

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní
Katedra energetiky

Kompenzátor objemu
pro jadernou elektrárnu VVER-1500 + III generace

Nuclear Power Plant Pressurizer

Student:

Jiří Janošík

Vedoucí bakalářské práce:

prof.Ing.Pavel Kolat, DrSc

Ostrava 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Janošík**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R004 Provoz a řízení v energetice
Téma: **Kompenzátor objemu jaderné elektrárny
Nuclear Power Plant Pressurizer**

Zásady pro vypracování:

Na základě rešerše literatury popište koncepci kompenzace objemu v jaderných elektrárnách tlakovodního typu a zejména VVER 1500 III+ generace.

Sestavte výpočtový model a navrhňte elektroohříváče.

Tepelný výkon jaderné elektrárny	4350 MWt
Parní výkon	8840 t/hod
Tlak syté páry	7,8 MPa
Teplota chladiva v I. okruhu	298,5/330,7 oC
Tlak v I. okruhu	16,2 MPa

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] RÉDR,M., PŘÍHODA,M. *Základy tepelné techniky*.Praha.SNTL, 1991
ISBN 80-03-00366-0
- [2] SADIK KAKAC. *Boilers, evaporators, condensers*. John Wiley. USA.New York 1991
CIP 90-22486 v knihovně VŠB.
- [3] HEJZLAR,R. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*, Díl.1,2. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005.
ISBN 80-01-03190-X.

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: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
vedoucí katedry





prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

Jiří Janošík

Prohlašuji, že

- Byl jsem 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 vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou 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 přiměřený 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 :.....

.....

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

JANOŠÍK, J. Kompenzátor objemu pro jadernou elektrárnu VVER-1500+III generace. Ostrava: katedra Energetiky, Fakulta strojní VŠB-Technická universita Ostrava, 2010, 47.str, Bakalářská práce, vedoucí prof.Ing.Pavel Kolat, DrSc.

Bakalářská práce se zabývá součástí, Kompenzátorem objemu, je v jaderné elektrárně umístěný výše než primární okruh a má za úkol vyrovnávat tlakové, objemové změny, které vznikají vlivem tepelných dilatací chladiva. V úvodních částech je popsáno rozdělení tlakovodních reaktorů, se kterými může kompenzátor objemu pracovat. V další části je návrh elektroohříváčů, které jsou umístěné ve spodní části kompenzátoru objemu a mají za úkol zvednout tlak dojde-li k poklesu pod stanovenou hladinu.

ANOTATION OF THESIS

JANOŠÍK J. Pressurizer for nuclear power plant VVER-1500+III generation. Ostrava: Department of Power Engineering, Faculty of mechanical engineering VŠB-Technical univerzity of Ostrava, 2010, 47 pages, Thesis, head: prof.Ing.Pavel Kolat, DrSc. Thesis is dealing of component called Pressurizer. This part is located above the primary circuit and has the task of match pressure, volume changes that arise due to thermal dilatation of coolant. In the first part of this thesis is written about division of waterpressure reactors, with witch the pressurizer can work. In the next part there is a concept of electroheating proposal, which is located at the bottom of the volume compensator and are designed to raise the pressure if there is a fall below the target level.

Obsah bakalářské práce :

1. Úvod.....	10
1.1 Reaktory a jejich generace.....	11
1.1.1 I Generace.....	11
1.1.2 II Generace.....	12
1.1.3 III Generace.....	13
1.1.4 +III Generace.....	14
2. Systém kompenzace objemu.....	16
2.1 Popis součástí jaderné elektrárny VVER.....	18
3. Kompenzátor objemu s plynovým polštářem.....	19
3.1 Popis.....	19
3.2 Schéma zapojení.....	20
3.3 Informativní výpočet potřebného plynu.....	21
4. Kompenzátor objemu s parním polštářem.....	22
4.1 Popis zapojení.....	22
4.2 Schéma zapojení	23
4.2.1 Výkres kompenzátoru objemu.....	24
5. Matematický model KO VVER 1500.....	25
5.1 Popis modelu kompenzátoru objemu	26
5.2 Matematický model.....	27
5.2.1 Popis nerovnovážného stavu.....	28
5.2.2 Popis rovnovážného stavu.....	32
5.3 Vstupní údaje KO VVER 1500.....	33

6. Návrh elektroohříváků.....	35
6.1 Maximální výkon elektroohříváčů.....	35
6.2 Návrh svislých trubkových elektroohříváčů umístěných ve spodním dně....	36
6.2.1 Výpočet elektroohříváčů	37
6.2.2. Kontrola pracovní teploty elektroohříváčů a tepelných toků	38
6.2.3 Návrh ocelového pláště TEO.....	39
6.2.4 Volba počtu TEO.....	41
7. Závěr.....	44
7.1 Seznam obrázků a tabulek.....	45
7.2 Použité zdroje literatury.....	46

Seznam použitých veličin

<u>Zkratka</u>	<u>Název</u>	<u>Jednotka</u>
λ	součinitel přestupu tepelné vodivosti	$W \cdot m^{-1} K^{-1}$
v_I	měrný objem na počátku kroku	$m^3 \cdot kg^{-1}$
v''	měrný objem na konci kroku	$m^3 \cdot kg^{-1}$
T_I	teplota vodní hladiny	$^{\circ}C$
T''	teplota páry	$^{\circ}C$
R_p	mez kluzu	MPa
R_m	mez pevnosti	MPa
n_p	koeficient mezi v kluzu	-
n_m	koeficient mezi pevnosti	-
n	počet elektroohříváčů	-
m_2	změna množství vody	$kg \cdot s^{-1}$
m_1	změna množství páry	$kg \cdot s^{-1}$
L	délka topného odporu	mm
i'	entalpie syté vody	$J \cdot kg^{-1}$
i''	entalpie syté páry	$J \cdot kg^{-1}$
h	stoupání spirály	mm
d_s	střední průměr spirály	mm
d	průměr	mm
C	měrné teplo FE	$KJ \cdot kg^{-1} K^{-1}$
p	provozní tlak	MPa
Δp_{max}	maximální tlakový rozdíl	MPa
ΔV_{max}	maximální změna objemu	MPa
Q_{vp}	Změna objemu vytlačeného I chladiva	$m^3 \cdot s^{-1}$

\dot{m}_s	hmotnost vody ze sprchového systému	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_p	hmotový tok vody z I okruhu	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
V_p	výpočet potřebného plynu	m^3
\dot{m}_{ch}	hmotnost zkondenzované vody na sprchových kapkách	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_e	pára vzniklá činnosti elektroohřívачů	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
P_I	tepelný výkon z páry do stěny	W
\dot{m}_K	hmotový tok zkondenzované vody	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_h	kondenzace na hladině	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
P_{II}	tepelný výkon z páry na hladinu	W
\dot{m}	celková změna množství hmoty	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
P_{III}	odvedený tepelný výkon z vody do stěn	W
α	součinitel přestupu tepla	$\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
S_I	je plocha stěn KO nad hladinou a je funkcí výšky hladiny	m^2
S_{II}	plocha hladiny	m^2
S_{III}	je plocha stěn KO pod hladinou	m^2
P_{IV}	tepelný výkon dodávající z páry do stěny	W
\dot{T}_s	střední teplota stěny	$^{\circ}\text{C}$
C_s	měrná tepelná kapacita	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
\dot{p}	časová změna tlaku	$\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$
P_e	výkon elektroohřívачů	W
Q_j	výkon jednoho elektroohřívачe	W
ld	navrhovaná délka topného odporu	cm
Q	zdrojové teplo	$\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$
P_1	tepelný výkon na povrchu vodiče	$\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$
dU	úbytek napětí	V
Ro	měrný odpor	$\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$
dU_1	velikost napětí	V

h	stoupání spirály	mm
I	proud	A
R	odpor	Ω
$ld1$	vypočtená délka topného odporu	cm
$tstř$	střední pracovní teplota	$^{\circ}\text{C}$
σDp	dovolené napětí mezi kluzu	MPa
σDm	dovolené napětí mezi pevnosti	MPa
σD	dovolená napětí	MPa
sr	výpočtová tloušťka stěny dna	mm
K	součinitel	-
DR	výpočtový průměr	mm
sN	nominální tloušťka stěny dna:	mm
sR	výpočtová tloušťka stěny válcového pláště	mm
lc	vzdál. mezi vnějšími nátrubky	mm
dc	max. průměr vnějšího nátrubku	mm
$R1$	poloměr 1. roztečné kružnice	mm
$R2$	poloměr 2. roztečné kružnice	mm

1. Úvod

V moderní době je trendem stále stoupající spotřeba elektrické energie. Díky tomu se nutně musí zefektivňovat její výroba. V současnosti nejúčinnější volbou je použití jaderných elektráren.

Představme si, že by se Česká republika rozhodla postavit další jaderné reaktory. Podívejme se, jaké možnosti výběru v současnosti má a bude mít v nejbližší budoucnosti. Tato skutečnost byla hlavním aspektem pro výběr mé bakalářské práce a to návrh objemového kompenzátoru pro jadernou elektrárnu VVER 1500. Reaktory VVER jsou významným krokem směrem k větší bezpečnosti a lepším ekonomickým parametrům ve využívání jaderné energetiky. Tlakovodní reaktory tohoto typu by mohly být využity při dostavbě jaderné elektrárny Temelín na původně plánovanou kapacitu čtyř reaktorů.

V úvodu jsem svou bakalářskou práci zaměřil na popsání všech generací reaktorů, dále se již zabývám samotným kompenzátorem objemu. V rámci státního úkolu "Parogenerátor a kompenzátor objemu" byl odvozen matematický model stavu parního kompenzátoru objemu (KO) pro řešení havarijních a provozních situací. Je zde popsáno matematické modelování přechodových procesů v systému kompenzace chladiva. Hlavní část této práce obsahuje návrh elektroohříváčů, které jsou umístěny ve spodním dně kompenzátoru objemu a mají za úkol kompenzovat tlak dojde-li k poklesu nad stanovenou hladinu.

1.1 Reaktory a jejich generace

1.1.1 I Generace

Reaktory I generace se stavěly hlavně v padesátých a šedesátých letech. Velice často se jednalo o kusové prototypově stavěné reaktory. V podstatě se ověřovalo, zda je možné používat jaderné reaktory k výrobě elektrické energie. Dnes už žádný z nich nefunguje. Reaktory Magnox se stavěly ve Velké Británii. Bylo postaveno 11 elektráren s 26 reaktory tohoto typu. Jednalo se o reaktory s grafitovým moderátorem, chlazené oxidem uhličitým a používající jako palivo přírodní uran bez obohacení. Byly využívány i pro produkci plutonia. Reaktor byl předchůdcem nové generace plynem chlazených reaktorů.

tab. 1.1. Vývoj reaktoru

I	II	III	III+
VVER-440	VVER-440	VVER-1000	VVER-1000
V-179	VVER-1000	V-428	VVER-1200
V-230	VVER-187	V-412	V-392
V-270	VVER-213	V-446	V-491
	VVER-302		V-501
	VVER-320		
	VVER-338		
1960	1970	1980	1990
2000	2010		
Obnisk 1	LWR, PWR	System 80+	ESWBR
Shippigport	BWR	ABWR	APWR
Dresden	CANDU		EPR
Fermil	RBMK		AP 1000
Magnox	AGR		SFR

1.1.2. II Generace

Většina reaktorů dodávajících elektrickou energii v současnosti jsou reaktory generace II. Navazovaly na zkušenosti s úspěšnými modely generace I. Elektrárny se už stavěly v sériích, i když každá byla jednotlivě projektována a konstruována. Využívaly však stejné principy a projekty na sebe navazovaly. Zdaleka největší počet z nich jsou lehkovodní tlakové reaktory, které tvoří více než polovinu pracujících reaktorů. Paří mezi ně i reaktory VVER-440 a VVER-1000, které jsou využívány v jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín. Jen reaktorů VVER bylo ve světě postaveno více než sedmdesát. Druhými nejčastěji využívanými reaktory jsou lehkovodní varné reaktory. Kanada svoji jadernou energetiku postavila na těžkovodních reaktorech typu CANDU. Velká Británie vyvinula na základě zkušeností s reaktory Magnox grafitové reaktory AGR chlazené opět oxidem uhličitým. V Rusku se kromě lehkovodních reaktorů typu VVER stavěly i grafitové reaktory s vodním chlazením typu RBMK.

