm přívodu a rozstříku havarijní napájecí vody. Potrubí havarijní napájecí vody je vedeno nad středem parogenerátoru rovnoběžně s jeho podélnou osou a je opatřeno 38-mi rozváděcími trubkami o průměru 22 mm, které jsou na konci zaslepeny a po své délce mají vyvrtáno na obou stranách po 5ti otvorech o průměru 8 mm pro rozstřík havarijní napájecí vody. [9]



Obr. 27 Havarijní napájecí voda

3.6. Konstrukční prvky odluhu

Na 1. bloku je z vodního prostoru mezi "horkým" dnem a teplosměnným svazkem odebírán nerezovým potrubím odluh. Odběrové potrubí je tvořeno vodorovnou trubkou o průměru 114 mm, která má zaslepené oba konce a po své délce má vyvrtáno na obou stranách po 39 otvorech o průměru 12 mm. Dále jej tvoří usměrňovací plech, který zabraňuje vnikání páry do potrubí a trubka o průměru 89 mm, která slouží k vedení odluhu k nátrubku na plášti. [9]

Na 2. bloku je prováděn odluh z obou dnů nerezovým potrubím o průměru 89 mm, které má zaslepený konec a v koncové části má na obou stranách navrtáno

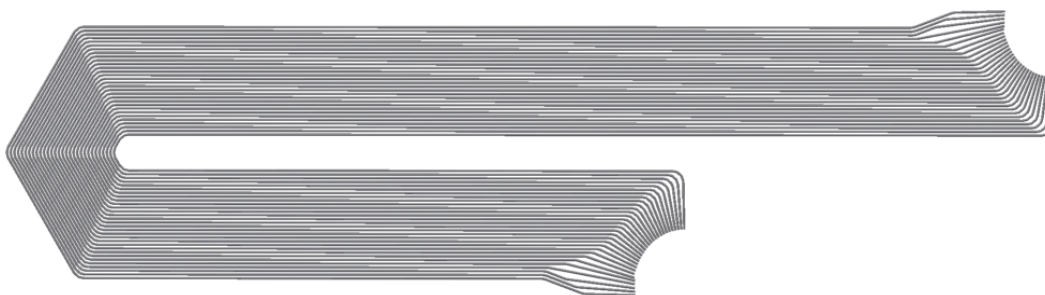
po 31 otvorech o průměru 12 mm. Odběrová část je opatřena usměrňovacím plechem zabraňujícím vnikání páry. Na spodní část každé dvojice krajních kroužků je vyveden nátrubek DN 80 pro periodický odkal. [9]



Obr. 28 Odluh

3.7. Trubkový svazek

Trubkový svazek se skládá z 11 000 teplosměnných trubek o průměru 16 mm a tloušťce stěny 1,5 mm, které jsou ohnuty do tvaru „U“. Sestaveny jsou do dvou U svazků vytvářejících tři svislé koridory pro zabezpečení organizované hydrodynamiky napájecí vody (někdy také nazývaná jako kotlová voda u ležatých tělesových PG). Uspořádání teplosměnných trubek je ve svazku provedeno šachovnicovým vystřídáním (na rozdíl od PG VVER 440, kdy jsou trubky umístěny nad sebou). V přímých úsecích jsou trubky umístěny ve svazku v jednotlivých horizontálních řadách s roztečí trubek v řadě 23 mm. Svislá vzdálenost řad je 19 mm. Na vnějším povrchu primárního kolektoru, který má průměr 1 176 mm jsou trubky šachovnicově vystřídány s výškovou roztečí 19 mm a šířkovou 30,79 mm resp. 21,83 mm na vnitřním povrchu primárního kolektoru o průměru 834 mm. Středky trubek v horní řadě leží 190 mm nad osou parogenerátoru. Řady trubek jsou vypádovány směrem k oběma kolektorům. Trubky jsou vyrobeny z nerezové oceli (08Ch18N10T). [9]



