



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGY INSTITUTE

# PAROGENERÁTOR TLAKOVODNÍHO REAKTORU VVER-440

STEAM GENERATOR OF A PRESSURIZED WATER REACTOR WWER-440

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**JOSEF PŘIKRYL**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. Ladislav Suk**

BRNO 2015



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Josef Přikryl

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Parogenerátor tlakovodního reaktoru VVER-440**

v anglickém jazyce:

### **Steam generator of a pressurized water reactor WWER-440**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Seznámení se konstrukcí jednotlivých typů parogenerátorů. Zpracování základního přehledu jednotlivých konstrukčních řešení.

Zpracování 3D modelu parogenerátoru.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Zpracovat rešerši o jednotlivých konstrukčních řešeních parogenerátorů tlakovodních reaktorů.
- 2) Tvorba 3D modelu parogenerátoru VVER-440.

Seznam odborné literatury:

- 1) Matal, O.: Jaderná zařízení a jejich bezpečnost, CERN, 2011
- 2) Bečvář, J.: Jaderné elektrárny, SNTL, 1981
- 3) Matal, O.: Konstrukční cvičení (vybrané komponenty jaderně energetických zařízení)
- 4) Dokumentace EDU

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Suk

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne

L.S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá problematikou parogenerátorů jaderných elektráren. První část práce je zaměřena na popis parogenerátoru západní koncepce, kde je kladen důraz na separaci páry a poruchy tlakového celku. Druhá část je zaměřena na popis a tvorbu modelu parogenerátoru východní koncepce typu VVER 440.

## **Abstract**

The Bachelor's thesis deals with problems of steam generators for nuclear power plant. The first part is dedicated to describe steam generator western conception, especially description steam separation and pressurized unit accidents. The second part is dedicated to description and creation a model of steam generator eastern conception VVER 440.

## **Klíčová slova**

Parogenerátor, teplosměnné trubky, separátor, tlaková nádoba, 3D model

## **Key words**

Steam generator, heat exchange tubes, separator, pressure vessel, 3D model

**Bibliografická citace mé práce:**

PŘIKRYL, J. *Parogenerátor tlakovodního reaktoru VVER-440*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Suk.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Parogenerátor tlakovodního reaktoru VVER-440“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne: .....

Josef Přikryl

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval všem, kteří mi byli při vypracování této bakalářské práce nápomocni. Zvláštní poděkování patří panu. Ing. Ladislavu Sukovi za cenné připomínky, rady a odborné vedení této bakalářské práce a Bc. Michalu Šebelovi za technickou podporu.



## Obsah

1. Úvod .....	8
2. Historie parogenerátoru .....	13
2.1 Popis parogenerátoru PWR .....	15
2.2 Separace páry vertikálních parogenerátorů .....	17
2.2.1 Účinnost separace .....	17
2.2.2 Některé typy separátorů .....	18
2.2.3 Westinghouseův separátor .....	19
2.2.4 Princip separace .....	21
2.3 Napájení parogenerátoru .....	22
2.3.1 Napájecí potrubí .....	23
2.3.2 J – trubky .....	23
2.4 Distanční desky .....	24
2.4.1 Krycí tyče .....	25
2.5 Nosné rámy teplosměnných trubek v U-ohybu .....	26
2.6 Poruchy Parogenerátoru PWR .....	28
2.6.1 Zeslabování trubkové stěny .....	28
2.6.2 Vznik vrubů (promáčknutím) .....	28
2.6.3 Korozní praskání na primární straně .....	29
2.6.4 Kaly a praskání sekundární strany .....	30
2.6.5 Místa s výskytem koroze .....	31
2.6.6 Vibrace a opotřebení teplosměnných trubek .....	31
3. Parogenerátor VVER 440 .....	33
3.1 Tlaková nádoba .....	33
3.2 Napájecí potrubí .....	34
3.3 Kolektory .....	35
3.4 Teplosměnné trubky .....	37
3.5 Distanční mříž .....	37
3.6 Separátor Páry .....	38
3.7 Parní kolektor .....	38
3.8 Měření hladiny .....	39
3.9 Odluh .....	39
3. 10 Odkal .....	40
4. Závěr .....	41
5. Použitá literatura .....	42
6. Seznam příloh .....	43

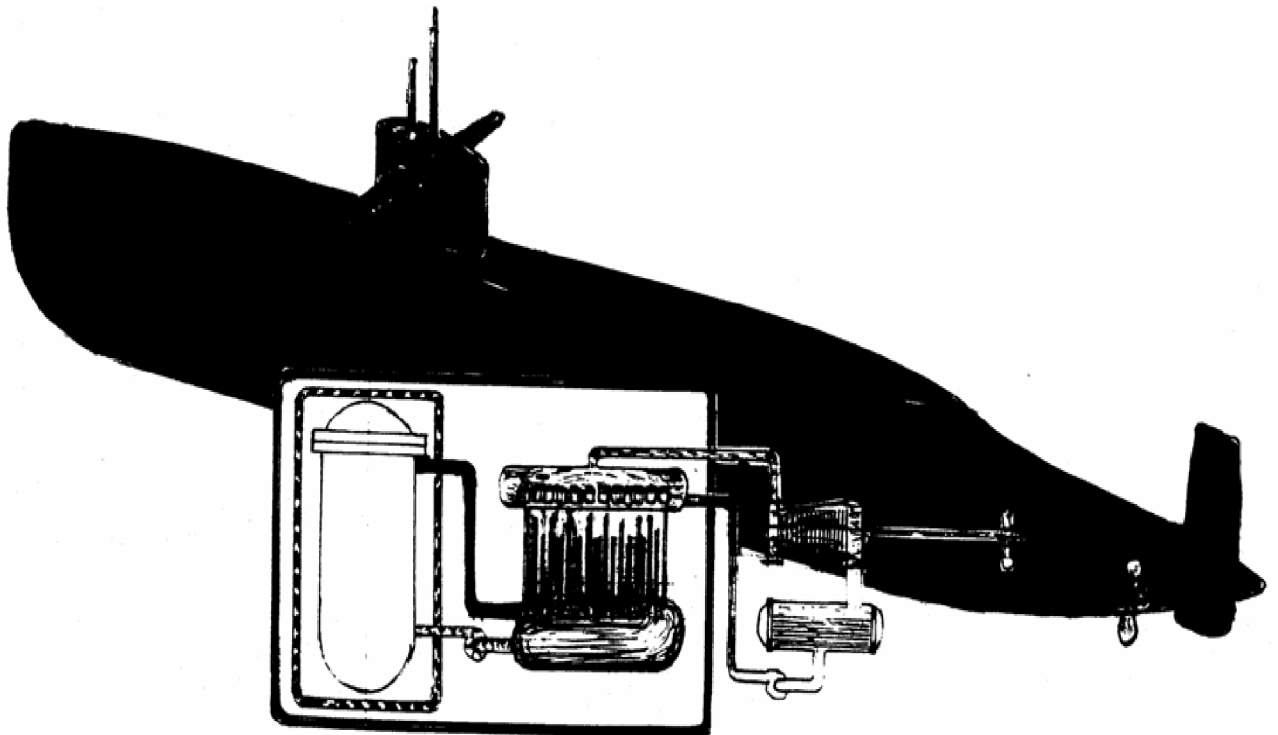
## 1. Úvod

Parogenerátor – je zařízení, které slouží k přenosu tepla z radioaktivního primárního okruhu do sekundárního okruhu s parními turbínami. Médium primárního okruhu zahřívá teplosměnné trubky, které své teplo předávají sekundárnímu médiu a tím dochází ke generování páry. Generovaná pára je následně odváděna do separátorů, kde je zbavována přebytečné vlhkosti. Ještě před vstupem do separátorů se pára zbavuje těžkých kapiček vody pomocí tíhových sil. Cílem je dosažení co nejmenší vlhkosti páry, která způsobuje erozi lopatek turbíny a tím výrazně snižuje její životnost. Parogenerátory jaderných zařízení se v podstatě dělí na dva druhy. Na horizontální, převážně užívané zeměmi východního bloku a vertikální. S ohledem na jadernou bezpečnost, připadá na jeden blok více parogenerátorů.

## 2. Historie parogenerátoru

Kvůli vysokým tlakům, při výrobě páry se začaly používat trubkové tepelné výměníky. Tyto výměníky lépe odolávají vysokým tlakům díky kruhovému průřezu. Trubkové tepelné výměníky se používají i s ohledem na to, že mají menší teplosměnnou plochu vztahenou na jednotku objemu, ve srovnání s plochými deskami. [1]

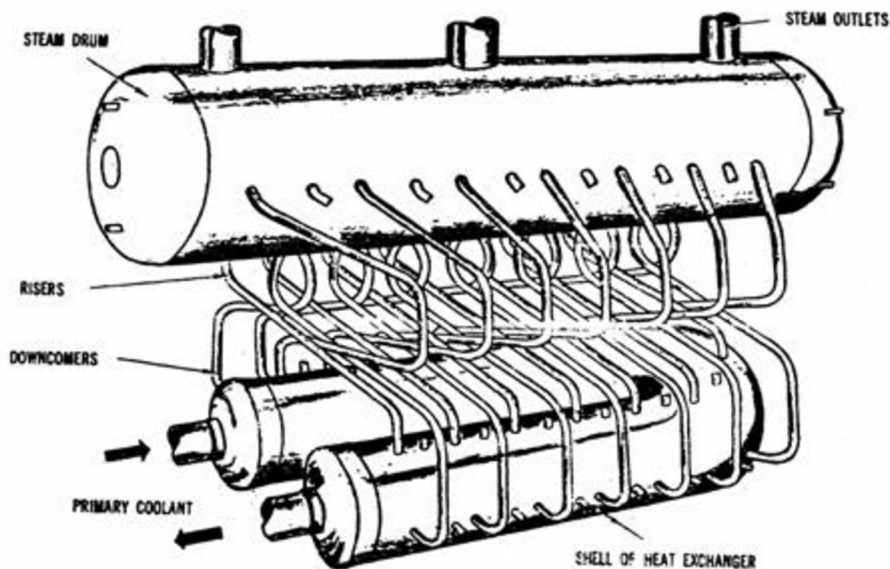
Jednalo se o velkokapacitní tepelné výměníky, které neprodukovaly kvalitní páru a nebyly příliš efektivní. Aby se pára mohla používat k pohonu turbín, musela se zlepšit separace páry. Z tohoto důvodu se začal používat parní buben, který zahrnoval cyklonový separátor páry. Tento typ se začal používat na prvních ponorkách. [1]



**Obr. 1 Ponorka s tepelným výměníkem a horizontálním parním bubnem [1]**

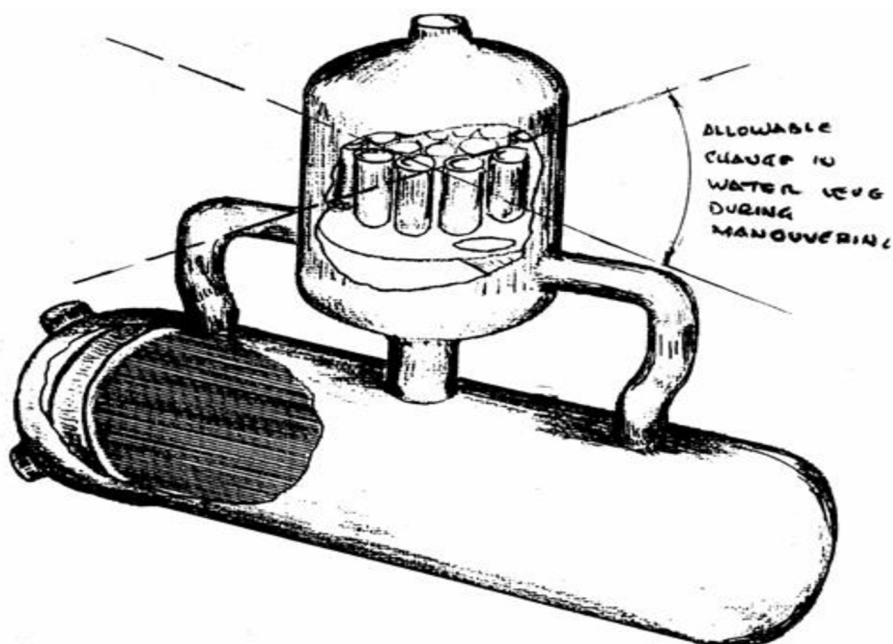
Uspořádání horizontálních parních bubňů nad tepelným výměníkem omezovaly manévrovací schopnosti ponorek. Protože se ponorka ponořuje a vynořuje pod určitým náklonem a hlavní osa parogenerátoru a hlavní osa ponorky jsou rovnoběžné, docházelo ke kolísání hladiny a následnému zatopení separátoru, který posílal směs vody a páry na turbínu, čímž docházelo k pulzačním ztrátám výkonu. Z tohoto důvodu vyvstala potřeba návrhu vertikálního parního bubnu s vhodnými separátory, které by plně plnily svoji funkci i při kolísání hladiny. [1]