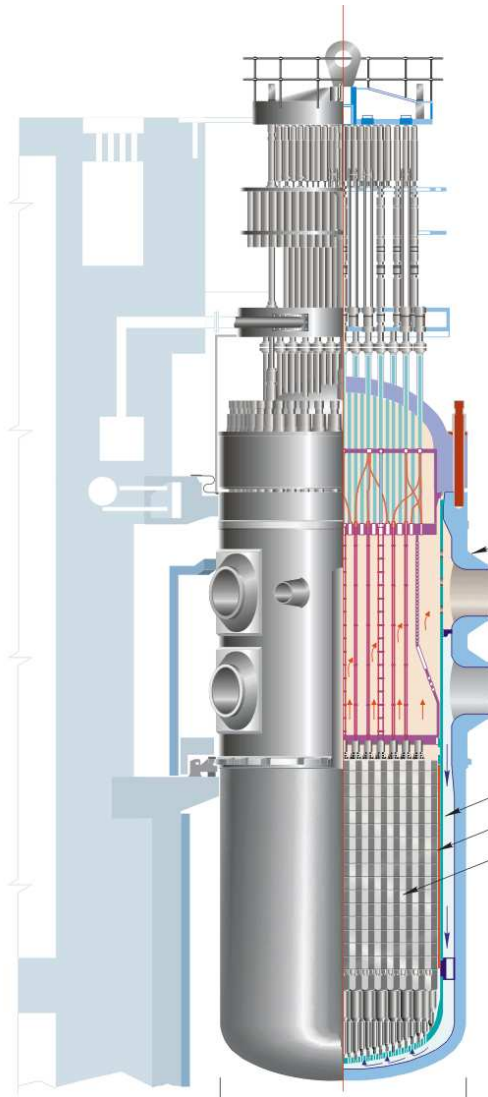
tab. 1.2. Rozdělení reaktoru podle chlazení

Typ reaktoru	Moderátor	Chlazení	Označení
Tepelný	Lehká voda	H ₂ O	Tlakovodní (PWR)
			Varné (BWR)
	Těžká voda	D ₂ O	Těžkovodní CANDU (PHWR)
		H ₂ O	Těžkovodní, chlazený obyčejnou vodou (HWLWR)
		CO ₂	Těžkovodní, chlazený plynem (HWGCR)
	Grafit	He	Vysokoteplotní (HTGR)
		CO ₂	Plynem chlazené (GCR) a zdokonalené (AGR)
H ₂ O		Vodou chlazený (LWGR)	
Rychlý	Bez moderátoru	Na	Rychlý množinový (FBR)

1.1.3 III Generace

Reaktory fungují spolehlivě a jsou ekonomicky výhodným zdrojem elektrické energie. Je kladen důraz na pasivní bezpečnostní prvky. Řešení nestandardních či krizových situací probíhá automaticky na základě přírodních zákonitostí a nepotřebuje elektrický či mechanický zásah operátora nebo kontrolního systému. Je založeno na gravitaci, přirozeném proudění, odolnosti proti tlaku či teplotám. Reaktory mají jednodušší a robustnější konstrukci to umožňuje zjednodušení provozu a větší odolnost proti lidským chybám. Velmi silně se redukovala možnost nehod s roztavením jádra. Zmenšení spotřeby uranu i objemu radioaktivního odpadu umožňuje vysoké vyhoření paliva.

obr.1.1. Reaktor VVER



tab.1.3. Typy reaktorů

TYPY REAKTORŮ		
ABWR AGR APS-1	BWR CANDU	CANDU-B
EPR	FBR FBR (Phénix)	FBR-80
FBR (Super-Phénix)	FBR-600	HTGR
GCHWR	GCR	OPR
HWLR	KS-150 (A1)	(CANDU -6)
PHWR	PHWR 700	RBMK 1000
PWR	RBMK	VVER 440 (V 213)
RBMK 1500	SGHWR	VVER 440 (V 230)
VVER 1000	VVER 1200	VVER 1500

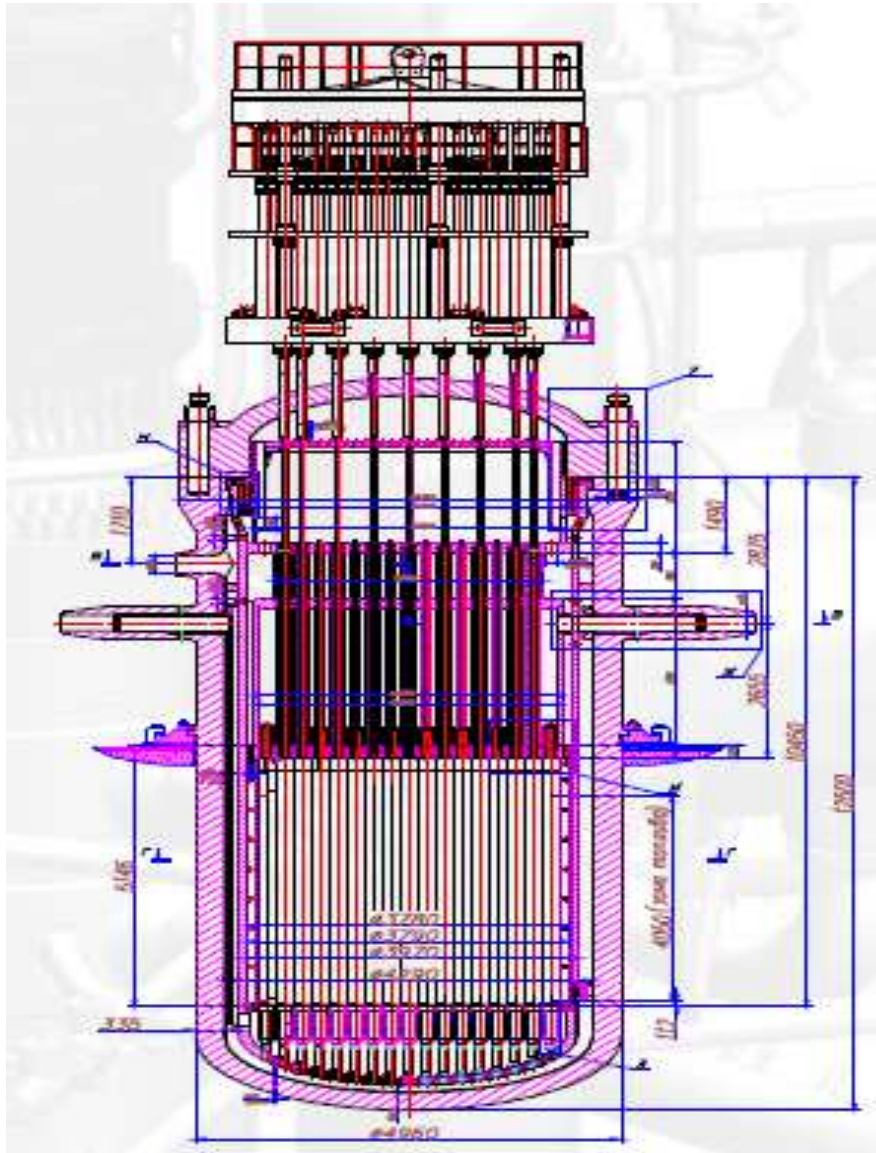
1.1.4 +III Generace

Jako generace III+ se označují reaktory, které mají vylepšené prvky pasivní bezpečnosti tak, že se v případě nestandardní situace reaktor dostane do bezpečného stavu automaticky bez pomoci aktivních částí. Zároveň dochází k dalším vylepšením jejich vlastností. V různém stupni rozpracovanosti je několik projektů tohoto typu reaktorů. Pokročilý lehkovodní varný reaktor typu ABWR , který začal pracovat v elektrárně Japonsku, je na rozhraní mezi generací III a III+ .Má výkon 1356 MWe .Ve Finsku a Francii se jedná o reaktor typu EPR s výkonem mezi 1600 až 1750 MWe. V Rusku se vyvíjí nový typ lehkovodního tlakového reaktoru na základě posledních osvědčených modelů VVER-1000 , vylepšených hlavně z bezpečnostního hlediska. Tento model VVER-1000 se staví v současnosti v Číně a Indii.

Typ VVER-1200 by měl splňovat parametry reaktoru třetí generace s velmi

dobrymi pasivnimi bezpecnostnimi prvky. Reaktor by mel mit zvyšenou odolnost proti zemětřesení a pádu letadla. Typ VVER-1500 by se měl uplatnit v elektrárně Novovoronež II. s plánovaným spuštěním v letech 2012-13.

obr.1.2 Reaktor VVER 1500



2. Systém kompenzace objemu

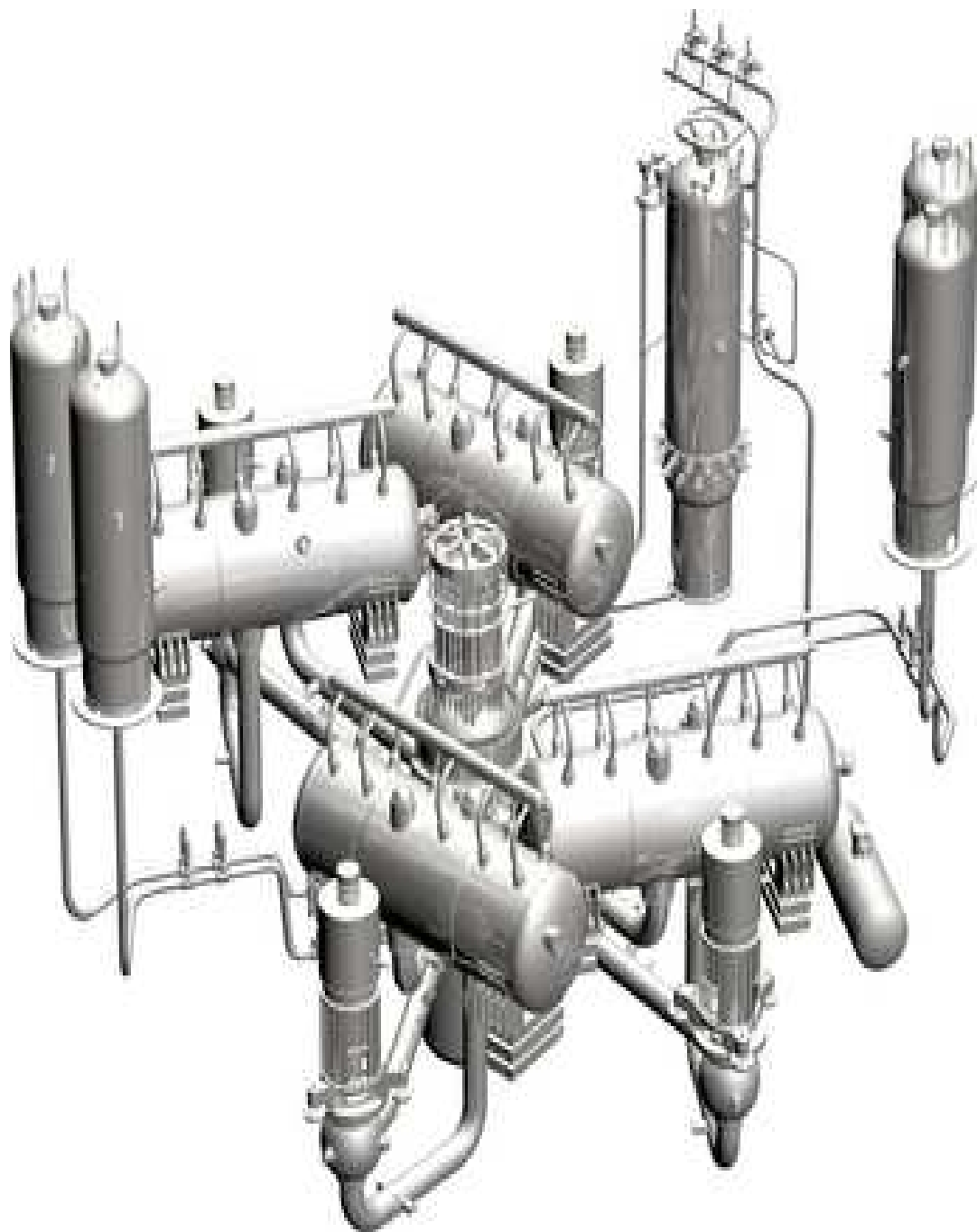
Systém kompenzace objemu chladiva jaderného reaktoru je nezávislým systémem reaktoru, připojený k primárnímu okruhu. Systém vyrovnává objemové a tlakové změny v primárním okruhu, které vznikají vlivem tepelných dilatací chladiva.