Obr. 29 Trubkový svazek

3.7.1. Kmitání teplosměnných trubek

Jednou z možných příčin snížení životnosti parogenerátorů jaderné elektrárny jsou případné vibrace teplosměnných trubek indukované prouděním parovodní směsi

v sekundárním okruhu PG. Vibrace trubek byly příčinou havárie parogenerátoru JE Enrico Fermi. V několika případech bylo nutno snížit výkon JE z důvodu zjevného rozkmitání teplosměnných trubek PG. Zkušenosti z provozu JE VVER 440 vylučují možnost vzniku takto výrazných vibrací, které jsou snadno indikovatelné akusticky. Doposud nám není známo, zda byla experimentálně vyloučena možnost vibrací teplosměnných trubek s malou amplitudou, které mohou svým cyklickým namáháním snižovat životnost teplosměnných trubek, resp. není vyloučena kauzalita mezi poškozováním teplosměnných trubek v místech distancování a případnými vibracemi těchto trubek. Nicméně v případě změn podpěrného systému teplosměnných trubek je určitě nutné se problematikou kmitání podrobně zabývat, aby bylo možné v případě konstrukčních úprav respektovat rovněž toto důležité hledisko. Aktuálnost tohoto tématu potvrzuje rovněž intenzivní výzkumná činnost v této oblasti fluídoelasticity s řadou publikací v odborné literatuře. Bohužel, většina prací se týká reaktorů JE, tj. kmitání právě při podélném obtékání štíhlých prutů jednofázovým médiem. Ani v těchto případech však není mechanismu vzniku vibrací úplně objasněn. Souhrnnou prací, týkající se příčného obtékání teplosměnných trubek parovodní směsí je zpráva AECL-6184, která vyšla v roce 1978, kde jsou shrnuty experimentální výsledky, které byly získané z měření na modelech PG. Dvoufázová směs zde byla simulována vzduchovodní směsí, což však vylučuje posoudit jeden z právě možných mechanismů buzení – vznik a odtrhávání parních bublin od povrchu teplosměnných trub. Nicméně tato práce obsahuje velmi cenné informace o dalších možných mechanismech buzení, amplitudách vibrací a vlivu suchosti parovodní směsí na vznik a amplitudou vibrací. [10]

3.7.2. Technologie výroby teplosměnných trubek

Výchozí vsázkou jsou válcové a třískové opracované tyče průměru 153 mm nebo 170 mm z oceli 08Ch18N10T. Po dělení na potřebné délky jsou z této vsázky výtlačným lisováním a redukováním za tepla získány trubkové polotovary průměru 76 mm s tloušťkou stěny 7,5 mm. Tyto polotovary jsou třískově opracovány na vnějším a vnitřním povrchu a jsou připraveny k válcování za studena na rozměr průměr 38x2,6 mm. Po odmaštění, tepelném zpracování v peci s ochrannou atmosférou jsou tyto polotovary podrobeny dalším úpravářským a kontrolním operacím a je chemicky upravena morfologie povrchu trub. Další válcování za studena je na rozměr průměr 16x1,5 mm. Následuje odmaštění, tepelné zpracování v peci s vodíkovou ochrannou atmosférou, rovnání, broušení vnějšího povrchu, ultrazvuková kontrola, dělení, tryskání vnitřního povrchu, finální kontrola. [10]

3.8. Primární kolektory PG VVER 1000

Primární kolektory jsou svislé válcové nádoby sestaveny ze dvou kovaných dílů, a to ze spodního a horního o celkové délce 4 970 mm. Spodní díl je v oblasti zakotvení teplosměnných trubek zesílen tak, že má vnitřní průměr 834 mm (včetně návaru) a tloušťku stěny 171 mm. V každém z primárních kolektorů je vyvrtáno 11 000 otvorů, ve kterých jsou upevněny teplosměnné trubky. Pod spodní řadou trubek je proveden zápich o hloubce 15 mm, který je určen pro technologické účely, např. pro upevnění plnotlaké zátky. Spodní díl je ukončen nákrůžkem o průměru 1 335/1 190 mm. Pro přivaření kolektoru k nátrubku na tlakové nádobě. Je opatřen hrdlem s úpravou pro svar s primárním potrubím o průměru 900/862 mm. Celý vnitřní povrch primárního kolektoru je opatřen dvouvrstvým protikorozním