První parogenerátory na ponorkách byly složeny z U-trubek. Tepelný výměník byl spojen s parním bubnem pomocí vyváděcích trubek a zavodňovacích trubek. K těmto informacím měla přístup demonstrační jaderná elektrárna Shipping port založena na technologii PWR. [1]



**Obr. 2 Tepelný výměník s horizontálním parním bubnem [1]**

Ve stejnou dobu dochází ke změně dlouhého horizontálního parního bubnu, který je využíván v civilních aplikacích, na vertikální parní bubnen a to z důvodu zmenšení průměru nádoby kontejmentu a zvýšení počtu parogenerátorů uvnitř kontejmentu. Tímto krokem dochází ke zvýšení objemového výkonu parogenerátoru. [1]



**Obr. 3 Tepelný výměník s vertikálním parním bubnem [1]**

Na začátku mírového využívání jaderné energie, Amerika a Kanada používala parogenerátory založené na návrzích parogenerátorů pro Americké námořnictvo. [1]

Shipping port byla první atomová elektrárna, využívaná výhradně k mírovým účelům. Elektrárna byla postavena a provozována pod záštitou admirála Hynana G Ricovera. Jako první palivo se používal vysoce obohacený (93% U-235) obklopen přírodním uranem U-238. Elektrárna byla schopna dosáhnout výkonu 60 MWe. Na výrobu páry se používaly čtyři parogenerátory. [1]

## 2.1 Popis parogenerátoru PWR

Vysokotlaký vysokoteplotní teplotní primárního okruhu proudí do vstupní komory primárního okruhu parogenerátoru přes Inconelové U – trubky a vrací se zpět do výstupní komory. Prostor pod trubkovnicí je rozdělena přepážkou a každá z komor je opatřena přístupovým otvorem pro kontrolu a údržbu. Aby se zabránilo únikům skrze trubkové spoje, jsou U – trubky přivařeny k trubkovnici. Trubky jsou v intervalech podepřeny za pomoci horizontálních distančních desek. [2][3]

Napájecí voda vstupuje do parogenerátoru skrze napájecí hrdlo, které je umístěno v horní válcové hlavě, je dále rozváděna pomocí napájecího prstence do mezikruhového prostoru mezi pláštěm tlakové nádoby a vnitřním pláštěm, který obepíná trubkový svazek. Tento prostor vytváří zavodňovací kanál, kde se napájecí voda mísí s recirkulačním proudem a vstupuje do trubkového svazku v blízkosti trubkovnice. Zde dochází k varu a následné tvorbě páry. [2][3]

Nad trubkovým svazkem se nachází hlavní a pomocný separátor vlhkosti. Separátory jsou od sebe odděleny děrovanou deskou. Pomocný separátor se používá na zvýšení kvality páry a to minimálně na 99,75% suchosti. Nad sekundárním separátorem se nachází parní výstupní tryska s integrovanou omezovací klapkou, která slouží k omezení průtoku páry při havárii parovodu. [2][3]

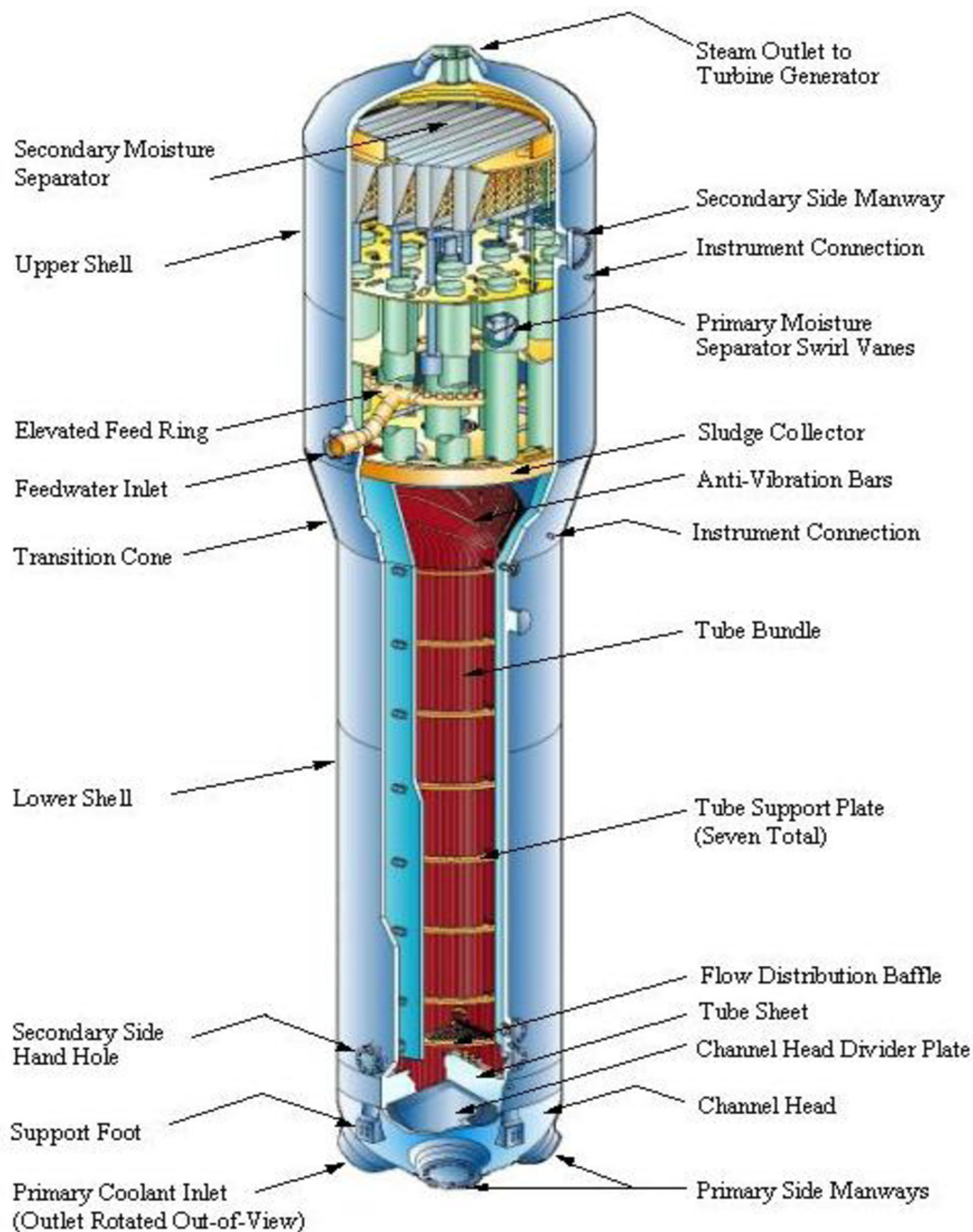
Tlaková nádoba obsahuje několik kontrolních a manipulačních přístupových nátrubků. [2][3]

Všechny tlakové části, s výjimkou trubek ze slitiny Inconel, jsou vyrobeny z hliníku nebo nízkolegované oceli. Všechny povrchy, které přicházejí do styku s chladivem z primárního okruhu, jsou chráněny vrstvou nerezové oceli nebo slitinou Inconel. [2][3]

Parogenerátor obsahuje distanční desky s opěrnými body. Čtyřdotykový design umožňuje usměrnit proudění do volných prostor mezi trubkou a distanční deskou. Materiál distančních desek trubkového svazku je nerezová ocel typu AISI 405. V místě ohybu U – trubek jsou trubky zajištěny pomocí antivibrační mříže ze slitiny Inconel. [2][3]

Napájecí prsteneц přednostně distribuuje proud vody do horké oblasti trubkového svazku. Trubková trasa je po obvodu přepážkována tak, že všechny recirkulační proudy jsou nuceny projít skrze trubkový svazek. V místech s výskytem kalů je umístěno odkalovací potrubí. Pravděpodobnost vodního rázu, nebo případné energie vodního rázu v napájecím potrubí, byla značně snížena přidáním J-trubic na napájecí prsteneц a obalením napájecí trysky tepelnou izolací. [2][3]

Metalurgická struktura materiálu trubek z Inconelu 600 byla optimalizována válcováním za tepla. Při konečné montáži parogenerátoru se využívá zaválcování trubek po celé tloušťce trubkovnice, jako konečný způsob pro minimalizaci zbytkových napětí, které jsou přítomny na rozhraních trubek s trubkovnicí. [2][3]



Obr. 4 Parogenerátor PWR [4]

## 2.2 Separace páry vertikálních parogenerátorů

Separace kapalné vody z mokré páry probíhá v horní části parogenerátoru a obvykle zahrnuje tři fáze. [5]

**Primární separaci** – obvykle prováděna pomocí odstředivých separátorů

**Gravitační separaci** – probíhá v prostoru mezi primárním a sekundárním separátorem

**Sekundární separaci** – prováděna pomocí separátorů vlnitého typu

### 2.2.1 Účinnost separace

Účinnost celé separace je obvykle měřena pomocí hmotnostního průtoku vodních kapiček v páře vyjádřena v procentech. Tato hodnota by neměla překročit hranici 0,25%. Není však zcela jasné, jestli je tato hodnota dostatečně nízká k minimalizaci poškození turbíny. Standardně přijatelná hodnota je 0,1%. V mnoha případech, kdy nebylo dosaženo požadované suchosti páry (v konkrétním případě šlo o páru s 1,5% vlhkostí) docházelo k nemalým problémům, které vedly ke snížení účinnosti zařízení. [5]

Dalším aspektem výkonu separace je tzv. carry-under (odnos dolů), který vyjadřuje množství páry v separované vodě. Carry-under je faktorem pro určení cirkulačního poměru separátoru. [5]

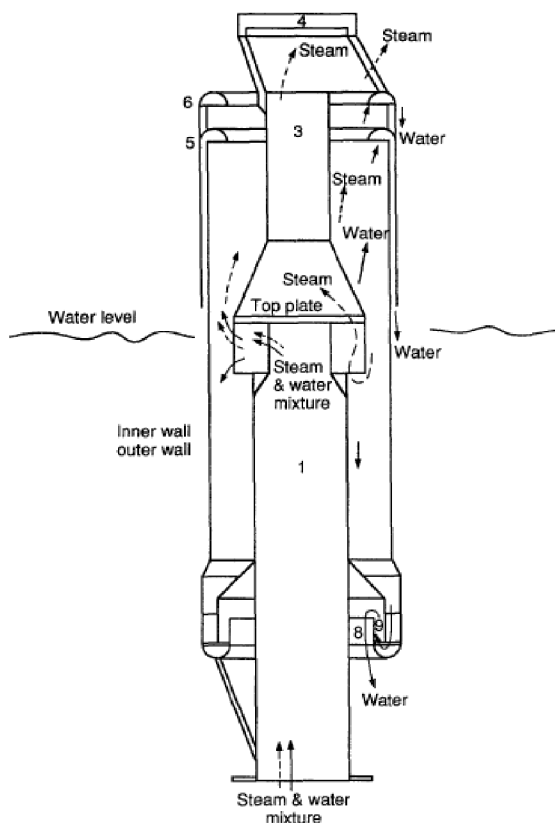
Jiná významná vlastnost separátorů, kromě jejich účinnosti, je tlaková ztráta. Nízká tlaková ztráta separátoru zvyšuje cirkulační poměr. Vzhledem k tomu, že jsou separátory umístěny před výstupním parním hrdlem, v zóně, ve které dochází ke dvojfázovému proudění, by velká tlaková ztráta mohla způsobit nestabilitu cirkulačního proudění. V takovém případě by mohlo dojít i k nucené odstávce zařízení. [5]

Výkon většiny separátorů se výrazně zhoršuje při zvyšování hmotnostního průtoku. Toto zhoršení je vyjádřeno jako velmi rychlý nárůst úletu. Protože jsou jednotlivé separátory nerovnoměrně zatížené, tak by měl být širší pracovní rozsah. [5]

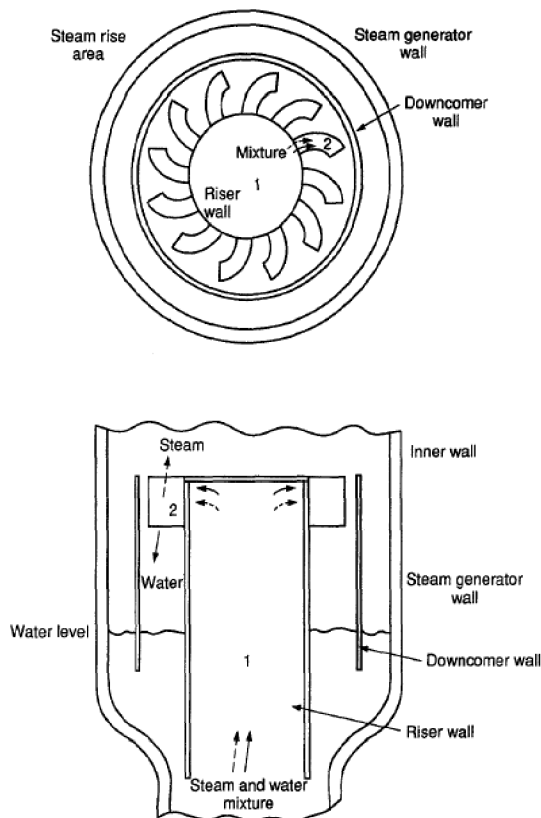
Úlet je jev, při kterém je volná kapalina strhávána (odnášena) plynou fází v horní části separátoru. Většinou nastává při zvýšení hladině vody v okolí separátoru. Tento jev vede k rapidnímu zhoršení účinnosti separace. [5]