Hlavní částí systému je kompenzátor objemu. Plní funkci regulátoru tlaku a objemu kapalného chladiva v primárním okruhu. Ze dvou třetin je zaplněn chladivem primárního okruhu a z jedné třetiny parou. Tlak v primárním okruhu je určován tlakem páry v horní části kompenzátoru objemu. Při poklesu tlaku v primárním okruhu se zapínají elektroohříváky ve spodní části kompenzátoru objemu. Tím se zvětší objem páry v horní části kompenzátoru objemu a v důsledku toho i tlak v primárním okruhu. Při vzrůstu tlaku v primárním okruhu nad stanovenou hladinu je do činnosti uveden sprchový systém v horní části kompenzátoru. Jeho provozem se zmenší objem páry v parní části kompenzátoru a následně se sníží tlak v primárním okruhu. Pokud by systém nezajistil potřebné snížení tlaku v primárním okruhu, došlo by k otevření odlehčovacího ventilu a popřípadě i pojistných ventilů. Přes tyto ventily se pára přepouští do barbotážní nádrže, kde kondenzuje a při delším otevření pojistných ventilů přechází do záchytných bazénů v hermeticky uzavřených prostorách. Výrobce kompenzátoru objemu v České republice je firma VÍTKOVICE a.s.

Systém kompenzace obsahuje:

- kompenzátor objemu
- pojistné ventily
- barbotážní nádrž
- spojovací potrubí a armatury
- omezovací zařízení havarijních účinků

obr. 2.1 Schéma jaderné elektrárny VVER-1500



2.1 Popis součástí jaderné elektrárny VVER

Jaderný reaktor - v jaderném reaktoru dochází k štěpení jader uranu a v palivu se uvolňuje energie, která se mění na teplo ohřívající vodu v primárním okruhu. Regulační kazety umožňují regulaci neutronového toku. V případě nestandardních situací slouží k okamžitému zastavení štěpné reakce. Složí na změny výkonu reaktoru.

Kompenzátor objemu - je tlaková nádoba systému kompenzace objemu, kterým se zabezpečuje následné udržení provozního tlaku v primárním okruhu.

Sprchy kompenzátoru objemu slouží ke snížení tlaku v primárním okruhu. Do kompenzátoru se vstříkuje voda ze studené větve cirkulačního okruhu.

Elektroohříváče slouží ke zvýšení tlaku v primárním okruhu. Jejich zapnutím se přehřívá vodní náplň kompenzátoru objemu, čímž roste tlak v primárním okruhu.

Barbotážní nádrž - je válcová nádoba sloužící na příjem a kondenzaci parovzdušné směsi z kompenzátoru objemu.

Parogenerátor - je tepelný výměník, který využívá energii uvolněnou v reaktoru na výrobu nasycené páry. Pára dále pohání turbínu.

Turbína - v turbíně se přeměňuje na lopatkách rotoru tepelná a kinematická energie páry na energii mechanickou.

Separátor - a přehříváč je válcová nádoba, kde se pára přicházející z vysokotlakého dílu turbíny zbavuje vlhkosti a přehřívá nad teplotu sytosti, čímž se zvyšuje účinnost pracovního cyklu.

Elektrický generátor - je pevně spojený s rotorem turbíny a slouží na přeměnu mechanické energie na energii elektrickou.

Kondenzátor - slouží na zkapalnění par z turbíny. Pára kondenzuje na vnějším povrchu trubek, v kterých protéká voda z chladících věží.

Vysokotlaká regenerace - napájení vody se skládá ze dvou vertikálních nádob, které slouží k ohřevu vody, čímž se zvýší tepelná účinnost pracovního cyklu.

Nízkotlaká regenerace - kondenzátu se skládá z pěti vertikálních nádob, které slouží k postupnému ohřevu kondenzátu, čímž se zvyšuje účinnost pracovního cyklu.

Chladicí věže - v nich se voda ochlazuje, z kondenzátorů přebytečné nevyužitelné teplo je odváděno do atmosféry. Kondenzát vznikající z páry je vedený do napájecí nádrže a odtud napájecími čerpadly zpět do parogenerátoru, kde se znovu změní na páru a proudí do turbíny.

3. Kompenzátor objemu s plynovým polštářem

3.1 Popis

Plynovým polštářem pro kompenzátor objemu je nejčastěji dusík, který je nad hladinou vody a v primárním okruhu umožňuje svou stlačitelností vyrovnávání tepelných dilatací vody.

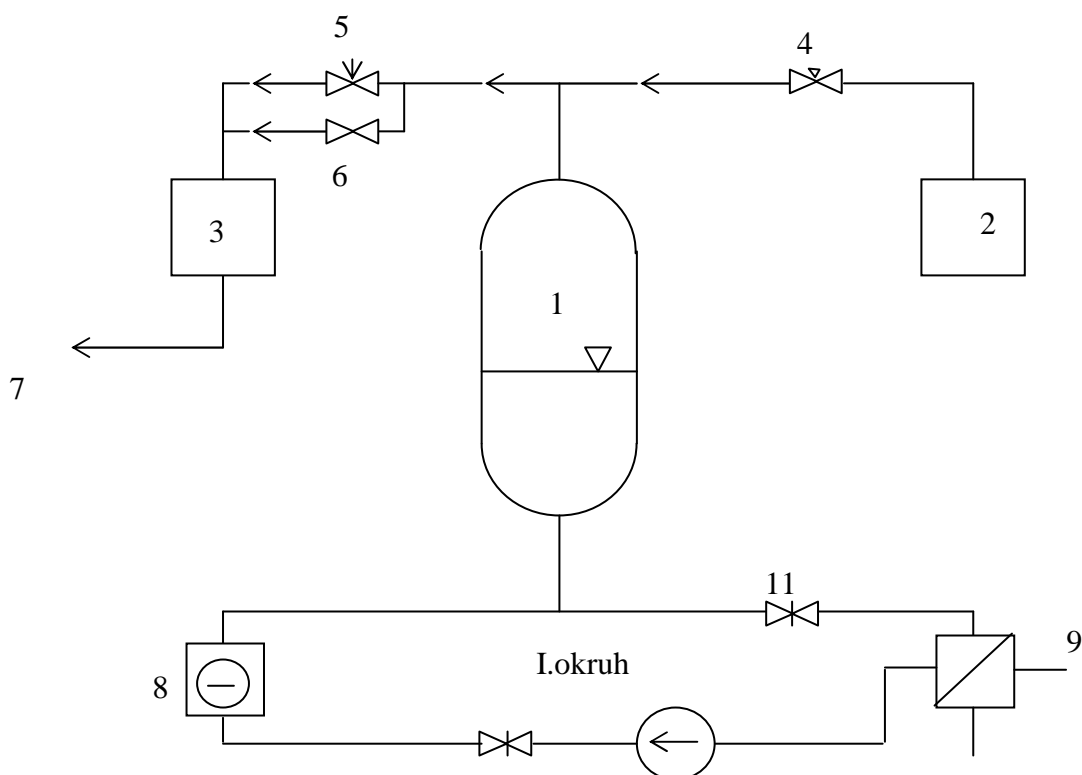
S plynovým polštářem byly postaveny například čtyři kompenzátory objemu u 1. bloku novovoroněžské jaderné elektrárny, který je však již vyřazen z provozu. Dusík, který je ze vhodných plynů nejvhodnější se však u kompenzátoru objemu s parním polštářem stále používá při najíždění reaktoru ze studeného stavu, při jeho odstavování a během provozu k ředění třaskavé směsi v barbotážní nádrži. U všech později postavených reaktorů typu VVER se používají kompenzátory objemu s parním polštářem.

Při provozu reaktoru, změnách jeho výkonu, najíždění a odstavování, dochází k přechodové nebo trvalé změně teploty chladiva, ke změně jeho objemu, a tím ke změně tlaku chladiva v uzavřeném primárním okruhu. Aby bylo možno regulovat tyto změny tlaku, umísťuje se nad primární okruh tlaková nádoba s plynovým nebo parním polštářem zvaná kompenzátor objemu. Je spojena potrubím s primárním okruhem a při zvýšení teploty a zvětšení objemu může část chladiva přetéci do kompenzátoru objemu, přičemž dochází ke stlačení plynového nebo parního polštáře. Při snížení teploty v primárním okruhu odtéká voda z kompenzátoru do primárního okruhu.

Kompenzátory objemu jsou nutné pouze u tlakovodních reaktorů. Parní objem reaktoru nebo bubnu zastává jeho funkci u varných reaktorů a slouží jako separátor vlhkosti a páry. Kompenzátor objemu u tlakovodního reaktoru musí být připojen k neodpojitelné části jedné smyčky primárního okruhu. Tedy mezi reaktor a hlavní uzavírací armaturu, aby při uzavření hlavních uzavíracích armatur na příslušné smyčce nemohlo dojít k oddělení KO od reaktoru.

Kompenzátor objemu s plynovým polštářem používá obvykle jako polštáře dusíku. Z inertních plynů by byl vhodným též argon, ale je drahý. Určité problémy při použití dusíku jsou v souvislosti s jeho pronikáním do primární vody s možností vzniku kyseliny dusičné, která způsobovala korozi. To se řešilo korigováním vodního režimu primárního okruhu přidáváním čpavku a použitím katexu v NH_4 -formě při úpravě vody primárního okruhu.

3.2 Schéma zapojení kompenzátoru objemu s plynovým polštářem



- 1- kompenzátor objemu
- 2- zásobní nádrž dusíku
- 3- nádrž na odvedené plyny z KO
- 4- regulační ventil pro připouštění dusíku do KO
- 5- pojistné ventily
- 6- přepouštěcí ventily
- 7- odvod přes filtry do komína
- 8- reaktor
- 9- parní generátor
- 10- hlavní cirkulační čerpadlo
- 11- hlavní uzavírací armatury

Při zvyšování teploty chladiva a zvyšování výkonu reaktoru stoupá hladina a tlak v kompenzátoru objemu. K udržení tlaku se odvádějí plyny z KO přes přepouštěcí ventily, při velkém vzrůstu tlaku případně i přes pojistné ventily do nádrže na odvedené plyny, odkud se po určité době mohou vypouštět po snížení aktivity do komína. Při snižování teploty a objemu chladiva v I. okruhu dojde ke snížení hladiny tlaku v KO. Vyrovnávání se děje připouštěním dusíku do KO přes regulační ventily ze zásobníků dusíku, které mohou být doplňovány například kompresorem.

3.3 Předběžný informativní výpočet potřebného plynu

Kompenzátor objemu s plynovým polštářem :

-může se provést pomocí rovnice adiabaty:

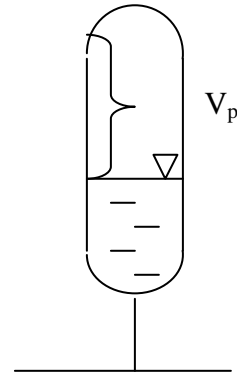
$$p \cdot V_p^\chi = (p + \Delta p_{\max})(V_p - \Delta V_{\max})^\chi$$

$$V_p = \frac{\Delta V_{\max}}{1 - \left(\frac{p}{p + \Delta p_{\max}}\right)^{\frac{1}{\chi}}}$$

p - provozní tlak KO

Δp_{\max} - maximální tlakový rozdíl

ΔV_{\max} - maximální změna objemu chladiva



Nevýhody

1) Dusík se rozpouští ve vodě, vznikají kyseliny dusičná a dusitá, které znesnadňují udržování předepsaného vodního režimu v primárním okruhu.

2) Dusíkové kompenzátory objemu mají větší objem než kompenzátory s parním polštářem.

3) Při průtoku dusíku pojistnými ventily kritickou rychlostí dochází k namrzání vody na sedle ventilu, takže se může stát, že po poklesu tlaku ventil dobře dosedne a tedy nezavře.

4. Kompenzátor objemu s parním polštářem

Těmito kompenzátory jsou vybaveny všechny u nás postavené elektrárny s tlakovodními reaktory.