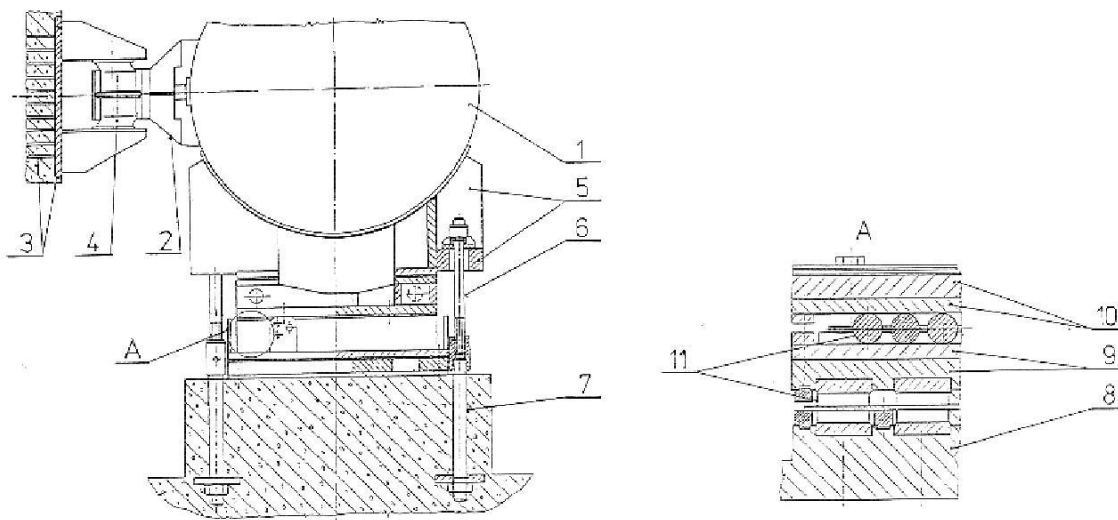
návarem se spodní vrstvou, který je vyroben z materiálu Sv07Ch25N13 a horní vrstvou z materiálu Sv04Ch20N10G2B. Horní díl kolektoru je navařen na spodní díl svarem provedeným ve válcové části, který má vnější průměr 1 014 mm, a je cca 100 mm nad napouštěcí hladinou sekundární vody. Střední přechodová část horního dílu je kuželová, na ni navazuje válcová část s vnitřním průměrem 500 mm. V horní části primárního kolektoru je provedeno vyhrdlení přírubou rozebíratelného spoje, ve kterém jsou závitová hnízda a také dvě drážky pro niklová těsnění kruhového průřezu. Primární kolektor je vyroben z nízkolegované oceli I0GN2MFA s dvouvrstvým nerezovým návarem o tloušťce 9 mm na vnitřním povrchu. [9]



Obr. 30 Primární kolektor

3.9.Ukotvení PG VVER 1000

Parogenerátor je usazen na dvou podpěrných konstrukcích s válečkovou podpěrou. Válečková podpěra je tvořena dvěma řadami válečků pootočených vůči sobě o 90° a také umožňuje posuv 90 mm ve dvou osách při dilataci hlavního cirkulačního potrubí vlivem změny teploty. Posuv je dán velikostí mezery mezi táhlem pevně zakotveným v betonovém podstavci a stěnou otvoru v patce parogenerátoru. Každý parogenerátor je bočně ve dvou místech opatřen hydraulickými tlumiči GERB, které zachycují jeho vibrace při působení seismicity. [9]



Obr. 31 Ukotvení PG [9]

- 1 – plášť PG, 2 – konzola, 3 – kotvení do stavby, 4 – viskózní tlumič GERB, 5 – patka PG, 6 – táhlo, 7 – kotevní šroub, 8 – základová deska, 9 – střední desky, 10 – horní desky, 11 – váleček

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce s názvem „Parogenerátory tlakovodních reaktorů“ se zabývá jednotlivými konstrukčními řešeními parogenerátorů.

První kapitola popisuje historii ruského jaderného průmyslu. Popisuje počátek od první soběstačné jaderné řetězové reakce, přes vývoj bomb, ponorek a ledoborců až k využití jaderné reakce pro výrobu elektřiny formou jaderné elektrárny.

Druhou kapitolou se všeobecně rozšiřují poznatky vývoje tlakovodních reaktorů. Primárně je rozdělena na vertikální PG a horizontální PG. Jsou popsány různé konstrukce jak z Ruska, tak i USA. Posledním parogenerátorem v kapitole je VVER 1000, který je podobně probrán v další části.

Třetí kapitola je úzce zaměřena na PG VVER 1000 z hlediska konstrukčního uspořádání. Jsou zde popsány jednotlivé části PG. Většina částí je znázorněna na obrázcích, které byly získány z vytvořeného 3D modelu.