### 2.2.2 Některé typy separátorů

Curtis–Wrightův separátor – směs vody a páry vstupuje do separátoru skrze přívodní trubku, následně prochází skrze vírovou pasáž. Separovaná voda odtéká spádovou trubkou a pára odchází výstupy mezi vírovými trubicemi do další fáze separace. [5]



Obr. 5 KWU separátor [5]

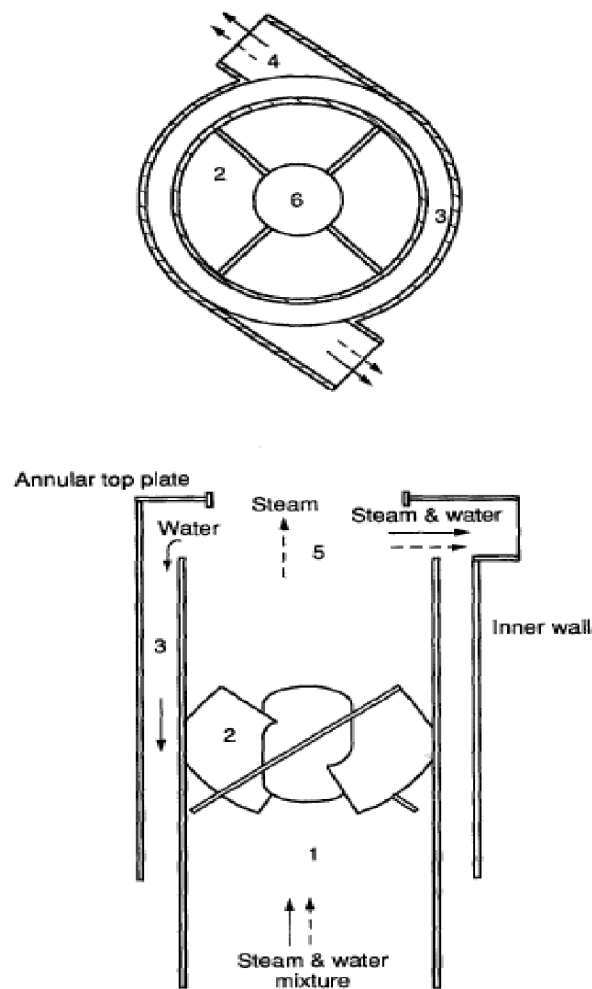


Obr. 6 Curtis –Wrightův separátor [5]

KWU separátor – směs vody a páry prochází separátorem po nepřímé trase. Voda je separovaná v několika fázích. Tento separátor je v porovnání s jinými poměrně složitý. (KWU-Kraftwerk Union) [5]

Westinghouseův separátor – směs vody a páry prochází skrze vířivé lopatky. Voda je vyseparovaná v podobě tenkého filmu na stěně přívodní trubky. Pára odchází ústím ve středu horní krycí desky. Účinnost tohoto zařízení se pohybuje okolo 75%. Tento separátor bude podrobněji popsán v dalším (části, odstavci). [5]

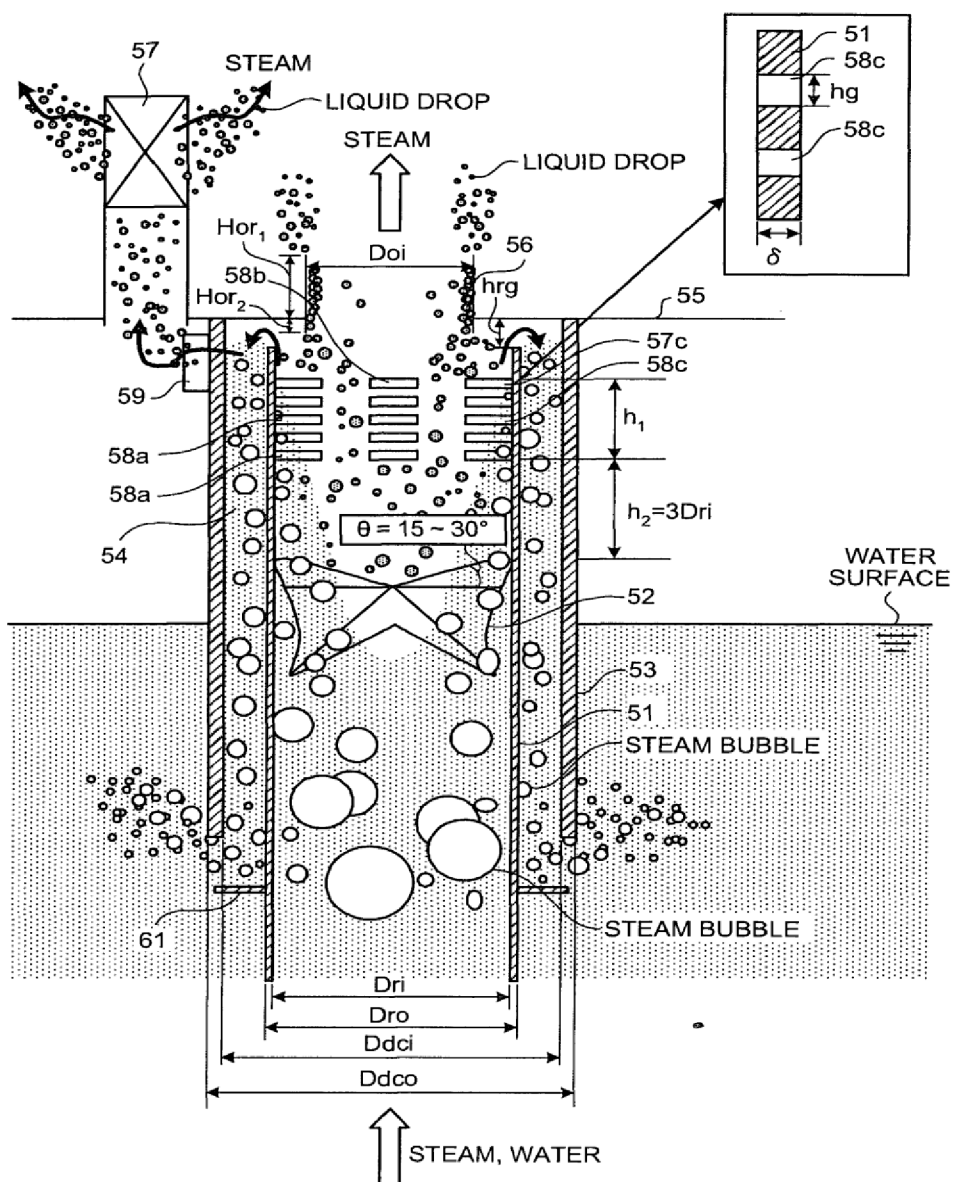




Obr. 7 Westinghouseův separátor[5]

### 2.2.3 Westinghouseův separátor

Separátor obsahuje přívodní potrubí s množstvím otvorů v horní části, kterým proudí mokrá pára. Uvnitř přívodního potrubí je vírová lopatka. Úhel zkroucení vírové lopatky se pohybuje mezi  $30^\circ - 70^\circ$ . Svodový válec, který obklopuje přívodní potrubí, vytváří spádový prostor pro odvod vyseparované vody. Na horním konci přívodního potrubí a svodového válce je umístěna krycí deska obsahující ústí pro odvod páry. Poměr vnitřního průměru ústí a vnitřního průměru přívodního potrubí se pohybuje v rozmezí  $0,7 - 0,9$ . Poměr mezi horní projekční výškou a dolní projekční výškou ústí vzhledem ke krycí desce přívodního potrubí je nastaven na hodnotu  $2:1 - 4:1$ . [5][6]

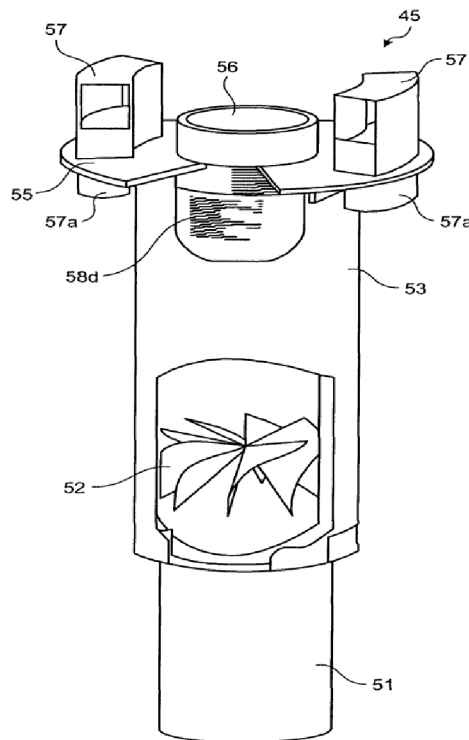


Obr. 7 Westinghouseův separátor [6]

51 – přívodní trubka separátoru, 52 – vířivá lopatka, 53 – svodový válec, 54 – prostor svodu, 55 – krycí deska, 56 – ústí, 57 – průduch, 58 – horizontální obdélníkové otvory, 59 – jednotka odvodu páry

Ve spodní části přívodního potrubí je horizontálně umístěna deska ve tvaru koblíhy. Při vytékání vyseparované vody ze spádového prostoru brání tato deska odnosu bublin páry ven ze separátoru. Tento jev se nazývá carry-under. [5][6]

Dvě jednotky odvodu páry, které jsou umístěny na stěně svodového válce. Na horním konci přívodního potrubí jsou na jeho obvodu rovnoměrně rozmístěny čtyři otvory. Dva z těchto otvorů leží naproti jednotkám odvodu páry. Těmito jednotkami je pára dále odváděna do průduchů umístěných na krycí desce separátoru. [5][6]



**Obr. 8 Westinghouseův separátor [6]**

45 – separátor páry, 51 – přívodní trubka separátoru, 52 – vírová lopatka, 53 – svodový válec, 55 – krycí deska, 56 – ústí, 57 – průduch, 58 – horizontální obdélníkové otvory

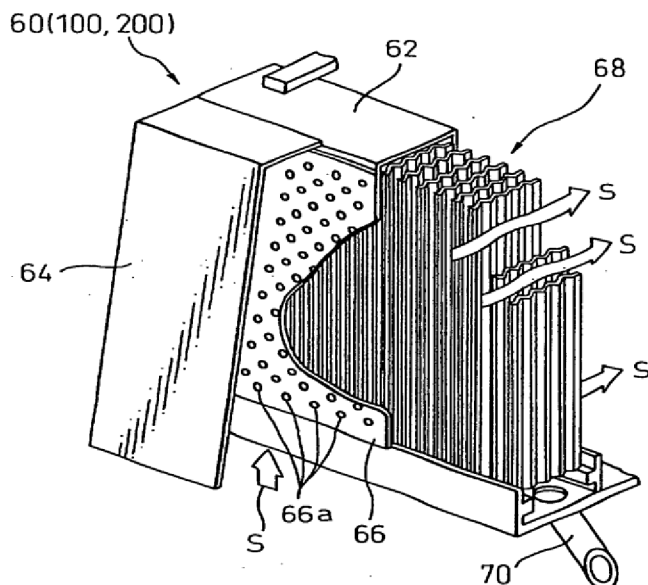
Na stěně přívodního potrubí nad vírovou lopatkou je množství horizontálních obdélníkových otvorů, které slouží k odvodu vyseparované vody do spádového prostoru. Rozmístění otvorů je rovnoměrné po celém obvodu přívodního potrubí. Výška každého otvoru se pohybuje v rozmezí 0,5 – 0,2 násobku tloušťky přívodního potrubí. Vzdálenost mezi vírovou lopatkou a otvory pro odvod vyseparované vody je asi 1 – 2,5 násobek průměru přívodního potrubí separátoru. [5][6]

#### 2.2.4 Princip separace

Směs vody a páry vstupuje do přívodního potrubí separátoru, prochází vírovou lopatkou která vytváří vír, při kterém dochází k oddělování plynné a kapalně složky. Separace je způsobena rozdílem ve vířivém poloměru vody a páry v závislosti na rozdílu hmotnosti. Vír páry s malým vířivým poloměrem je odváděn ze separátoru ústím nad krycí desku separátoru. Vír vody s velkým vířivým poloměrem vytváří film na povrchu přívodního potrubí. Voda je odváděna množstvím horizontálních otvorů na povrchu přívodního potrubí do spádového prostoru. Výška otvorů pohybující se okolo 0,5 – 2 násobku tloušťky přívodního potrubí zamezuje vstupu páry do svodového prostoru. [5][6]