System kompenzace objemu tlaku chladiva s kompenzátorem objemu s parním polštářem se skládá z těchto hlavních součástí :

- 1) z kompenzátoru objemu
- 2) z barbotážní nádrže
- 3) z pojistných, regulačních a jiných ventilů a příslušenství

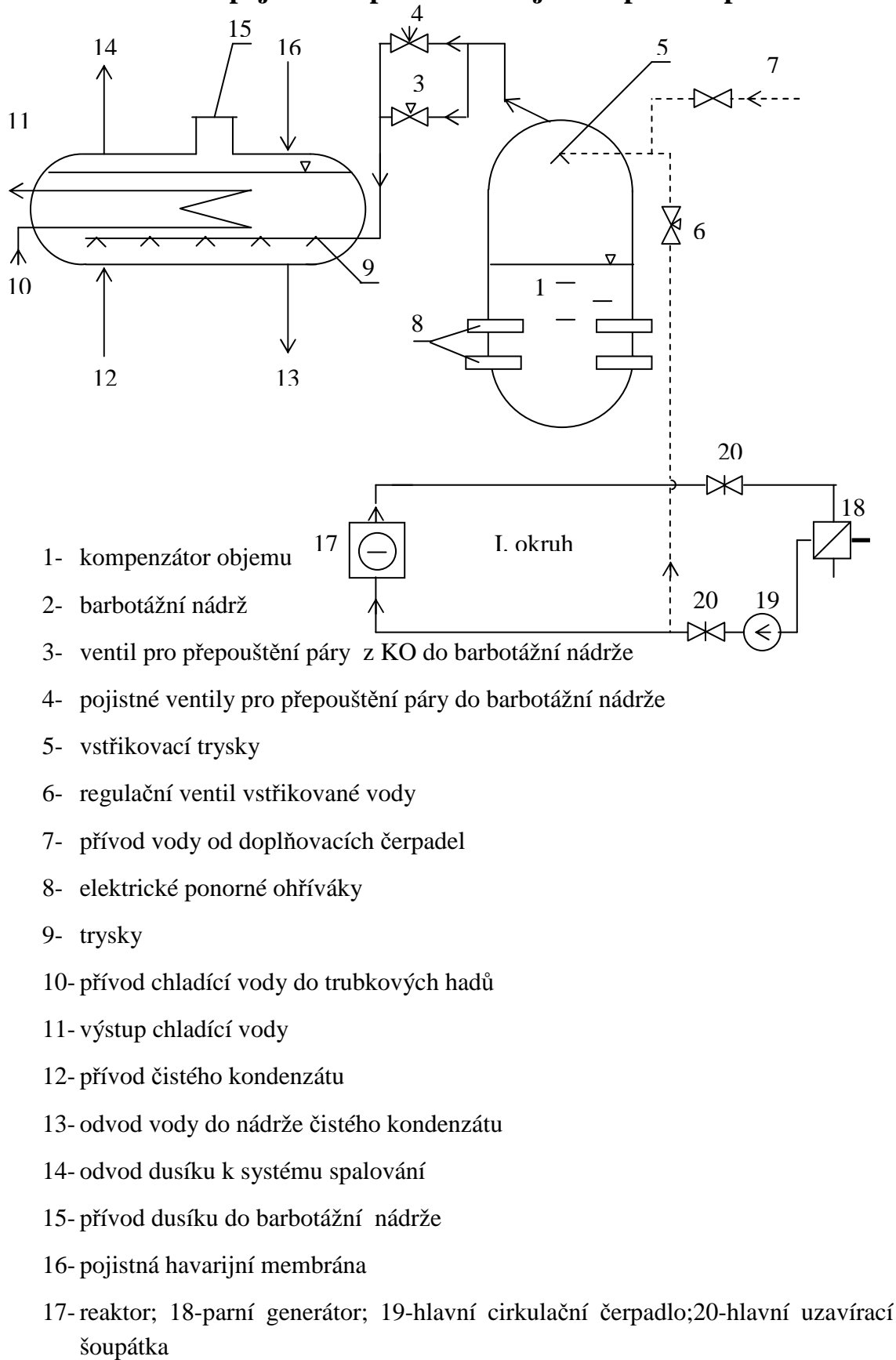
4.1 popis zapojení

Kompenzátor objemu má svůj vodní prostor a je spojen potrubím s jednou ze smyček primárního okruhu. Kompenzátor objemu se nachází výše než primární okruh, shromažďují se v něm plyny uložené v primárním okruhu. Vyrovnávání tlaku v kompenzátoru objemu je prováděno pomocí parního polštáře nad vodní hladinou.

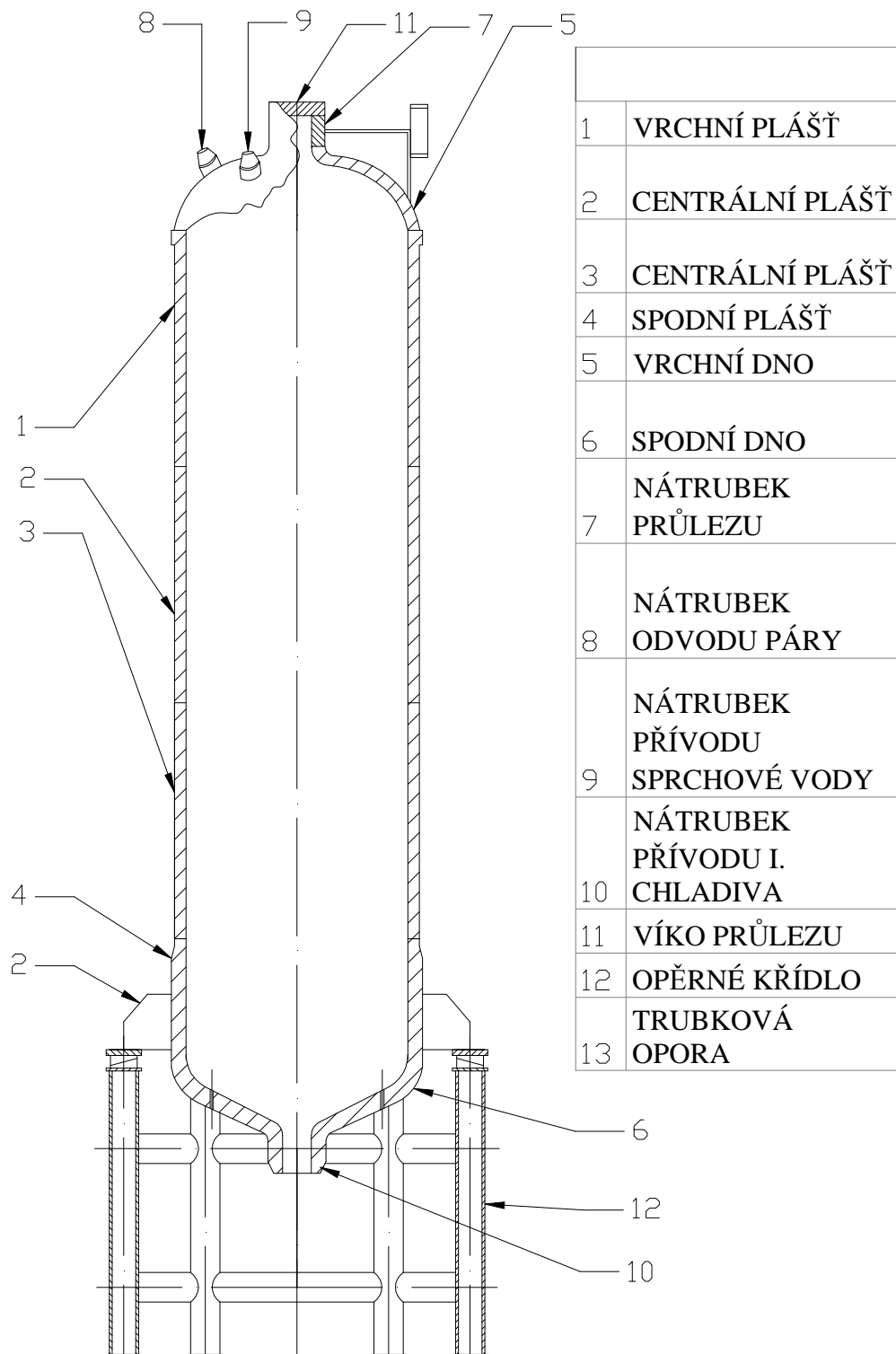
Dojde-li k poklesu tlaku v kompenzátoru objemu, zapnou se automaticky elektrické ohříváky vody, nastává var, vývin páry a tlak stoupá. Po dosažení předepsaného tlaku se ohříváky samočinně vypnou. Naopak jeli zapotřebí tlak snížit, otevře se regulační ventil a voda ze studené větve jedné ze smyček primárního okruhu se rozprašuje tryskami do parního prostoru kompenzátoru objemu. Tím dochází k ochlazení, kondenzaci páry a ke snížení tlaku. V případě velkého zvýšení se samočinně otevrou pojistné ventily a přepustí páru do barbotážní nádrže. Voda v barbotážní nádrži je ochlazována trubkovými hady, jimž proudí voda. Jelikož se do kompenzátoru objemu s párou přivádějí do barbotážní nádrže i jiné nekondenzující plyny, hlavně vodík, vytvářejí třeskavý plyn a koncentrace vodíku je snižována pod 2,5% přívodem dusíku. Vodík s nekondenzujícími plyny je odváděn potrubím na spalovací zařízení.

Pro případ selhání je barbotážní nádrž opatřena pojistnou havarijní membránou, která se při překročení maximálního tlaku protrhne a zabrání prasknutí barbotážní nádrže.

4.2 Schéma zapojení kompenzátoru objemu s parním polštářem

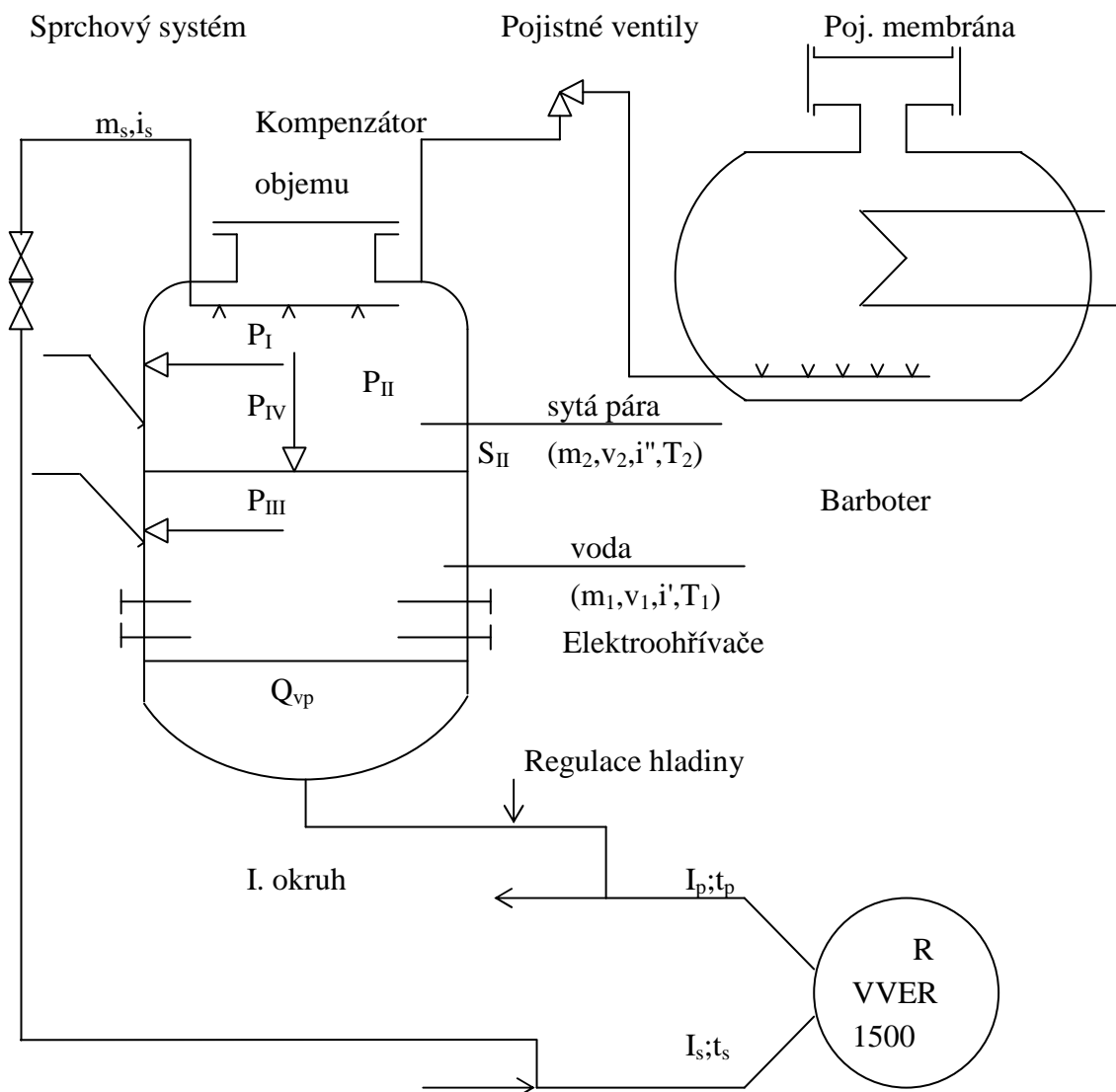


4.2.1 výkres kompenzátoru



5. Matematický model KO VVER 1500

Slouží ke spouštění, k udržování tlaku a omezení výchylek tlaku a objemu při změnách teplotního režimu během normálního provozu a k dochlazování primárního okruhu v režimu odstavení bloku. Dále slouží k pojištění primárního okruhu proti stoupanutí tlaku nad povolenou hodnotu.