Součástí práce je 3D model parogenerátoru. Jedná se o typ PG VVER 1000 V-320, který je umístěn v JE Temelín. Model byl vytvořen v programu Autodesk Inventor 2015 a je v měřítku 1:1. Rozměry komponent, které nebyly známy, byly odvozeny pomocí rozměru sousedících komponent. Tento model bude sloužit jako učební pomůcka v projektu Cenelín.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Rosatom* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://www.rosatom.ru/en/nuclear_industry/history/.
2. *Lichnosti* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://lichnosti.net/photo_23947.html.
3. *io9* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://io9.com/5988266/the-tragic-story-of-the-semipalatinsk-nuclear-test-site>.
4. *Pravda* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://english.pravda.ru/society/stories/11-09-2012/122128-ussr_nuclear_submarine-0/.
5. *Icjt* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.icjt.org/en/jedrska-tehnologija/zgodovina-jedrske-tehnologije/>.
6. *GlobalSecurity* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.globalsecurity.org/military/world/russia/92m.htm>.
7. JANEBA, MARVAN. *Parní generátory a potrubní sítě jaderně energetických zařízení*. Praha : Ediční středisko ČVUT, 1990. ISBN 8001003779.
8. др., Б. И. Лукаевич и. *Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций*. místo neznámé : DJVU, 2004. str. 229. ISBN 5-94628-178-X.
9. STANĚK, V. *Porovnání a hodnocení konstrukčních uspořádání PG*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007.
10. KOLEKTIV AUTORŮ. *Zvyšování spolehlivosti a bezpečnosti parogenerátorů jaderných elektráren*. Ostrava : Dům techniky ČSVTS Ostrava, 1984. ISBN NEUVEDENO.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Igor Kurchatov [2]	13
Obr. 2 H-bomba [3]	13
Obr. 3 První jaderná ponorka [4]	13
Obr. 4 První jaderná elektrárna [5]	14
Obr. 5 Nukleární ledoborec [6].....	14
Obr. 6 Schéma PG JE Ohninsk 1956 [8] [7].....	16
Obr. 7 Konstrukce Ekonomizéru a přehříváku PG JE Obninsk [8] [7]	16
Obr. 8 Konstrukce výparníku PG JE Obninsk [8] [7].....	17
Obr. 9 PG JE Shippingport (USA) s přímými varnicemi [8] [7].....	18
Obr. 10 PG JE Shippingport (USA) s vlásenkovými varnicemi [8] [7]	18
Obr. 11 Vertikální PG JE Dimitrovgrad [7]	19
Obr. 12 Vertikální varianta PG k PWR s vlásenkovou výhřevnou plochou [7].....	20
Obr. 13 Vertikální varianta PG k PWR s vlásenkovou výhřevnou plochou s ekem [7]	20
Obr. 14 Vertikální PG k VVER 1000 - SSSR [7].....	21
Obr. 15 Průtočný PG fy BBR [7].....	22
Obr. 16 Posuv hranic mezi pásmem dohřívání, vypařování a přehřívání při změně výkonu [7].....	22
Obr. 17 Průtočný PG k PWR systém "Trépaud" [7].....	23
Obr. 18 PG novovoronežského typu varianta I. [7].....	25
Obr. 19 PG novovoronežského typu varianta III.(VVER 440) [7].....	25
Obr. 20 Plášť PG VVER 1000.....	26
Obr. 21 Separální děrovaný plech.....	27
Obr. 22 Ponořený děrovaný plech	28
Obr. 23 Parní potrubí	28
Obr. 24 Přívod napájecí vody	29
Obr. 25 Přívod napájecí vody ve 3D modelu.....	29
Obr. 26 Rozvod napájecí vody	30
Obr. 27 Havarijní napájecí voda	30
Obr. 28 Odluh	31
Obr. 29 Trubkový svazek.....	31
Obr. 30 Primární kolektor.....	33
Obr. 31 Ukotvení PG [10].....	33

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Obrázek vnějšího pohledu s popisky

Příloha 2 - Obrázek vnitřního pohledu s popisky

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ

PG	Parní generátor
JE	Jaderná elektrárna
PG VVER 1000	Parní generátor pro JE s reaktorem VVER 1000 typu V-320-č (Temelín)
KHP	Kontrola hladiny vody v parním generátoru
VVER	Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor
PWR	Pressurized water reactor
SSSR	Sovětský svaz
USA	Spojené státy americké
°C	stupeň Celsia
%	procento
α	teplotní součinitel elektrického odporu
kg	kilogram
t	tuna
mm	milimetr
m	metr
m ²	metr čtverečný
s	sekunda
KWt	kilowatt tepelný
MW	megawatt
MWt	megawatt tepelný
MWe	megawatt elektrický
GW	gigawatt
MPa	megapascal

Tab. 2 Použité zkratky, symboly