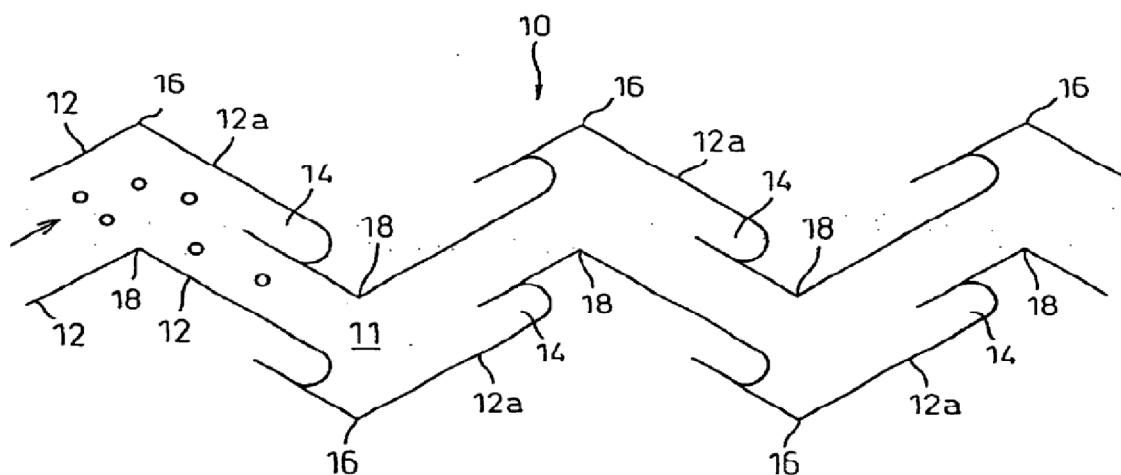
Část páry odchází z přívodního potrubí jednotkami odvodu páry do průduchů na horní krycí desce. Pára je tak zcela izolována od vodního víru. Tímto se zamezuje odnášení kapiček vody s párou a zvyšuje se účinnost separace. [5][6]

Kvalita vyseparované páry se zvyšuje v sekundárních separátorech. Pára prochází klikatými trasami, kde jsou separovány drobné kapičky vody v kapsách sekundárního separátoru. [5][6]



**Obr. 9 Sekundární separátor [7]**

62 – plášť, 64 – krycí deska, 66a – průduchy, 66 – děrovaný panel, 68 – klikaté kanály, 70 – vypouštěcí potrubí.

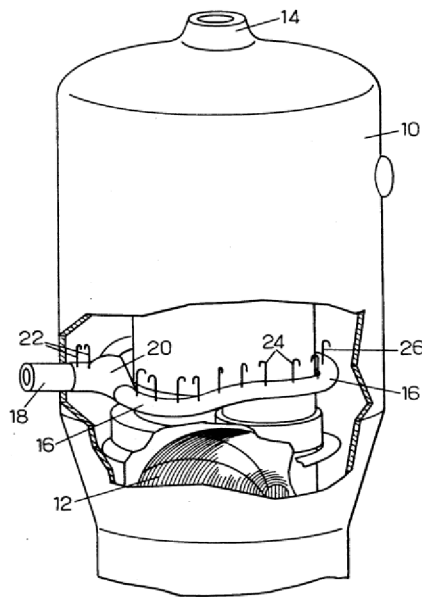


**Obr. 10 Trasa sekundárního separátoru [7]**

10 – sekundární separátor, 11 – klikaté kanály, 12a – boční odvod vyseparované vody, 12 – rámová deska, 14 – sběrné kapsy, 16 – kanálky pro odvod vyseparované vody

### 2.3 Napájení parogenerátoru

Napájení parogenerátoru je zajišťováno pomocí napájecího potrubí v jeho horní části. Napájecí potrubí obsahuje řadu trubek zahnutých do tvaru písmene „J“. Trubky vystupují vertikálně nad napájecí potrubí a slouží k odvodu napájecí vody do mezikruhového prostoru mezi pláštěm tlakové nádoby a pláštěm trubkového svazku. [8]



**Obr. 11 Napájecí potrubí parogenerátoru [8]**

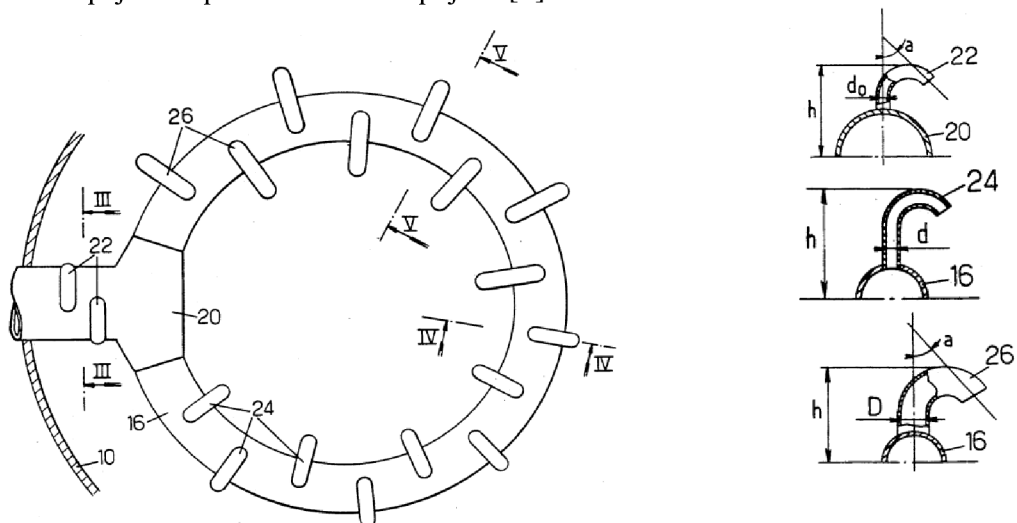
10 – tlaková nádoba, 12 – trubkový svazek, 14 – výstupní parní hrdlo, 16 – napájecí potrubí, 18 – hrdlo, 20 – T – spojka, 22, 24 a 26 – J – trubky

### 2.3.1 Napájecí potrubí

Připojení napájecího potrubí k vstupní napájecímu hrdlu je provedeno pomocí T – kusu. T – kus je k napájecímu nátrubku a napájecímu prstenci přivařena. Uvnitř spojky je umístěn deflektor, který snižuje riziko vodního rázu. Na spojce jsou tak, jako na napájecím prstenci, dvě J – trubky pro odvod napájecí vody do mezikruhového prostoru Parogenerátoru. [8]

### 2.3.2 J – trubky

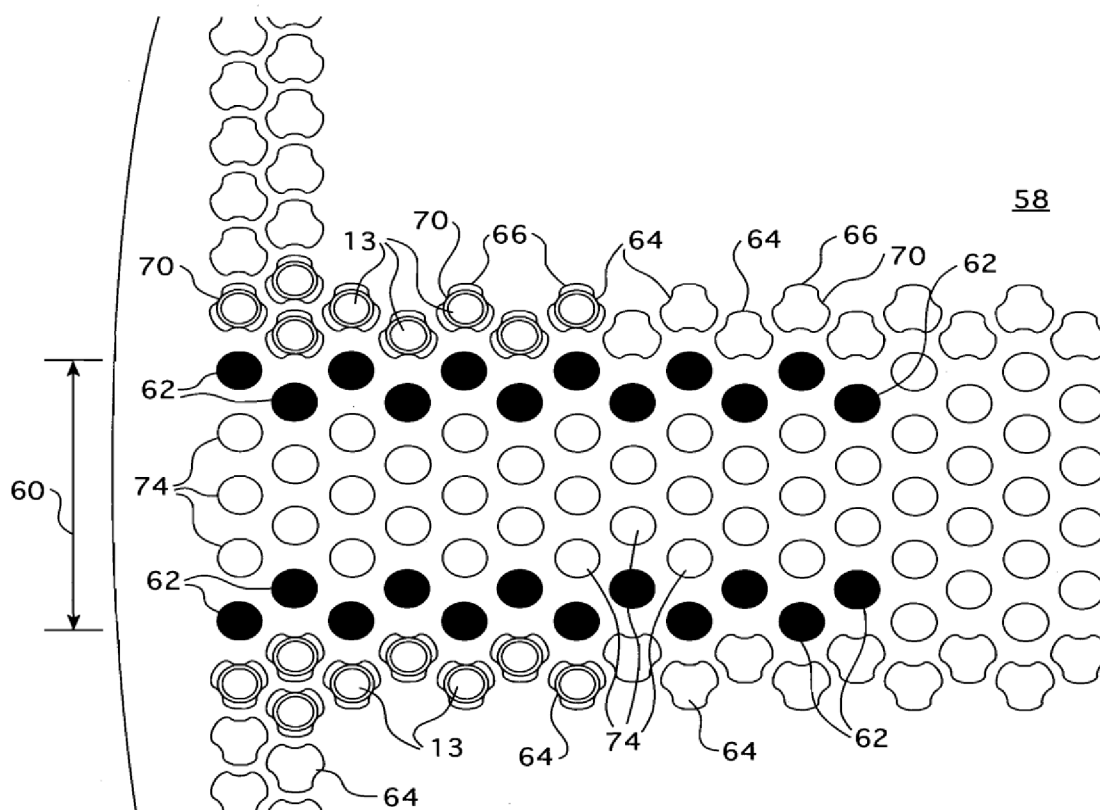
J – trubky jsou navrženy tak, aby úhel mezi proudem vypouštěné napájecí vody svíral s osou z  $5^\circ - 30^\circ$ . Tímto úhlovým rozmezím je zamezeno narážení proudu vody na trubici napájecího prstence a na T spojku. [8]



**Obr. 12 Napájecí potrubí parogenerátoru [8]**

## 2.4 Distanční desky

Teplosměnné trubky jsou v parogenerátoru zajištěny pomocí distančních desek. Teplosměnné trubky jsou distančními deskami vedeny skrze otvory, které jsou navrženy tak, aby byly teplosměnné trubky pevně ukotveny v jednotlivých otvorech a nedocházelo tak k vibracím. Otvory zároveň musí volně procházet proud chladicí kapaliny. Toho je docíleno tvarem otvorů, který připomíná trojlístek. Teplosměnné trubky jsou v otvorech distančních desek ukotveny ve třech opěrných bodech a proud chladicí kapaliny prochází promývacími štěrbinami. [9]



Obr. 13 Distanční deska [9]

13 – U – trubky, 58 – distanční deska, 60 – střed distanční desky, 62 – krycí tyče, 64 – otvory pro teplosměnné trubky, 66 – promývací štěrbiny, 70 – opěrné body U – trubek, 74 – průtokové otvory

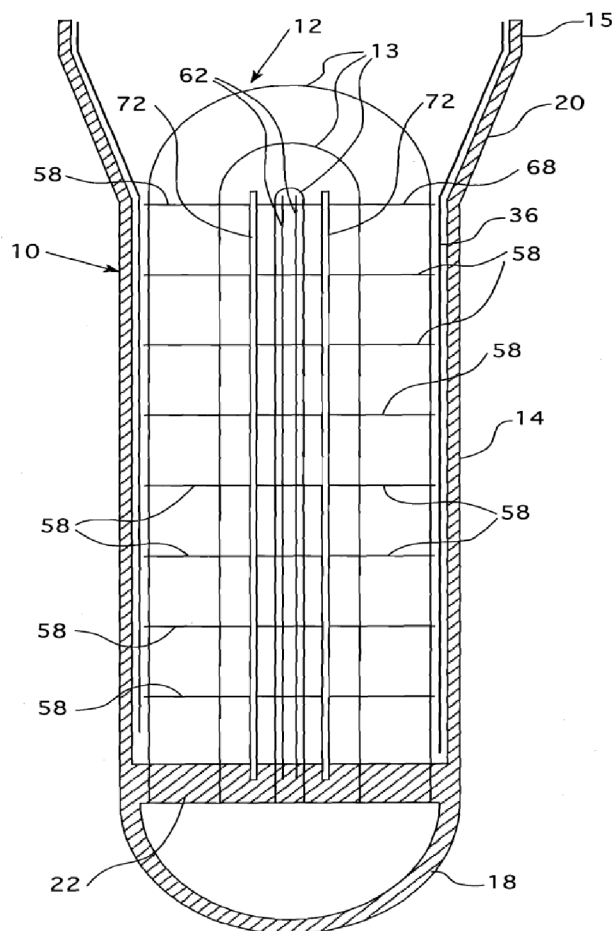
Průchod vysokoteplotního chladicího média primárního okruhu teplosměnnými trubkami a intenzivní var vody v jejich okolí, může vyvolat výše zmíněné vibrace teplosměnných trubek. [9]