5.1 Popis modelu kompenzátoru objemu

KO je součástí systému na udržování tlaku v I okruhu. Kompenzuje teplotní změny objemu I. chladiva v ustálených i přechodových režimech práce bloku. Svou funkcí zajišťuje vytvoření tlaku v okruhu při najíždění, udržování tlaku v zadaných mezích při normálních provozních režimech. Udržení tlaku v mezích podle technologických a pevnostních požadavků se dosahuje pomocí parního obsahu, sprchového systému, pojistných ventilů a elektroohříváčů.

Model KO musí pro potřeby výrobce popisovat podrobněji přechodové procesy než model při vyšetřování bezpečného provozu reaktoru. Při formování bilančních rovnic pro přenos energie a hmoty bylo uvažováno působení I. okruhu na KO s okrajovými podmínkami tak, aby bylo možné vytvořit model dynamiky I. okruhu. Vnitřní objem KO se uvažuje rozdělený na 3 vrstvy s časově proměnným objemem.

- a) chladivo vytlačené z I. okruhu po přechodovém procesu
- b) voda v KO nad vytlačeným chladivem
- c) sytá vodní pára nad hladinou vody

Z toho vyplývá zadání těchto vstupních údajů:

1. časové derivace změny objemu chladiva v I. okruhu
2. entalpie sprchovací vody
3. termodynamických vlastností chladiva vytlačeného z I. okruhu do KO

Voda v KO nad vytlačeným chladivem se skládá z části obsažené v KO už před začátkem přechodového procesu, z části dodané sprchovým systémem, z části způsobené kondenzací na sprchových kapkách, stěnách a hladině. Regulační systém pro udržení hladiny dodává anebo odebírá chladivo přímo z I. okruhu. Hmotnost vody se snižuje při varu v důsledku poklesu výkonu nebo činnosti elektroohříváčů.

V modelu byly uvažovány tyto zjednodušující předpoklady:

- před začátkem přechodového režimu je pára a voda v termodynamické rovnováze
- promísení I. chladiva s vodou se uvažuje a výměna tepla a hmoty rozhraním těchto vrstev je dokonalá

- uvažují se dva rozdílné režimy v závislosti na charakteru poruchy ze strany I. okruhu.

Nerovnovážný režim

Nastává při narušení stacionárního stavu zvětšováním objemu I. okruhu chladiva. Teploty vody a páry jsou rozdílné, tepelný tok na fázovém rozhraní se uvažuje úměrný rozdílu teplot a plochy hladiny. Entalpie vody je nižší než odpovídající entalpie syté vody při daném tlaku.

Rovnovážný režim

Se předpokládá při zmenšování objemu I. chladiva a průtoku vody z KO do I. okruhu. Voda a pára jsou v dokonalé termodynamické rovnováze. Ke změně na rovnovážný režim dojde, když entalpie vody dosáhne hodnotu entalpie syté páry při daném tlaku.

Činnost sprchového, pojistného a ohřívacího systému

Průtok sprchovací vody je zadán jako funkce tlaku v KO a entalpie je funkcí tlaku a teploty ve studené větvi I. okruhu. Průtok páry pojistnými ventily se zadává jako funkce odchylky tlaku od počáteční hodnoty. Entalpie unikající páry je rovna entalpii na horní mezní křivce při daném tlaku. Tepelný výkon elektroohříváčů se zadává rovněž v závislosti na tlaku v KO s předpokladem, že celý tepelný výkon se dodává do vodního objemu.

Výměna tepla se stěnami

V termodynamicky nerovnovážném režimu je výměna tepla mezi párou a stěnami dána předpokladem suché syté páry v parním prostoru. Na vnitřním prostoru vzniká konvekce, kde součinitel přestupu tepla se zadává jako vstupní hodnota. Přestupná plocha je funkcí výšky a hladiny. Vypočítává se střední teplota stěny KO, kde se bere v celková hmotnost KO s jeho tepelnou kapacitou. Venkovní stěna je tepelně izolována

5.2 Matematický model

Pro stanovení časové závislosti termodynamických parametrů chladiva v KO jsou bilanční rovnice pro objem, hmotnost a energii uvažovány s pohyblivými hranicemi s časovou změnou objemu I. chladiva. Při termodynamicky nerovnovážném režimu se bilanční rovnice píšou zvlášť pro parní a vodní objem a uvažuje se vzájemné působení mezi nimi. V rovnovážném stavu se rovnice formují společně pro objem vody a páry v KO.

Parametry KO jsou ovlivňovány:

1. časovou změnou objemu I chladiva Q_{vp} , která je závislá na změně středního tlaku a teploty v I. okruhu - p_I, t_I ; hmotový tok vody z I okruhu je \dot{m}_p , měrný objem V_p
2. tepelný výkonem elektroohříváčů P_e
3. dodávkou sprchovací vody s průtokem \dot{m}_s e entalpií i_s
4. únikem chladiva přes pojistné ventily \dot{m}_v

5.2.1 Popis nerovnovážného stavu

Změna objemu vytlačeného I chladiva je popsána rovnicí :

$$Q_{vp} = f(\tau) = (\dot{m}_p + \dot{m}_r) \cdot v_p = f(p_I, t_I) \quad [\text{m}^3 \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

Zadáva se jako vstupní veličina v závislosti na čase, respektive na středním tlaku a teplotě v I okruhu. Hmotnost vody v KO s I chladivem se zvětšuje dodávkou vody ze sprchového systému a také v důsledku kondenzace páry na vodní hladině, sprchových kapkách a stěnách a snižuje v důsledku odparu při činnosti elektroohříváčů.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_s + \dot{m}_{ch} + \dot{m}_K + \dot{m}_h - \dot{m}_e + \dot{m}_p + \dot{m}_r \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

Hmotnost vody zkondenzované na sprchových kapkách za čas se určí dle vztahu

$$\dot{m}_{ch} = \frac{\dot{m}_s (i' - i_s)}{i'' - i'} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3)$$

kde předpokládáme že na hladinu dopadne sytá voda.

Činností elektroohříváčů vzniká pára

$$\dot{m}_e = \frac{P_e}{i'' - i'} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

Tepelný výkon předcházející z páry do stěny je dán vztahem

$$P_I = \alpha_I \cdot S_I \cdot (T'' - T_S) \quad [\text{W}] \quad (5)$$

kde S_I je plocha stěn KO nad hladinou a je funkcí výšky hladiny. Součinitel přestupu tepla se volí $0,3 \text{ kW/m}^2\text{K}^{-1}$.

Hmotový tok zkondenzované vody ze stěn

$$\dot{m}_K = \frac{P_I}{i'' - i'} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6)$$

Tepelný výkon z páry na hladinu

$$P_{II} = \alpha_{II} \cdot S_{II} \cdot (T'' - T_1) \quad [\text{W}] \quad (7)$$

kde S_{II} je plocha hladiny a součinitele přestupu tepla byl zvolen $100[\text{kW/m}^2\text{K}^{-1}]$.

Na hladině dochází ke kondenzaci

$$\dot{m}_h = \frac{P_{II}}{i'' - i'} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (8)$$

Změnu celkového množství hmoty v KO lze určit podle vztahu

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_s + \dot{m}_v - \dot{m}_p + \dot{m}_r \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9)$$

Odvedený tepelný výkon z vody do stěn je určen vztahem

$$P_{III} = \alpha_{III} \cdot S_{III} \cdot (T_1 - T_s) \quad [\text{W}] \quad (10)$$

kde S_{III} je plocha stěn KO pod hladinou a součinitel přestupu tepla α_{III} je volen $[\text{kW/m}^2 \text{K}^{-1}]$.

Tepelný výkon dodávaný z páry do stěny v nerovnovážném stavu pro její udržení na mezi sytosti určíme

$$P_{IV} = m_2 \cdot \left(\frac{di''}{dp} - v'' \right) \cdot \dot{p} \quad [\text{W}] \quad (11)$$

Pak se změna střední teploty stěny KO se vypočte

$$\dot{T}_s = \frac{P_I + P_{III} + P_{IV}}{C_s} \quad [^\circ\text{C}] \quad (12)$$

kde C_s je měrná tepelná kapacita KO

$$\dot{C}_s = m_K \cdot 0,5 \cdot c_{Fe} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (13)$$

Výsledná diferenciální rovnice pro časovou změnu tlaku páry je

$$\dot{p} = \frac{\dot{m}_2 \cdot v'' - \dot{V}_2}{m_2 \cdot \frac{dv''}{dp}} \quad (14)$$

$$\text{kde} \quad \dot{m}_2 = \dot{m} - \dot{m}_1 = \dot{m}_e - \dot{m}_{ch} - \dot{m}_K - \dot{m}_v - \dot{m}_h$$

Funkce E_3 se definuje jako

$$E_3 = E_1 \cdot \left(\frac{di''}{dp} - v'' \right) - \frac{dv''}{dp} \quad (15)$$

$$E_1 = \frac{v'' - v'}{i'' - i'} \quad (16)$$

Změnu entalpie vody za čas určíme (17)

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{P_e + P_{II} - P_{III} + (\dot{m}_s + \dot{m}_{ch} + \dot{m}_K + \dot{m}_h) \cdot (i' - i_1) + (\dot{m}_p + \dot{m}_r) \cdot (i_p - i_1)}{m_1} + v_1 \cdot \dot{p}$$

Sřední entalpie chladiva v KO

$$i = \frac{m_1 \cdot i_1 + m_2 \cdot i''}{m} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (18)$$

a její změna

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{(m_1 \cdot i_1 + m_1 \cdot \frac{di_1}{dp} + \dot{m}_2 \cdot i'' + m_2 \frac{di''}{dp})m - \dot{m}(m_1 \cdot i_1 + m_2 \cdot i'')}{m^2} \quad (19)$$

Změna výšky hladiny v KO se určí

$$\frac{dL}{d\tau} = (m_1 \cdot \frac{dv_1}{dp} \cdot \dot{p} - v_1 \cdot \dot{m}_1) \cdot S_{II} \quad (20)$$

Přítok (odtok) I chladiva je v modelu řešen jako funkce střední teploty a tlaku v I okruhu a činnosti sprchového systému odebírajícího vodu ze studené větve I okruhu

$$m_p = \frac{V_I \cdot (v_0 - v_1)}{\tau_1 - \tau_0} - \dot{m}_s \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (21)$$

kde V_Iobjem chladiva v I okruhu

V_0měrný objem na počátku kroku

V_1měrný objem na konci kroku

$\tau_1 - \tau_0$ délka kroku

Rovnice (1), (2), (9), (12), (14), (17), (19), (20) tvoří systém osmi diferenciálních rovnic pro řešení přechodových jevů v KO.

Při splnění podmínky $i_1 > i''$ přejde nerovnovážný režim v rovnovážný.

5.2.2 Popis rovnovážného stavu

Bilanční rovnice se formulují společně pro vody a páry v KO. V platnosti zůstávají rovnice (1), (2), (9), (12), (17), (20).

Časová změna tlaku se počítá z rovnic energetické bilance pro celý objem a má tvar

$$p = \frac{E_1(P_e - P_I - P_{III} + \dot{m}_s(i_s - i) - \dot{m}_v(i'' - i) + (\dot{m}_r + \dot{m}_p)(i' - i) + v\dot{m}}{m_1 E_2 + m_2 E_3} \quad (22)$$

kde

$$E_2 = E_1 \cdot \left(\frac{di'}{dp} - v' \right) - \frac{dv'}{dp} \quad (23)$$

Změna střední entalpie

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{P_e - P_I - P_{III} + \dot{m}_s(i_s - i) - \dot{m}_v(i'' - i) + (\dot{m}_p - \dot{m}_r)(i' - i)}{m} + v \cdot p \quad (24)$$

když

$$x = \frac{i - i'}{i'' - i'} \quad (25)$$

$$v = v' + x \cdot (v'' - v') \quad (26)$$

Diferenciální rovnice pro rovnovážný a nerovnovážný stav tvoří uzavřený systém, který je řešitelný procedurami pro výpočet :

$$i'; i''; v'; v''; T' = f(p)$$

$$v; T = f(p)$$

Tento program je již zpracován pro modelování stavu kompenzátoru objemu jaderné elektrárny VVER 440 a VVER 1000. Rozlišení obou typů je dáno počátečními podmínkami. K odvození rovnic bylo použito Newtonova obecného interpolačního polynomu:

$$p(x) = f_0 + f[x_1, x_0](x - x_0) + f[x_2, x_1, x_0](x - x_0)(x - x_1), \quad (27)$$

5.3 Vstupní parametry KO VVER 1500

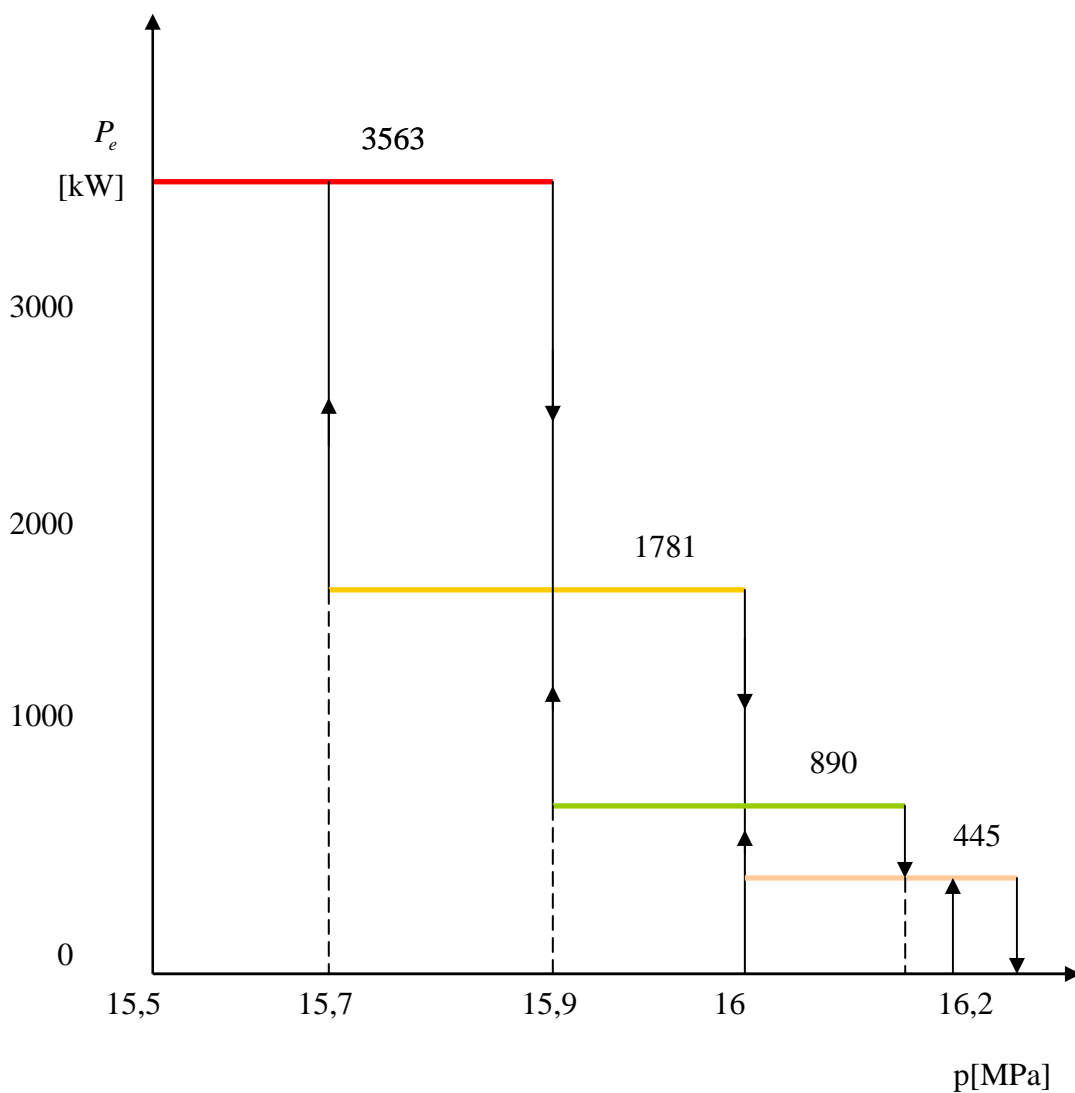
tab.5.1 Parametry KO VVER 1500

Č. název	Ozn.	hodnoty	jednotky
1. počáteční tlak	P	16,2	MPa
2. objem vody	V ₁	55	m ³
3. objem páry	V ₂	24	m ³
4. přestup tepla voda-stěna	α _I	3	kWm ⁻² K ⁻¹
5. přestup tepla pára-stěna	α _{II}	0,3	kWm ⁻² K ⁻¹
6. přestup tepla pára-hladina	α _{III}	100	kWm ⁻² K ⁻¹
7. průměr	d	2,86	m
8. výška hladiny	L	9,56	m
9. vnitřní výška KO	L	12,3	m
10. celková hmotnost	M _k	215	kg
11. měrné teplo FE	C	0,46509	KJkg ⁻¹ K ⁻¹
12. počáteč. Teplota stěny	T _s	346	°C

tab. 5.2 Parametry elektroohřivačů

Elektroohřivače		1.	2.	3.	4.
zapínací tlak	MPa	16,2	16,0	15,9	15,7
vypínací tlak	MPa	16,25	16,15	16,0	15,9
výkon	kW	222	445	890	1781
celkový výkon	kW	3563			

obr.5.1 Provozní charakteristiky



6. Návrh elektroohříváčů

6.1 Maximální výkon elektroohříváčů

K výpočtu použijí rovnice 2, 4, 5, 6, 7, 8, 14 matematického modelu KO. Předpokládám pokles tlaku na hodnotu 15,7 MPa, kdy je výkon elektroohříváčů maximální $P_e=3563$ kW, odvod páry pojistnými ventily je $\dot{m}_v=0$, množství vody přitékající sprchovým systémem $\dot{m}_s=0$ a tím i množství vody zkondenzované na sprchových kapkách $\dot{m}_{ch}=0$. Množství primárního chladiva přitékajícího, odtékajícího z KO je $(\dot{m}_p + \dot{m}_r) = 0$.

Tepelný výkon přecházející z páry do stěny určíme jako:

$$P_I = \alpha_I \cdot S_I \cdot (T'' - T_s) \quad [\text{W}] \quad (5)$$

Z něj vypočtu hmotový tok kondenzátu ze stěn:

$$\dot{m}_K = \frac{P_I}{i'' - i'} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6)$$

Tepelný výkon přecházející z páry do vody při kondenzaci páry na vodní hladině spočítám jako:

$$P_{II} = \alpha_{II} \cdot S_{II} \cdot (T'' - T_1) \quad [\text{W}] \quad (7)$$

Hmotový tok kondenzátu vzniklého kondenzací na hladině:

$$\dot{m}_h = \frac{P_{II}}{i'' - i'} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (8)$$

Změna množství vody:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_k + \dot{m}_h - \dot{m}_e \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

Změna množství páry v KO:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_k - \dot{m}_h + \dot{m}_e = -\dot{m}_1 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

Časová změna tlaku v KO:

$$\dot{p} = \frac{\dot{m}_2 \cdot v'' - \dot{m}_1 \cdot \dot{V}_1}{\dot{m}_2 \cdot E_3} \quad (14)$$

Funkce E_3 :

$$E_3 = \frac{v'' - v'}{i'' - i'} \cdot \left(\frac{di''}{dp} - v'' \right) - \frac{dv''}{dp}$$

Množství páry vzniklé činností elektroohříváčů:

$$\dot{m}_e = \frac{P_e}{i'' - i'} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

Dosazením vztahů pro $\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_e$ do rovnice pro \dot{p} a algebraickými úpravami získám vztah pro výpočet výkonu elektroohříváčů:

$$P_e = \left(\frac{\dot{p} \cdot \dot{m}_2 \cdot E_3}{v'' - v'} + \dot{m}_k + \dot{m}_h \right) \cdot (i'' - i') \quad [\text{kW}] \quad (33)$$

Vstupní údaje:

tab. 6.1. Parametry pro zvýšení výkonu

T_1	335,2	°C	$L=$	9,56	m
T_s	333,2	°C	$m_2=$	3262,8	kg
$T''=$	335,4	°C	$S_1=$	41,03	m^2
$v''=$	0,01177	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$S_2=$	6,924	m^2
$v_1=$	0,001574	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\alpha_1=$	0,3	$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$i''=$	2644	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\alpha_2=$	100	$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$i'=$	1552	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\dot{m}_k =$	0,024	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
$E_3=$	$8,1 \cdot 10^{-4}$		$\dot{m}_h =$	0,13	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
$\dot{p} =$	0,125		$P_e =$	<u>3563</u>	kW

6.2 Návrh svislých trubkových elektroohříváčů umístěných ve spodním dně

Při návrhu svislých elektrických ohříváčů (dále jen TEO) jsem vycházel ze stávajících TEO pro kompenzátor objemu VVER 440 a 1000 MW, podle poskytnuté výkresové dokumentace 1-1103-40C "Blok elektroohříváče".

Výhody tohoto řešení jsou:

1. Využití již ověřeného typu elektrických ohříváčů.

2. Velký průměr základního tělesa je nevhodný pro umístění ve spodním dně, s tím souvisí i tlustostěnné nátrubky elektrických ohřivačů.