První tři řady teplosměnných trubek, směrem od středu trubkového svazku, jsou nejvíce náchylné na turbulence způsobující jejich kmitání a opotřebení. Kmitání je vyvoláno příčným prouděním do prostoru teplosměnných trubek. [9]

Turbulence jsou rapidně oslabovány v prvních třech řadách teplosměnných trubek. Průtokové otvory v blízkosti středu distančních desek omezují proudění chladicí kapaliny mezi teplosměnné trubky a vedou ji nahoru do U-ohybu teplosměnných trubek. [9]

#### 2.4.1 Krycí tyče

Krycí tyče, procházejí průtokovými otvory po obou stranách středu trubkového svazku, chrání první tři řady teplosměnných trubek proti nárazům, které jsou způsobeny příčným prouděním chladicí kapaliny do trubkového svazku a prouděním chladicí kapaliny skrze průtokové otvory do U-ohybu teplosměnných trubek. Krycí tyče jsou vyrobeny z nerezové oceli, nebo z jiného nerezavějícího materiálu a jsou vyvedeny pár centimetrů nad poslední distanční desku, kterých je osm, do prostoru U-ohybu teplosměnných trubek. [9]



**Obr. 14 Podpůrné a Krycí tyče [9]**

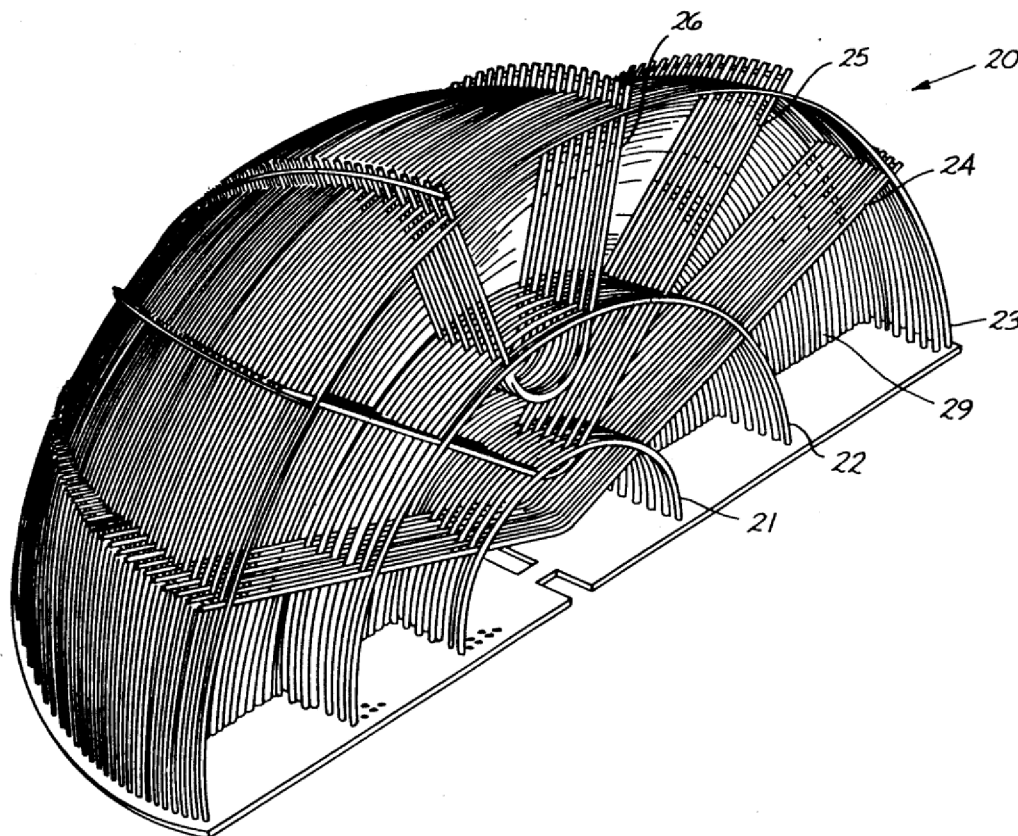
10 – parogenerátor, 12 – trubkový svazek, 13 – teplosměnné trubky, 15 – tlaková nádoba, 18 – prostor pod trubkovnicí, 22 – trubkovnice, 36 – plášť trubkového svazku, 58 – distanční deska, 62 – Krycí tyče, 72 – podpůrné tyče

Distanční desky jsou nesené podpůrnými tyčemi, které jsou připojeny k obalu trubkového svazku a v dolní části parogenerátoru jsou přivařeny k horní straně trubkovnice, nebo jsou do ní zašroubovány. Podstatná část podpůrných tyčí se nachází mezi teplou a studenou větví teplosměnných trubek a zabraňuje bočnímu pohybu distančních desek. Podpůrné tyče mají stejný průměr jako teplosměnné trubky, čímž nedochází k žádným překážkám při servisních operacích. [9]

Krycí tyče mohou být zasazeny do průtokových otvorů s přesahem. Tímto se dosáhne lehkého předpětí, které pomůže eliminovat opotřebení způsobené vibracemi. [9]

## 2.5 Nosné rámy teplosměnných trubek v U-ohybu

Vibrace v oblasti U-ohybu teplosměnných trubek jsou eliminovány pomocí antivibračních V-tyčí. Nezbytné mezery mezi V-tyčemi a teplosměnnými trubkami umožňují kmitání, které způsobuje tření, korozi a další mechanické namáhání teplosměnných trubek. [10]

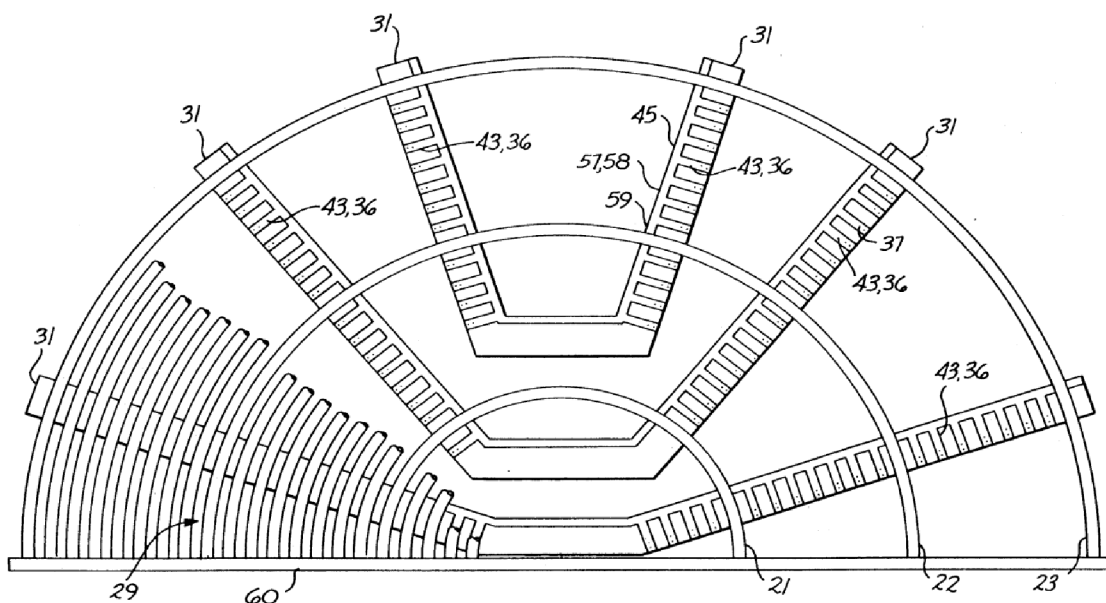


Obr. 16 Antivibrační tyče [10]

20 – U – ohyb teplosměnných trubek, 21, 22, 23 – teplosměnné trubky, 24, 25, 26 – antivibrační tyče

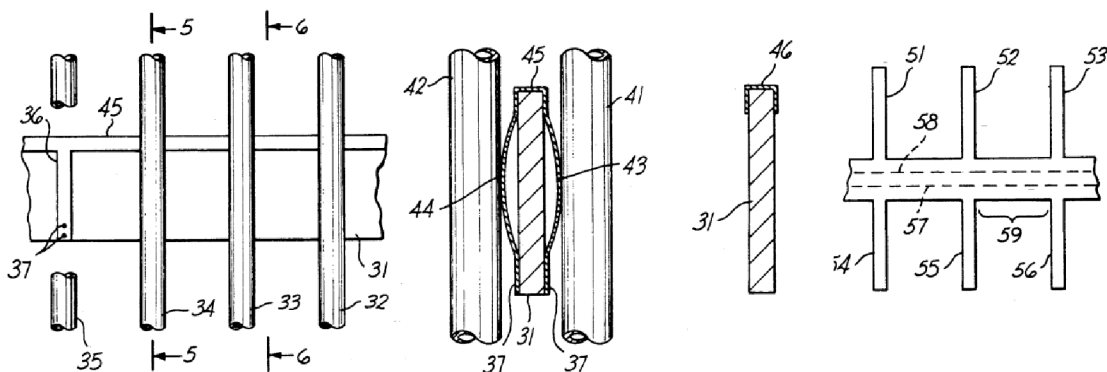


Tento problém je vyřešen nahrazením antivibračních V-tyčí za nosné V – rámy, na kterých je řada listových pružin zajišťující pružné spojení mezi teplosměnnými trubkami a nosným rámem. Materiál a tvar listových pružin je zvolen tak, aby jejich tuhost byla rovna pětinašobku tuhosti teplosměnných trubek. Díky tomuto poměru jsou teplosměnné trubky v neustálém kontaktu s listovými pružinami, čímž je zabráněno jejich rozkmitání. Listové pružiny jsou spojeny s rámem pružinovými svorkami a na koncích jsou k rámu přivařené. Pružinové svorky stlačují pružinu a ohýbají jí tak do tvaru luku. [10]



Obr. 15 Nosné V – rámy [10]

21, 22, 23 – teplosměnné trubky, 31 – nosný V – rám, 36, 43 – pružiny, 45 – pružinová svorka

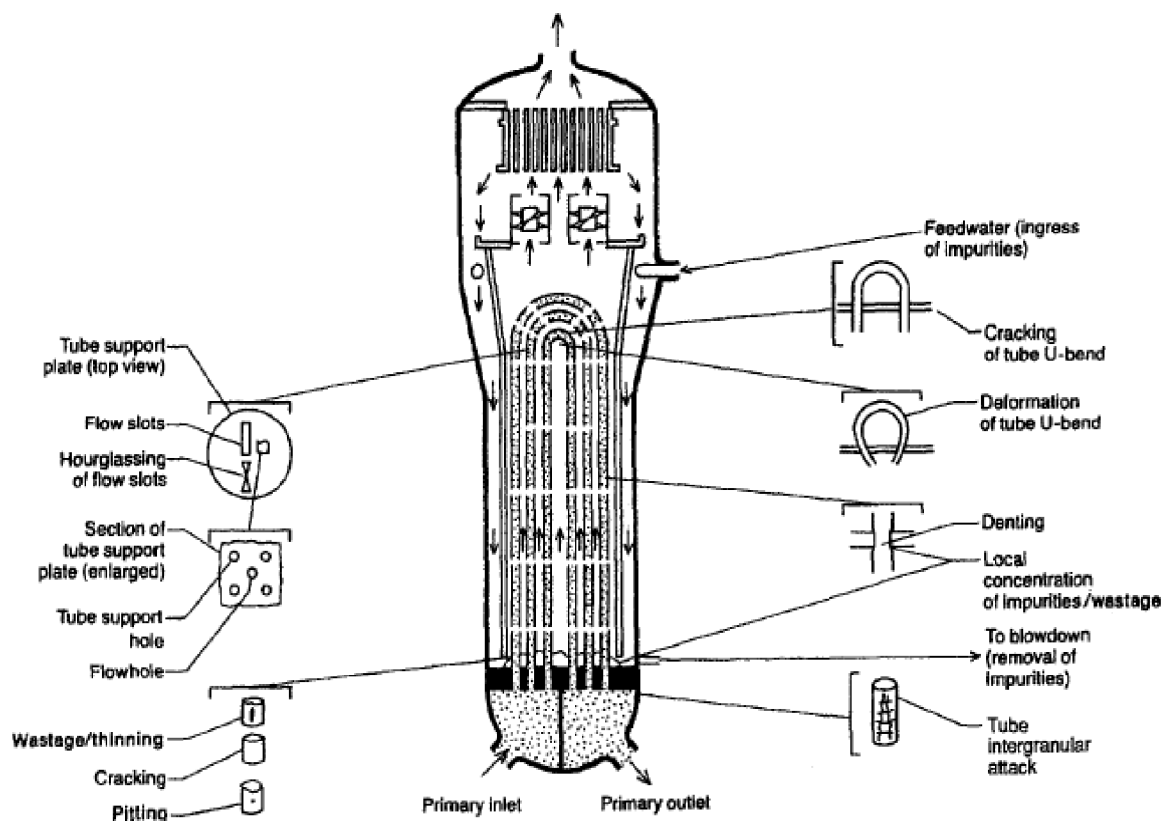


Obr. 16 Listové pružiny [10]