6.2.1 Výpočet elektroohřivačů

Volené vstupní údaje pro výpočet (viz. obrázek 6.1.)

tab.6.2. Vstupní údaje pro navrhovanou délku topného odporu

L=	308	cm	Ro(500°C)=	1,158	$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$
d=	0,4	cm	Qc=	3563	kW
h=	0,8	cm	n=	50	
ds=	1,5	cm	dU1=	23,7	V
			U=	380	V

Materiál: slitina 20% Cr, 80% Ni, pracovní teplota 500°C

Výpočet výkonu jednoho elektroohřivače:

$$Q_j = \frac{Q_c}{n} = 71260 \text{ [W]} \quad (34)$$

Navrhovaná délka topného odporu:

$$ld = \left(\frac{L}{h} \right) \cdot \sqrt{(\pi \cdot ds)^2 + h^2} + L = 2148 \text{ [cm]} \quad (35)$$

Zdrojové teplo:

$$Q = \frac{4 \cdot Q_j}{\pi \cdot d^2 \cdot ld} = 263,9 \text{ [W} \cdot \text{cm}^{-3}] \quad (36)$$

Tepelný tok na povrchu vodiče:

$$P1 = Q \cdot \frac{d}{4} = 2,639 \text{ [W} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (37)$$

Úbytek napětí:

$$dU = dU1 \cdot \sqrt{P1} \cdot \sqrt{Ro} = 48,3 \text{ [V]} \quad (38)$$

Proud v TO:

$$I = \frac{Q_j}{(U - dU)} = 214 \text{ [A]} \quad (39)$$

Odpor TO:

$$R = \frac{U - dU}{I} = 1,55 \text{ [\Omega]} \quad (40)$$

Výpočtová délka TO:

$$ld1 = \frac{R}{S} = 2148 \text{ [cm]} \quad (41)$$

Vypočtená délka topného odporu musí vyhovovat podmínice:

$$ld1 = ld2 = \frac{Q_j}{10 \cdot \pi \cdot d \cdot P1} = 2148 \text{ [cm]} \quad (42)$$

6.2.2. Kontrola pracovní teploty elektroohřivačů a tepelných toků

tab.6.3 Vstupní údaje pro výpočet střední pracovní teploty

d1=	25	mm	L=	308	cm
d2=	19	mm	λ_{350} =	20,3	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
d3=	16,6	mm	λ_{415} =	15,9	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
d4=	13,4	mm	λ_{455} =	21,5	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
d5=	4	mm	λ_{495} =	14	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
			λ_{520} =	22,4	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
			Q_j =	71260	W

$$q1 = \frac{Q_j}{\pi \cdot d1 \cdot L} = \frac{71260}{\pi \cdot 2,5 \cdot 308} = 29,5 \text{ [W}\cdot\text{cm}^{-2}] \quad (43)$$

$$ts1 = 350 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$q2 = \frac{Q_j}{\pi \cdot d2 \cdot L} = \frac{71260}{\pi \cdot 1,9 \cdot 308} = 38,8 \text{ [W}\cdot\text{cm}^{-2}] \quad (44)$$

$$ts2 = \frac{q1 \cdot r2 \cdot \ln(r1/r2)}{\lambda_{350}} + ts1 = \frac{29,5 \cdot 10^4 \cdot 0,0095 \cdot \ln(1,25/0,95)}{20,3} + 350 = 388 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (45)$$

$$q3 = \frac{Q_j}{\pi \cdot d3 \cdot L} = \frac{71260}{\pi \cdot 1,66 \cdot 308} = 44,4 \text{ [W}\cdot\text{cm}^{-2}] \quad (46)$$

$$ts3 = \frac{q2 \cdot r3 \cdot \ln(r2/r3)}{\lambda415} + ts2 = \frac{38,8 \cdot 10^4 \cdot 0,0083 \cdot \ln(0,95/0,83)}{15,9} + 388 = 415 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (47)$$

$$q4 = \frac{Q \cdot \frac{d5}{4} \cdot \pi \cdot d5 \cdot L}{\pi \cdot d4 \cdot L} = \frac{Q \cdot d5^2}{4 \cdot d4} = \frac{263 \cdot 0,4^2}{4 \cdot 1,34} = 7,85 \text{ [W.cm}^{-2}\text{]} \quad (48)$$

$$ts4 = \frac{q3 \cdot r4 \cdot \ln(r3/r4)}{\lambda455} + ts3 = \frac{44,4 \cdot 10^4 \cdot 0,0049 \cdot \ln(0,83/0,67)}{21,5} + 415 = 437 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (49)$$

$$q5 = \frac{Q \cdot \frac{d5}{4} \cdot \pi \cdot d5 \cdot L}{\pi \cdot d5 \cdot L} = \frac{Q \cdot d5}{d4} = 26,3 \text{ W.cm}^{-2}$$

$$ts5 = \frac{q4 \cdot r4 \cdot \ln(r4/r5)}{\lambda495} + ts4 = \frac{7,85 \cdot 10^4 \cdot 0,0049 \cdot \ln(0,67/0,2)}{14} + 437 = 470 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (50)$$

$$to = \frac{Q \cdot r5^2}{4 \cdot \lambda520} + ts5 = \frac{263 \cdot 10^6 \cdot 0,002^2}{4 \cdot 22,4} + 470 = 481 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (51)$$

Při řešení prostupu tepla jsem užil náhradu spirály prstencovou válcovou stěnou, přičemž kruhový průřez je rovnoploché s průřezem náhradním – obdélníkovým (znázorněno na obr 6.2). Výšku obdélníkového průřezu jsem zvolil:

$$h = 0,8 \text{ [cm]}$$

Odtud pak:

$$a = \frac{S}{h} = 1,57 \text{ [mm]} \quad (52)$$

Průměry d3 a d4:

$$d3 = ds + a = 16,6 \text{ [mm]} \quad (53)$$

$$d4 = ds - a = 13,4 \text{ [mm]} \quad (54)$$

Střední pracovní teplotu určím jako:

$$tstř = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{(ts3 + ts4)}{2} + \frac{(ts5 + to)}{2} \right) = 450 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (55)$$

Střední pracovní teplota souhlasí s únosnou tolerancí s předem zvolenou hodnotou 500°C, pro kterou byl určen měrný odpor $R_o(500^\circ\text{C})$.

Navržený materiál umožňuje užití do pracovní teploty 1050°C, je možné jej pro TEO použít.

6.2.3 Návrh ocelového pláště TEO

Materiál pláště volím ocel 3Ch13 jakostní třídy KP-60B. Pevnostní charakteristiky jsou v tabulce 6.4 .

tab. 6.4. Pevnostní charakteristiky.

3Ch13 KP - 60B		Teplota ve °C	
		20	350
Rm	MPa	785	620
Rp	MPa	590	550

Dovolená napětí se určí jako menší z hodnot:

$$n_m = 2,6$$

$$n_p = 2$$

$$\sigma_{Dm} = \frac{R_m}{n_m} = 238 \text{ [MPa]} \quad (56)$$

$$\sigma_{Dp} = \frac{R_p}{n_p} = 275 \text{ [MPa]} \quad (57)$$

$$\sigma_D = 238 \text{ [MPa]}$$

Výpočtová tloušťka stěny dna (obr. 6.3.):

$$s_r = K \cdot DR \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_D}} = 1,8 \text{ [mm]} \quad (58)$$

$$p = 18 \text{ [MPa]}$$

$$\text{součinitel: } K = 0,35$$

$$\text{výpočtový průměr } DR = 19 \text{ [mm]}$$

$$\text{Nominální tloušťka stěny dna: } c = 1,2 \text{ [mm]}$$

$$s_N = s_r + c = 3 \text{ [mm]} \quad (60)$$

Podmínka platnosti vztahu:

$$\frac{(s_N - c)}{DR} = 0,095 < 0,1$$

Výpočtová tloušťka stěny válcového pláště:

$$sR = 0,73 \quad \text{mm} \quad \text{pro } \varphi = 1$$

$$\text{Nominální tloušťka stěny pláště: } c = 2,27 \text{ [mm]}$$

$$sN = sR + c = 3 \text{ [mm]} \quad (61)$$

Podmínky platnosti vztahu:

$$\frac{(sN - c)}{DR} = 0,0384211 < 0.3$$

6.2.4 Volba počtu TEO

Při volbě počtu TEO vycházím z těchto hledisek:

1. hledisko technologie - umístění TEO na roztečných kružnicích s ohledem na výrobu nátrubku
2. hledisko dodržení celkového tep. výkonu
3. hledisko pevnostních podmínek

V úvahu беру průběh napětí σ red ve dně (obr. 6.4)

Ze získaných výsledků plyne, že nejvhodnější poloměry roztečných kružnic se nachází v intervalu:

$$900 \text{ mm} < R < 1360 \text{ mm}$$

Určení poloměrů roztečných kružnic (obr. 6.5) :

$$\text{průměr otvoru} \quad d = 45 \text{ [mm]}$$

$$\text{max. průměr vnějšího nátrubku} \quad dc = 100 \text{ [mm]}$$

$$\text{vzdál. mezi vnějšími nátrubky} \quad lc = 140 \text{ [mm]}$$

$$\text{počet TEO na jedné roztečné kružnici} \quad n = 25$$

Poloměr 1. roztečné kružnice:

$$R1 = \frac{n \cdot (dc + lc)}{2\pi} = 955 \text{ [mm]} \quad (62)$$

$$\text{Volím } R1 = 960 \text{ [mm]}$$

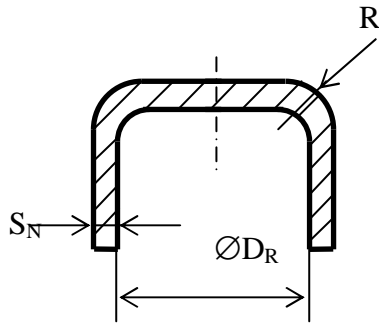
Poloměr 2. roztečné kružnice:

$$R2 = R1 \cdot \cos \varphi + \frac{\sqrt{(2 \cdot R1 \cdot \cos \varphi)^2 - (R1^2 - ld^2)}}{2} = 1160 \text{ [mm]} \quad (63)$$

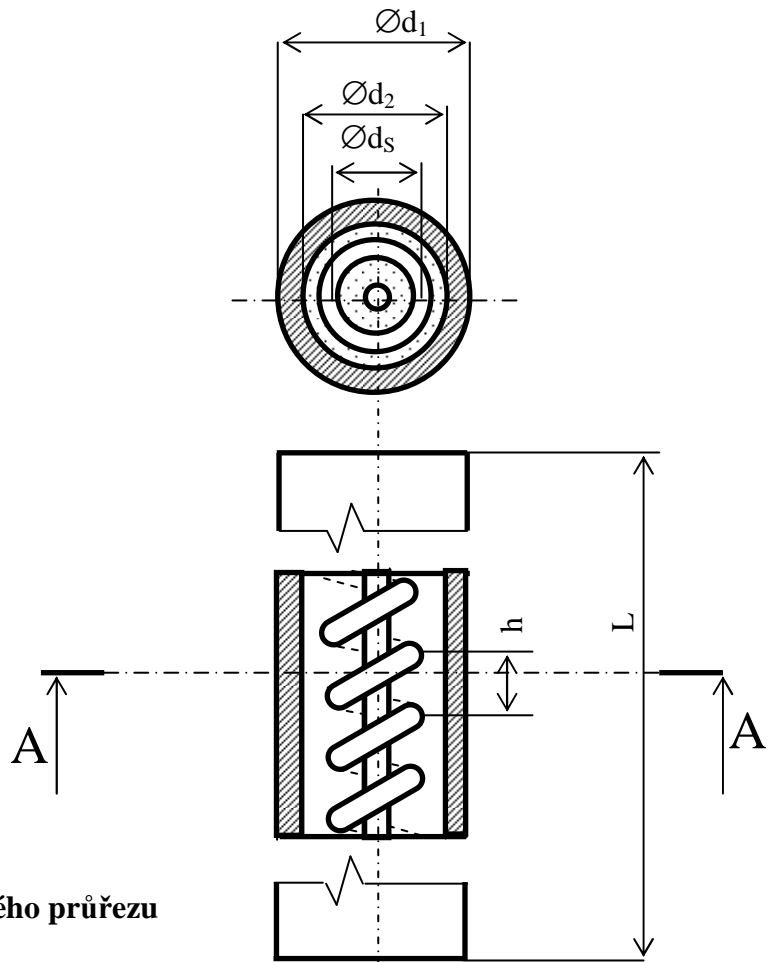
$$ld = lc + dc = 240 \text{ [mm]} \quad (64)$$

$$\varphi = \frac{360}{n} = 7,2 [^\circ] \quad (65)$$

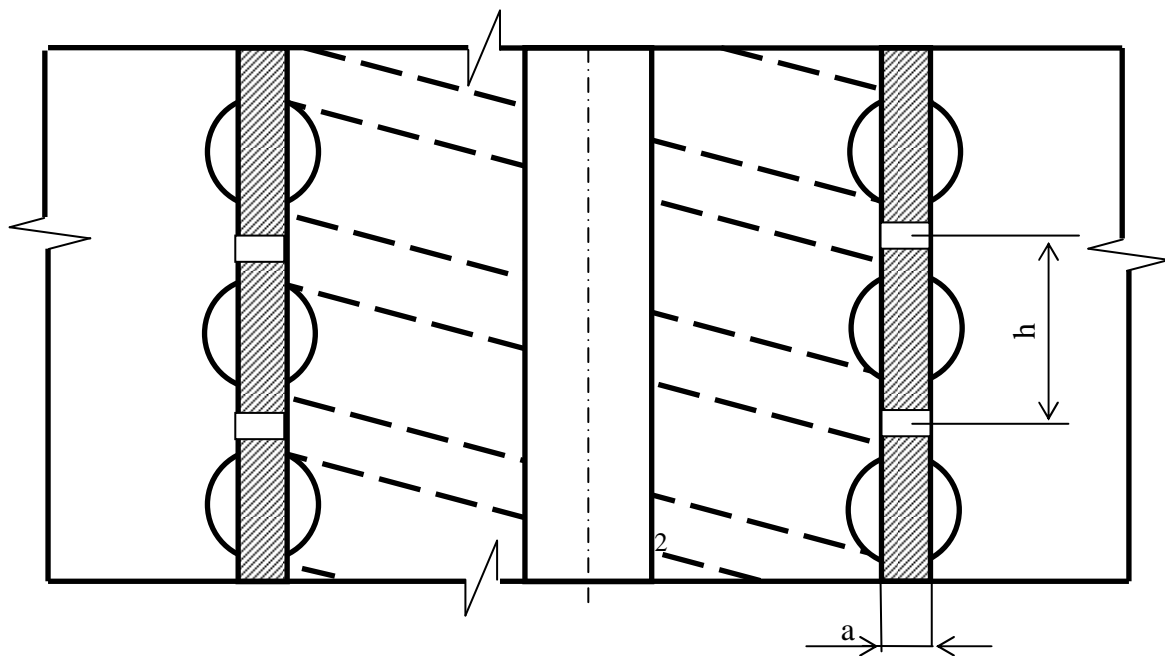
obr. 6.3
Horní dno TEO



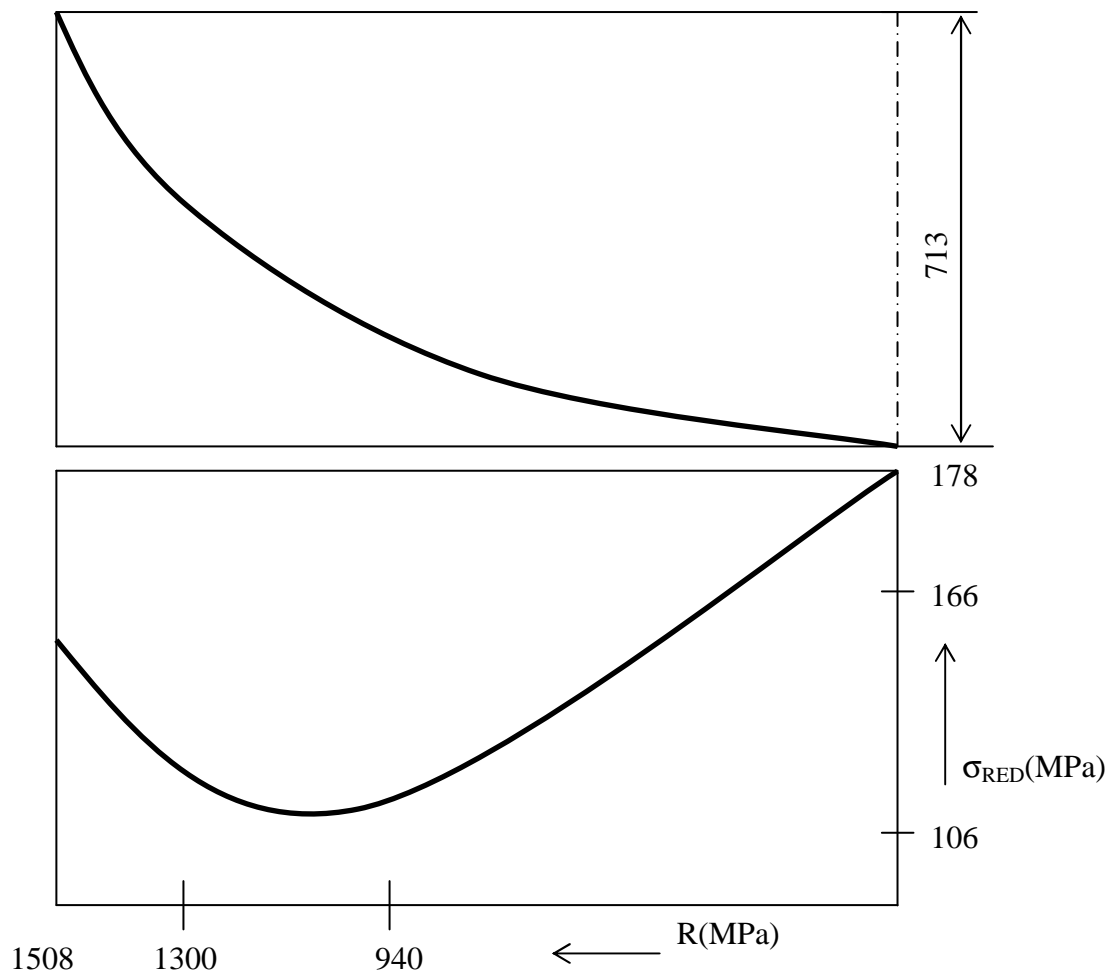
obr. 6.1.
Schéma TEO
A-A



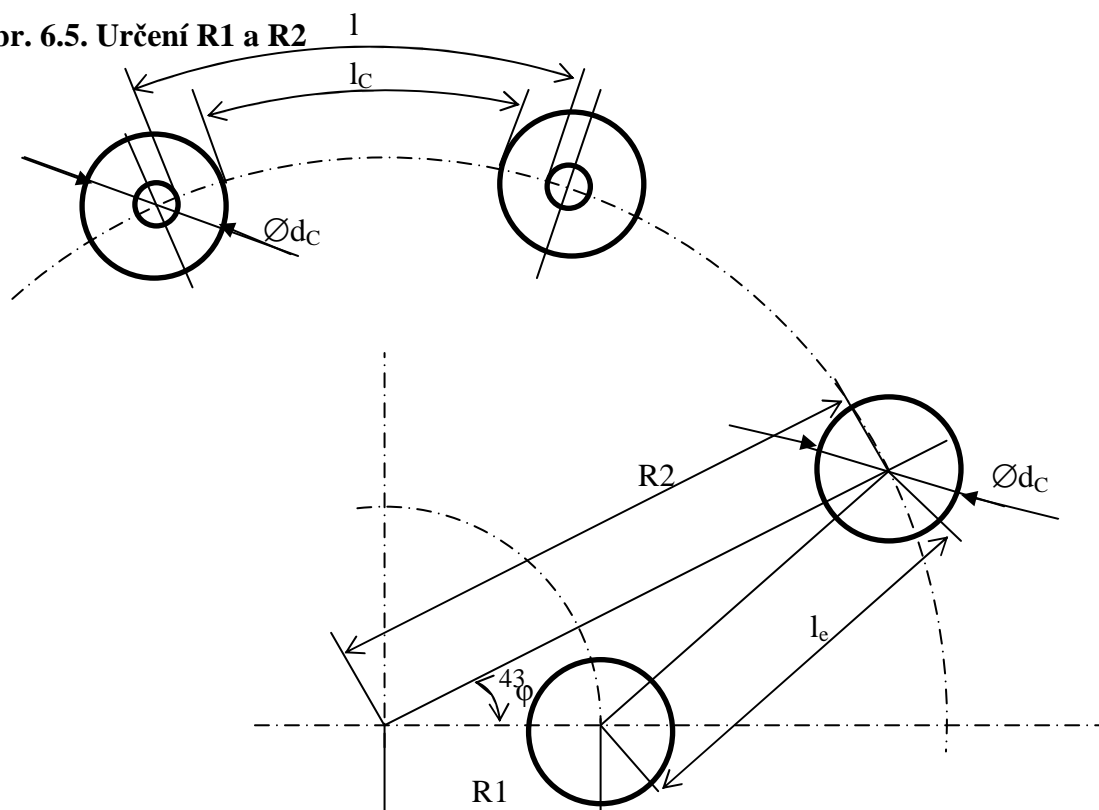
obr. 6.2. Náhrada kruhového průřezu



obr. 6.4. Průběh napětí ve dně



obr. 6.5. Určení R1 a R2



7. Závěr

V úvodních částech této práce, jsem se zaměřil na základní přehled druhů reaktorů. Tlakovodní reaktor typu VVER 1500, pro který jsem měl za cíl navrhnout elektroohřívače umístěné v kompenzátoru objemu, má přibližně o 50% větší výkon než Česká jaderná elektrárna Temelín.

Kompenzátor objemu je spojen jednou ze smyček primárního okruhu. Vyrovnávání tlaku se provádí pomocí sprch v horní části kompenzátoru a pomocí elektroohřívačů umístěných ve spodní části.

Při návrhu svislých trubkových elektroohřívačů umístěných ve spodním dně, jsem vycházel ze současných (TEO) pro kompenzátor objemu VVER 1000. Výhody tohoto řešení jsou: a) využití ověřeného typu elektrických ohřívačů b) velký průměr základního tělesa je nevhodný pro umístění ve spodním dně. Vypočtená střední pracovní teplota souhlasí s únosnou tolerancí s předem zvolenou hodnotou 500 [C°], pro kterou byl určený měrný odpor (R_0) a zvolený materiál lze použít. Materiál ocelového pláště volím ocel 3Ch13 jakostní třídy KP-60B. Při volbě počtu (TEO) jsem vycházel z hledisek umístění na roztečných kružnicích, dodržení celkového tepelného výkonu a hlediska pevnostních podmínek. Cíle této práce jsou splněny.

7.1 Seznam obrázků a tabulek:

Obrázky:

Obrázek č. 1.1 Reaktor VVER -1000	13
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Wwer-1000-scheme.png]	
Obrázek č. 1.2 Reaktor VVER 1500	15
[prezentace: 10KS_N.%20Trunov]	
Obrázek č. 2.1 Schéma jaderné elektrárny VVER-1500.....	17
[http://nuclear-engineering-international-online.com]	
Obrázek č. 5.1 Provozní charakteristiky.....	34
Obrázek č. 6.1 Schéma TEO.....	42
Obrázek č. 6.2 Náhrada kruhového průřezu.....	42
Obrázek č. 6.3 Hodní dno TEO.....	42
Obrázek č. 6.4 Průběh napětí ve dně.....	43
Obrázek č. 6.5 Určení R1 a R2.....	44

Tabulky:

Tabulka č. 1.1. Vývoj reaktoru.....	11
Tabulka č. 1.2. Rozdělení reaktorů podle chlazení.....	12
Tabulka č. 1.3. Typy reaktorů.....	14
Tabulka č. 5.1. Parametry KO VVER 1500.....	33
Tabulka č. 5.2 Parametry elektroohříváčů.....	34
Tabulka č. 6.1. Parametry pro zvýšení výkonu.....	36
Tabulka č. 6.2. Vstupní údaje pro navrhovanou délku topného odporu.....	37
Tabulka č. 6.3 Vstupní údaje pro výpočet střední pracovní teploty.....	38

7.2 Použité zdroje literatury

literatura:

- [1] RÉDR. M., PŘÍHODA. M. *Základy tepelné techniky. Praha. SNTL. 1991*
(ISBN 80-03-00366-0)
- [2] SADIK KAKAC. *Boilers, evaporators, condensers. John.Wiley.USA. NewYork. (CIP 90-22486)*
- [3] HEJZLAR. R. *Stroje a zařízení jaderných elektráren, Díl.1. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005 (ISBN 80-01-03190)*
- [4] BLAHOŽ, V., KADLEC, Z.: *Základy sdílení tepla. Ostrava: SPBI, 2000*
(ISBN 80-902001-1-7.)
- [5] KADLEC, Z.: *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty. Ostrava: SPBI, 2009. (ISBN 978-80-7385-061-6)*
- [6] HEJZLAR. R. *Stroje a zařízení jaderných elektráren, Díl.2. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005 (ISBN 80-01-03191)*
- [7] BEČVÁŘ. J. *Jaderné elektrárny*
- [8] VÍTKOVICE. *In the field of nuclear power generating equipment*
- [9] BOHUMÍR STRNADEL. *Nauka o materiálu. Ostrava. 2004 (ISBN 80-248-0689-4)*

Internet:

- [1] <http://www.339.vsb.cz/>
- [2] <http://www.cez.cz/>
- [3] <http://energetik.cz/>
- [4] <http://www.tzb-info/>
- [5] <http://cs.wikipedia.org/>
- [6] <http://nuclear-engineering-international-online.com/>
- [7] <http://www.jaderna-energie.cz/>

[8] <http://www.rusnuclear.cz/>