31 – nosné V – tyče, 32, 33, 34, 35 – teplosměnné trubky, 36 – listová pružina, 37 – bodový svar, 41, 42 – teplosměnné trubky, 43, 44 – listové pružiny, 45 – pružinová svorka, 46 – dřík, 51, 52, 53, 54, 55, 56 – listové pružiny, 59 – dřík

## 2.6 Poruchy Parogenerátoru PWR

Poruchy U-trubkového parogenerátoru zahrnují vznik vrubů na trubkách, mezikrystalické praskání, zeslabování stěn, korozi, prouděním vyvolané vibrace, praskání a deformace trubek v U-ohybu, praskání distančních desek, úletu (carry-over) a odnos dolů (carry-under). [3][5]



Obr. 17 Místa výskytu poruch parogenerátoru PWR [5]

### 2.6.1 Zeslabování trubkové stěny

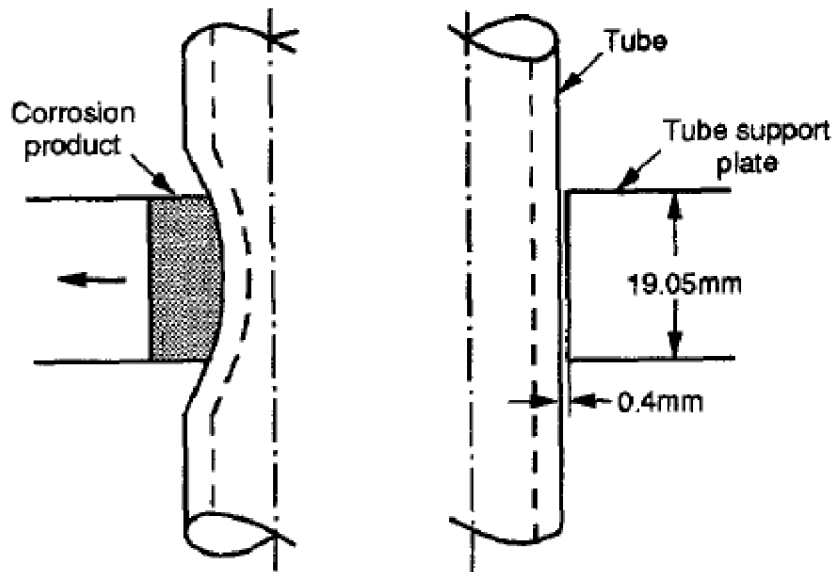
Jeden z prvních problémů, který se vyskytl u recirkulačních parogenerátorů pracujících s fosforečnanem sodným sloužícím pro úpravu vody, bylo zeslabování trubkových stěn. Zeslabování trubkových stěn se nejvíce vyskytovalo na rozhraních mezi teplosměnnými trubkami a horní stranou trubkovnice, konkrétně pod kalovými usazeninami na straně horké větve. V případech vysokých kalových usazenin, zóna zeslabení pronikala do hloubky až 2,5 cm od vrcholu kalové usazeniny. Ve většině případů zóna zeslabení zřetelně nepronikala do teplosměnných trubek nebo do trubkovnice. [3][5]

### 2.6.2 Vznik vrubů (promáčknutím)

Vznik vrubů byl objeven v roce 1975, když sonda na měření vířivých proudů uvnitř teplosměnných trubek, nemohla projít v místech, kde teplosměnná trubka prochází skrze otvor v distanční desce. Vznik vrubů znamená zmenšení průměru teplosměnné trubky, ke kterému dochází při korozi v otvoru distanční desky z uhlíkaté oceli, kde produkty koroze deformují trubku. Koroze byla způsobena neochrannou vrstvou oxidu v otvoru distanční desky. Produkty koroze o poměrně velkém objemu

plnily otvory v distančních deskách a deformovaly teplosměnnou trubku a distanční desku zároveň. [3][5]

V promývacích štěrbinách otvorů na distanční desce byla pozorována vysoká koncentrace kyselých chloridů. Faktorem přispívajícím k těmto vysokým koncentracím jsou nevhodné teplotně hydraulické podmínky, které způsobují vznik agresivních druhů chloridů. Předpokládá se, že opakované smáčení a vysoušení štěrbin, v důsledku určité nestability dvoufázového proudění kapaliny, může způsobit pozorované koncentrace chloridů. Non-protective magnetit (NMP) nemůže být sám produkován neutrálními chloridy, ale přítomnost redukovatelných kationtů kovu může vést k jejich tvorbě spolu s přítomností kyslíku. [3][5]



Obr. 18 Vznik vrubu promáčknutím [5]

Podle předběžných testů se ukázalo, že sulfáty, používané k úpravě vody z chladících věžích v demineralizérech, se mohou chovat podobně jako chloridy. [3][5]

Ke vznikům vrubů docházelo v důsledku nedostatečné kontroly chemického složení sekundární vody. Největším zdrojem nečistot byly úniky z netěsností v kondenzátoru. [3][5]

### 2.6.3 Korozní praskání na primární straně

Docházelo k praskání teplosměnných trubek ze slitiny INCONEL 600, která má velký obsah niklu, ve vysoce čisté vodě o teplotě 350°C. K tomuto jevu docházelo v U-ohybech v oblastech přechodu mezi teplou a studenou větví a v trubkovnici na straně teplé větve. Úniky z teplosměnných trbek v U-ohybu byly zaznamenány už po dvou letech provozu parogenerátoru. K praskání docházelo převážně na vnitřních řadách teplosměnných trubek. Korozní praskání na primární straně je forma mezikrystalické koroze pod napětím, která nastává při zvýšené tahové napjatosti, při určitém stavu prostředí a náchylnosti materiálu. [3][5]

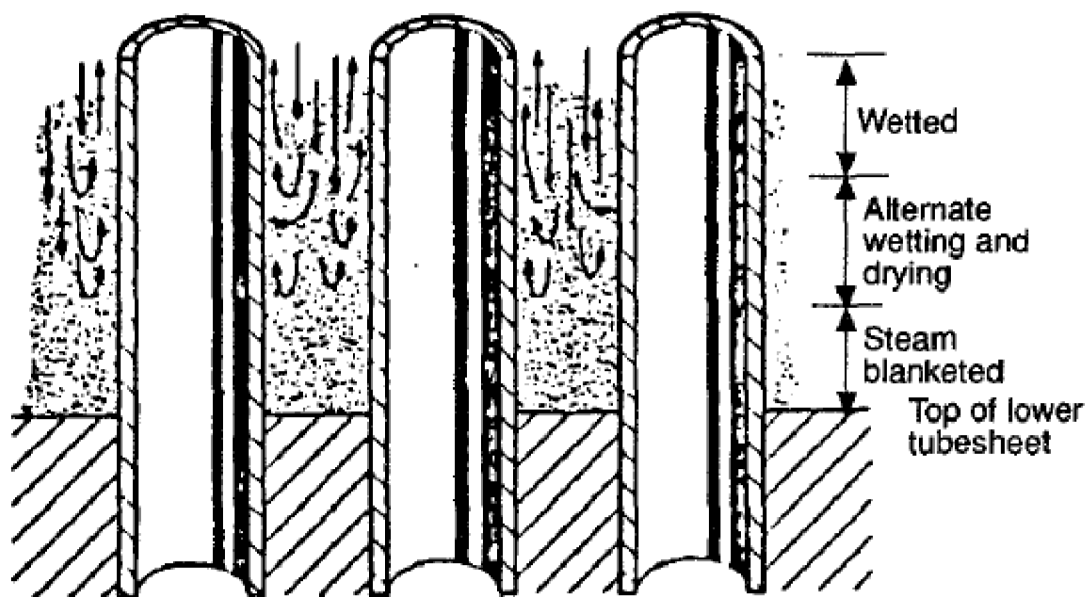
Opatřením proti koroznímu praskání bylo snížení teploty ve vnitřních řadách teplosměnných trubek v U-ohybu. Snížení teploty bylo zajištěno snížením průtoku v dané trubce. Toto opatření vedlo k vyrovnání teploty mezi teplou a studenou větví

v U-ohybu teplosměnných trubek. Dalšími opatřeními proti zbytkové napjatosti byly změny tepelného zpracování trubek a kuličkování vnitřního povrchu teplosměnných trubek. [3][5]

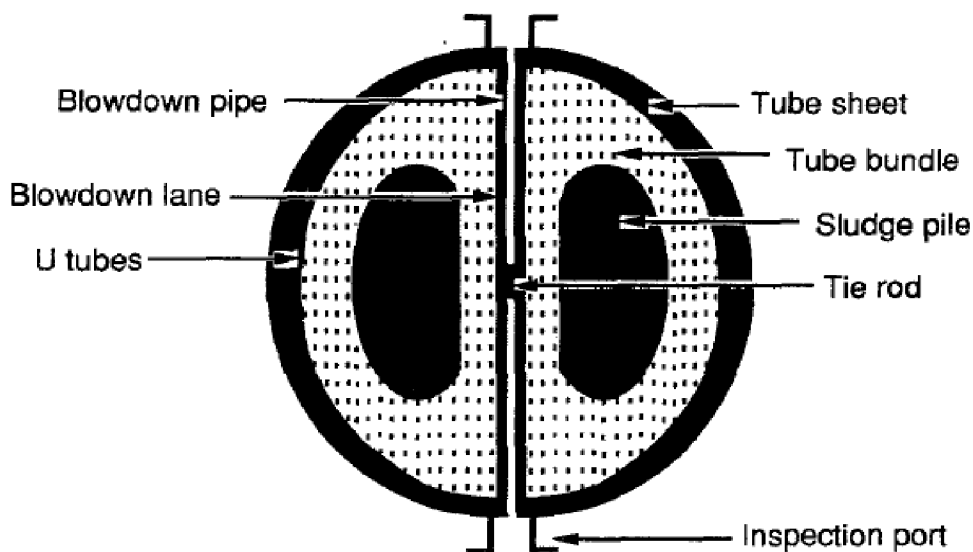
Jedno z dalších opatření bylo zavedení nátrubků do otvorů trubkovnice, které vystupovaly až 1m nad ni. Teplosměnné trubky procházející těmito nátrubky byly chráněné proti vzniku vrubů a proti mezikrystalické korozi tím, že byly odděleny od oblastí usazenin kalů na horní straně trubkovnice. [3][5]

#### 2.6.4 Kaly a praskání sekundární strany

Praskání sekundární strany se vyskytovalo u trubek, které vykazovaly rozsáhlou mezikrystalickou korozi, konkrétně v otvorech trubkovnice na straně teplé větve. V těchto otvorech se usazovaly žíravé usazeniny spolu s dalšími materiály. Zvýšená koncentrace chemikálií se vyskytovala v oblastech, kde dochází k opakovanému smáčení a vysušování, které je urychlováno přítomností kalů na trubkovnici. Zvýšená koncentrace hydroxidu sodného zvyšuje bod varu vody. Jedna z metod, která vede ke zmírnění těchto problémů, je výplach štěrbin. Štěrbiny se vyplní vodou, následně dojde k odtlačování parogenerátoru, což způsobí nukleaci bublin ve štěrbinách, které vyplaví ven kapalinu s vysokou koncentrací rozpuštěných chemikálií. [3][5]



Obr. 19 Usazování kalů na horní straně trubkovnice [5]



Obr. 20 Formy kalových usazenin v Trubkovém svazku [5]

### 2.6.5 Místa s výskytem koroze

Většinu problémů s korozi v parogenerátoru lze přičíst zvýšené koncentraci netěkavých iontových nečistot vyskytujících se v místech, která mají omezený přístup k velkému objemu cirkulační vody a ve kterých je teplota vyšší než teplota nasycení čisté vody. Typickými místy jsou mezery mezi teplosměnnými trubkami a trubkovnicí, trhliny v trhliny v trubkovnici a místa pod usazeninami kalů.

V případě, kdy množství netěkavých iontových látek dosáhne hranici rozpustnosti pevných látek, začnou pevné částice ucpávat výše zmíněné mezery. Teplota varu v takto uspaných mezerách výrazně stoupne a to až nad teplotu sytosti vody. K zastavení varu dochází všude, kde se koncentrace iontových částic zvýší natolik, že teplota sytosti dosáhne stejné hodnoty, jako je lokální přehřátí. [3][5]

### 2.6.6 Vibrace a opotřebení teplosměnných trubek

Trubky, které jsou vystaveny vnějšímu proudění, začnou vibrovat. Režim vibrací a jejich amplituda jsou závislé na geometrii konstrukce, rychlosti a směru proudění a na vlastnostech kapaliny. Prouděním vyvolané vibrace můžou mít za následek poškození konstrukce a můžou narušit integritu jednotlivých teplosměnných trubek, zapříčiněnou třením a opotřebením. [3][5]

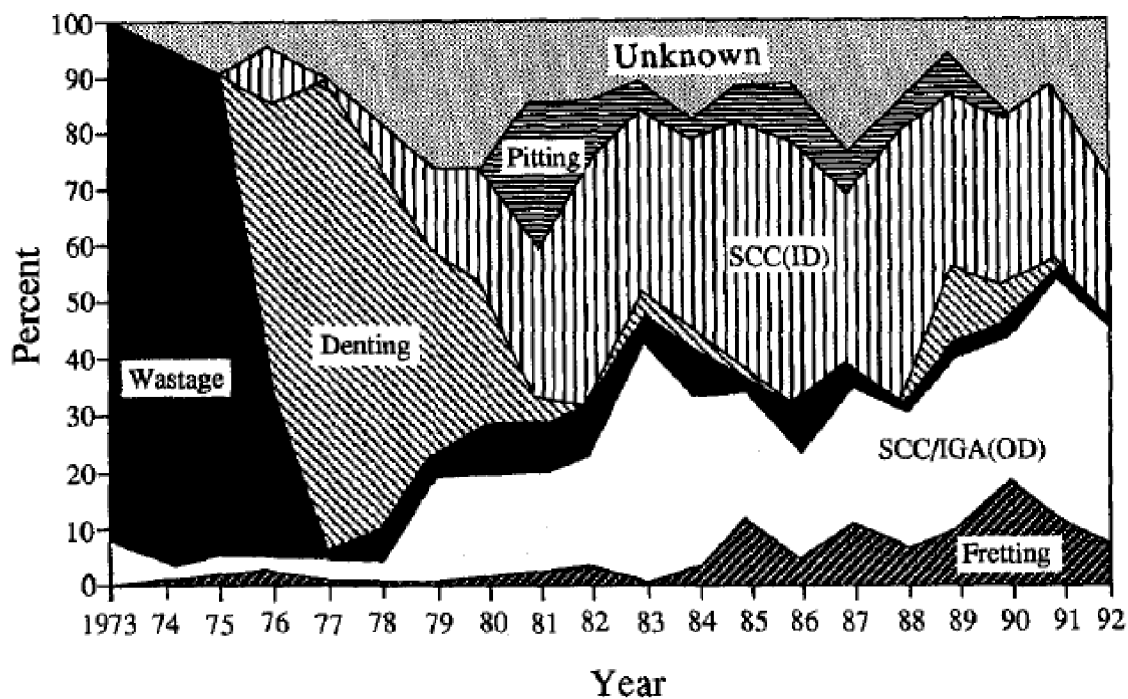
Teplosměnné trubky parogenerátoru jsou velice dlouhé, štíhlé a mají tenké stěny, a proto je nutné, aby byly upevněny v distančních deskách. Teplosměnné trubky jsou uloženy v distančních deskách s určitou montážní vůlí, díky které mohou trubky vibrovat. Vibrace způsobují opakované narážení trubek do distančních desek a způsobují tření mezi nimi. Stupeň opotřebení určuje, zda ztráta materiálu ze stěny trubky bude dostatečně nízká na to, aby neovlivnila očekávanou životnost celého parogenerátoru, nebo zda toto opotřebení bude mít za následek takové zeslabení stěny trubky, že bude nutné ji předčasně zaslepit. [3][5]

Kromě výše zmíněných dopadů vibrací, jsou oblasti s výskytem tření citlivé na vznik únavových trhlin. Únavové trhliny můžou vznikat v blízkosti povrchu materiálu při velmi nízkých napětích. V případě cyklického namáhání trubek způsobeného

vibracemi, dochází k šíření a růstu trhlin, které může vést k předčasnému selhání trubky. V případě narážení teplosměnných trubek do distančních desek, může docházet ke skluzu na hranicích zrn, které jsou více citlivé ke korozi. [3][5]

Vibrace, vyvolané náhodnými turbulencemi uvnitř trubkového svazku, jsou často označovány jako podkritické vibrace. Tyto vibrace mají mnohem menší amplitudu, než je běžné v nestabilní elastické kapalině. Podkritické vibrace spolu se třením a opotřebením slouží jako kritérium pro určování životnosti trubkového svazku. [3][5]

Další mechanismus vzniku vibrací je spojen s odtrháváním víru nebo s Kármánovou vírovou stezkou. Když se vlastní frekvence teplosměnné trubky shoduje s frekvencí odtrhávání víru, dochází k pohybům trubek, které jsou způsobeny velkou amplitudou. Významnou vlastností synchronizovaného odtrhávání víru je velké zvětšení proměnlivých sil působících na množství trubek v porovnání se silami působících na jednu trubku. [3][5]

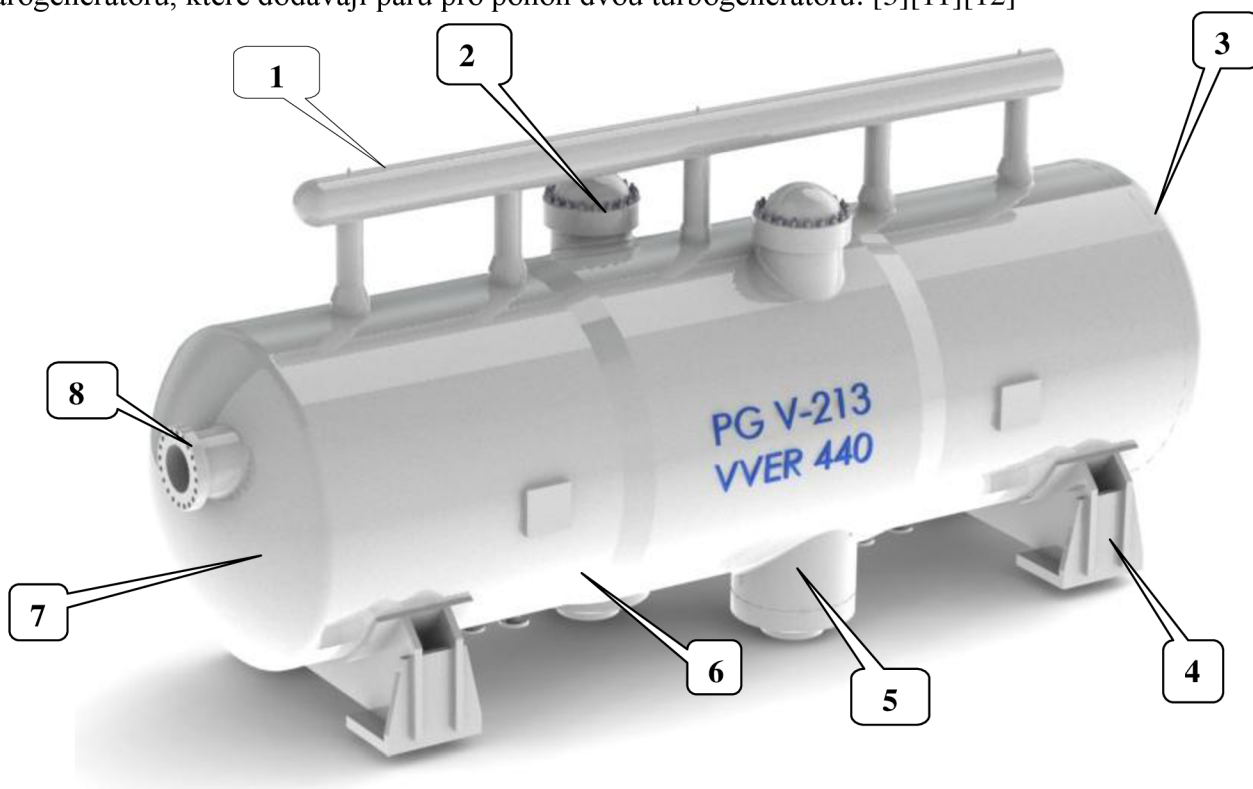


Obr. 21. Příčiny zaslepení teplosměnných trubek [5]

### 3. Parogenerátor VVER 440

Parní generátor VVER 440 je horizontální válcová nádoba, která obsahuje dva kolektory pro vstup a výstup primární chladicí kapaliny. Primární chladicí kapalina je z kolektoru rozváděna teplosměnnými trubkami. Teplosměnné trubky rozmístěné v horizontálních řadách mají tvar písmene „U“ a vytváří svazek v pravé i levé části parogenerátoru. Trubkový svazek je v parogenerátoru uchycen v několika distančních mřížích, které jsou umístěny kolmo k teplosměnným trubkám. [3][11][12]

Teplosměnné trubky napojené na vstupní a výstupní kolektor vytváří uzavřenou smyčku, která odděluje primární chladicí kapalinu od napájecí vody, která je do parogenerátoru kontinuálně přiváděna napájecím potrubím. Generovaná pára prochází separátorem a je odváděna parním potrubím. Na jednom bloku VVER 440 je šest parogenerátorů, které dodávají páru pro pohon dvou turbogenerátorů. [3][11][12]



Obr. 22 Parogenerátor VVER 440 [3][11][12]

*1 – parovod, 2 – výstupní kolektor, 3 – horké víko, 4 – podpěra, 5 – vstupní kolektor, 6 – tlaková nádoba, 7 – studené víko, 8 – přírubová vlez na sekundární stranu parogenerátoru*

#### 3.1 Tlaková nádoba

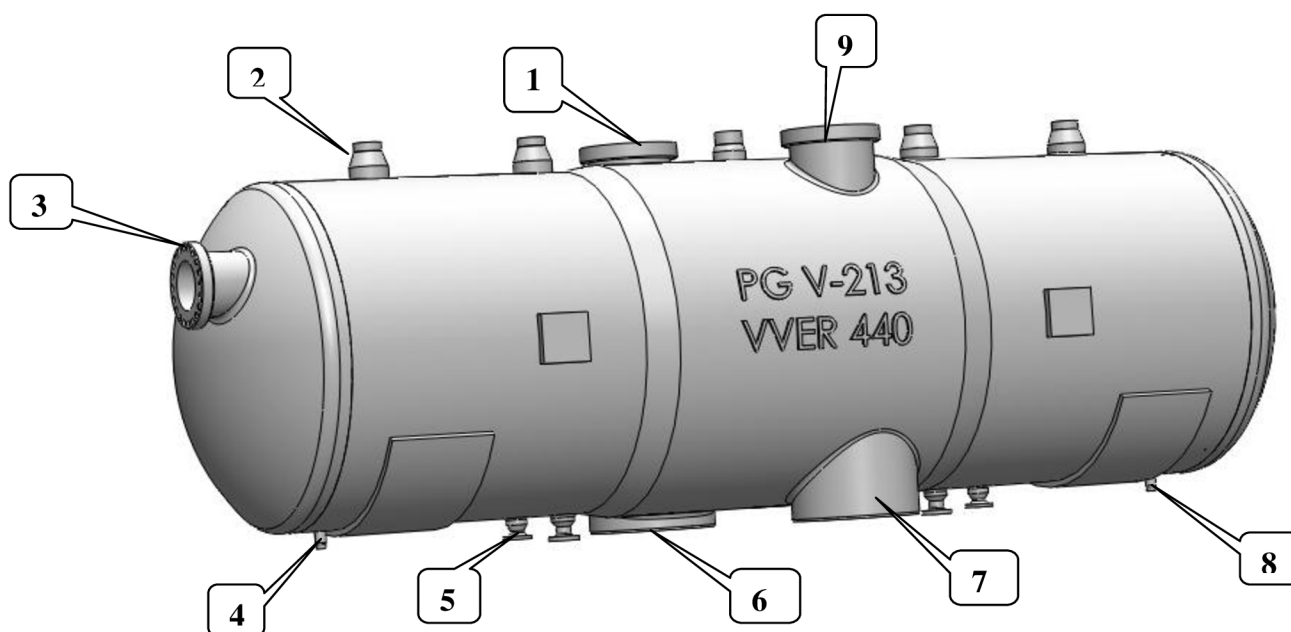
Parogenerátor tvoří tlaková nádoba, která má vnitřní průměr 3210 mm a délku 11800 mm. Tlaková nádoba je svařena z šesti kruhových částí. Dvě kruhové části na pravé a levé straně mají tloušťku stěny 75 mm a dvě kruhové části ve středu tlakové nádoby mají tloušťku stěny 135 mm. Tlaková nádoba je uzavřena víky eliptického tvaru s tloušťkou stěny 184 mm. Víko, které je umístěné v blízkosti výstupního kolektoru se nazývá „horké víko“ a víko umístěné v blízkosti vstupního kolektoru se nazývá „studené víko“. [3][11][12]

Ve střední části tlakové nádoby jsou ve spodní a horní části dva nátrubky, ve kterých je umístěn vstupní a výstupní kolektor. Nátrubky v horní části jsou uzavřeny sekundárními víky a opatřeny nátrubky pro odvod vzduchu. Pro těsnění sekundárních vík se používá hřebenové těsnění. [3][11][12]

Vstup do parogenerátoru je zajištěn pomocí průlezu umístěným na „studeném víku“ tlakové nádoby. Vstup umožňuje kontrolu nebo případné opravy uvnitř tlakové nádoby. Utěsnění přírubového spoje průlezu je zajištěno hřebenovým těsněním. [3][11][12]

V horní části tlakové nádoby se nachází nátrubek pro přívod napájecí vody, nátrubek superhavarijního napájení, 5 nátrubků pro připojení parního kolektoru, 12 nátrubků pro připojení vyrovnávacích nádob a nátrubky pro připojení jednokomorové vyrovnávací nádoby. [3][11][12]

Ve spodní části tlakové nádoby se nachází nátrubek pro vypouštění napájecí vody, nátrubky pro odluh a nátrubky pro připojení jednokomorové vyrovnávací nádoby. [3][11][12]



**Obr. 23 Tlaková nádoba parogenerátoru VVER 440 [3][11][12]**

*1 – nátrubek pro výstupní kolektor, 2 – nátrubek pro odvod páry, 3 – přírubová vlez na sekundární stranu parogenerátoru, 4 – nátrubek stálého odluhu, 5 – technologický nátrubek, 6 – nátrubek pro výstupní kolektor, 7 – nátrubek vstupního kolektoru, 8 – nátrubek odluhu*

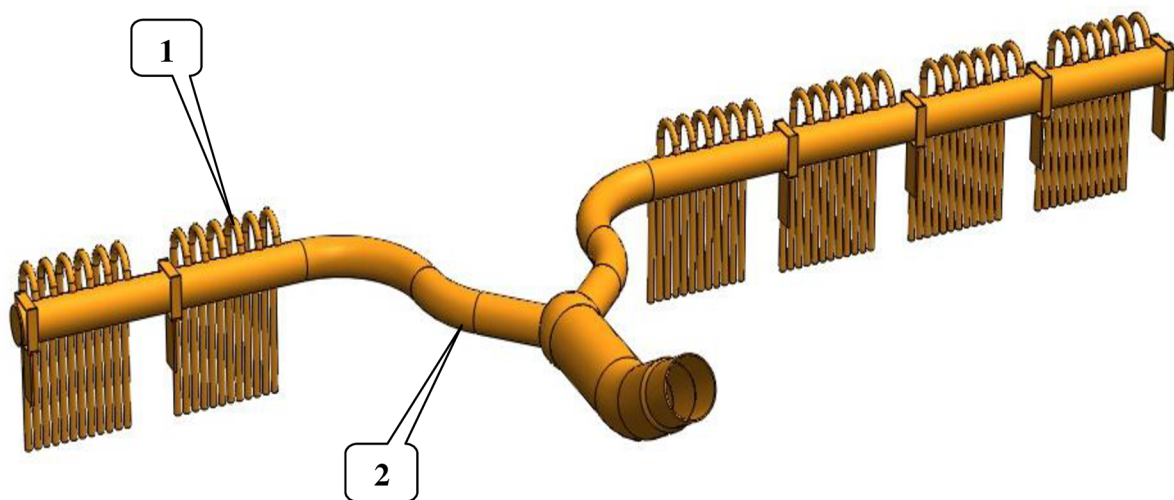
### 3.2 Napájecí potrubí

Napájecí voda proudí do parogenerátoru skrze přívodní napájecí potrubí, které je k tlakové nádobě připojeno prostřednictvím nátrubku. Rozvod napájecí vody uvnitř parogenerátoru je zajištěn dvěma napájecími trubkami, které jsou připojeny ke spojce,



kteřá má tvar písmeny „Y“. Spojka je přivařená k přívodnímu napájecímu potrubí. Napájecí voda je z napájecích trubek odváděna trubicemi, které jsou vyvedeny kolmo nad napájecí trubky a mají tvar obráceného písmene „J“. „J“ trubice jsou vyvedeny pod hladinu napájecí vody k horkému kolektoru, kde je proud napájecí vody usměrňován v horizontálním směru, aby se eliminovalo negativní ovlivňování spodní části tlakové nádoby studenou napájecí vodou. Toto provedení napájecí vody umožňuje ovlivňovat teplotu v okolí horkého kolektoru. [3][11][12]

Výška hladiny v okolí vstupního kolektoru se reguluje pomocí hladinového separátoru, který je tvořen děrovanými plechy a upevněn na distančních mřížkách. [3][11][12]

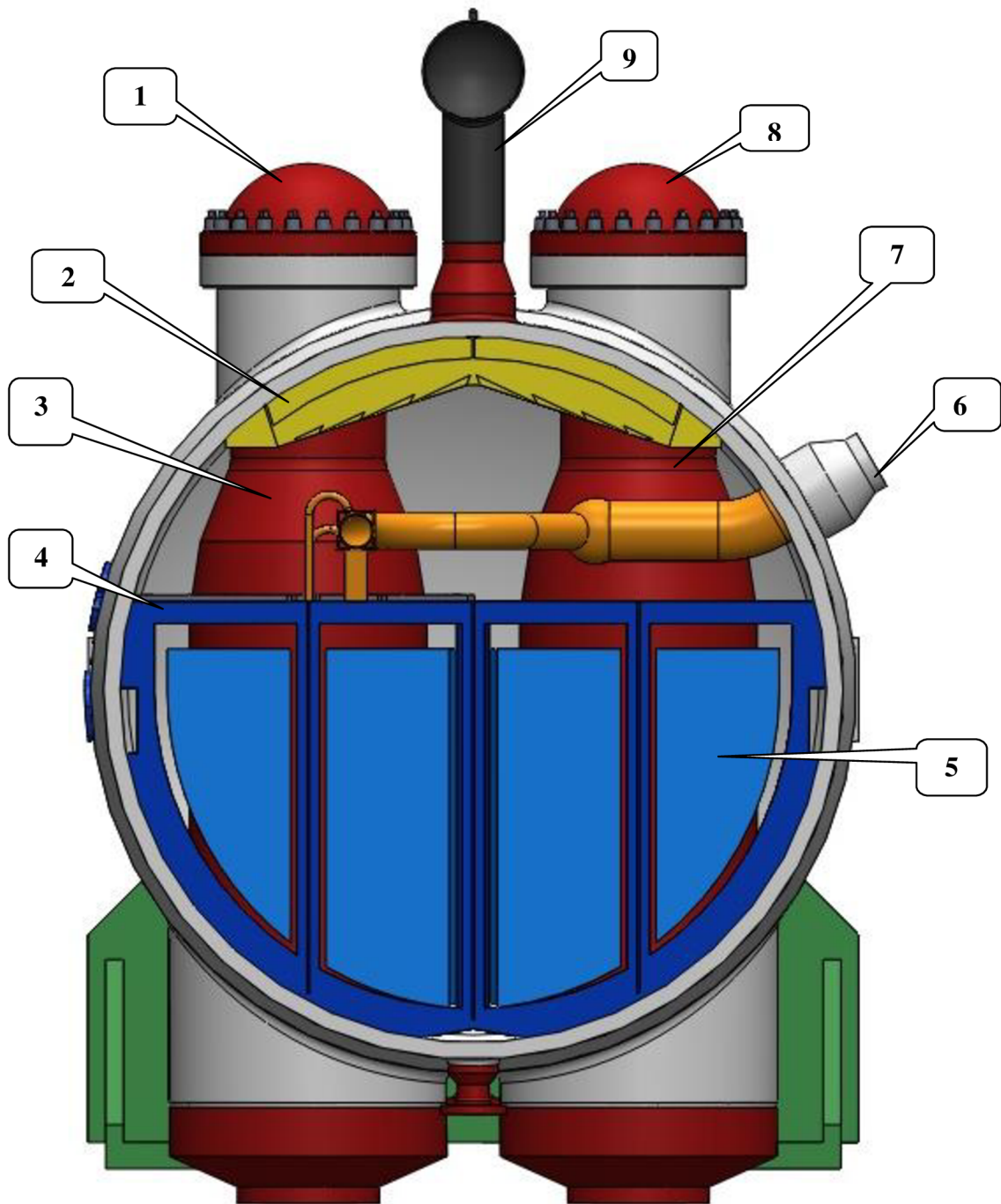


**Obr. 24 Napájecí potrubí [3][11][12]**

*1 – J – trubice, 2 – Y – spojka*

### 3.3 Kolektory

Vstupní i výstupní kolektor je vyroben z austenitické oceli a svařen z 3 částí. Pro upevnění teplosměnných trubek ke kolektorům je v jejich střední části vyvrtáno 5536 otvorů. Kolektory jsou k tlakové nádobě připevněny pomocí nátrubků ve spodní části tlakové nádoby. Odkal kolektorů je prováděn prostřednictvím nátrubků umístěných na nátrubcích kolektorů ve spodní části tlakové nádoby. Nátrubky kolektorů dále obsahují nátrubky pro odvodu vzduchu a kontrolu těsnosti. Kolektory jsou nahoře uzavřeny primárními víky, kterými je možné provádět údržbu nebo opravy. Těsnost víka kolektoru je zajištěna pomocí šroubových spojů, hřebenovým těsněním a grafitovou folií. [3][11][12]



**Obr. 25 Řez parogenerátorem VVER 440 [3][11][12]**

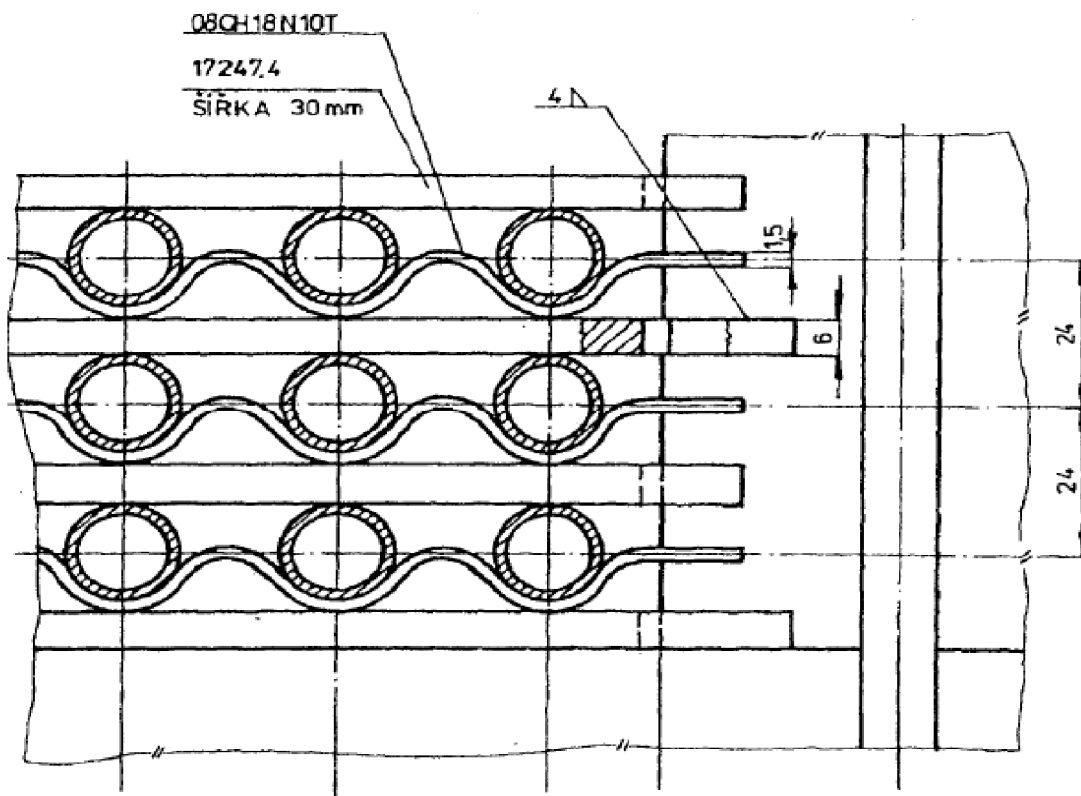
*1 a 8 – sekundární víko kolektoru, 2 – separátor páry, 3 – vstupní kolektor, 4 – nosná mříž, 5 – teplosměnné trubky, 6 – napájecí nátrubek, 7 – výstupní kolektor, 9 – parovod*

### 3.4 Teplosměnné trubky

K výše zmíněným kolektorům je připojeno 5536 teplosměnných trubek, které jsou do otvorů kolektoru zaválcovány výbuchem a z vnitřní strany kolektoru přivařeny. Jeden konec trubek je napojen na vstupní kolektor a druhý konec na výstupní kolektor. Průměr teplosměnných trubek je 16 mm a tloušťka stěny je 1,4 mm a jsou ohnuté do tvaru písmene „U“. Teplosměnné trubky tvoří svazek, ve kterém jsou rozmístěny v řadách nad sebou s roztečí 24 mm, a vzdálenost mezi jednotlivými trubkami v horizontálním směru je 30 mm. Svazek je vysoký přibližně 1,8 m. [3][11][12]

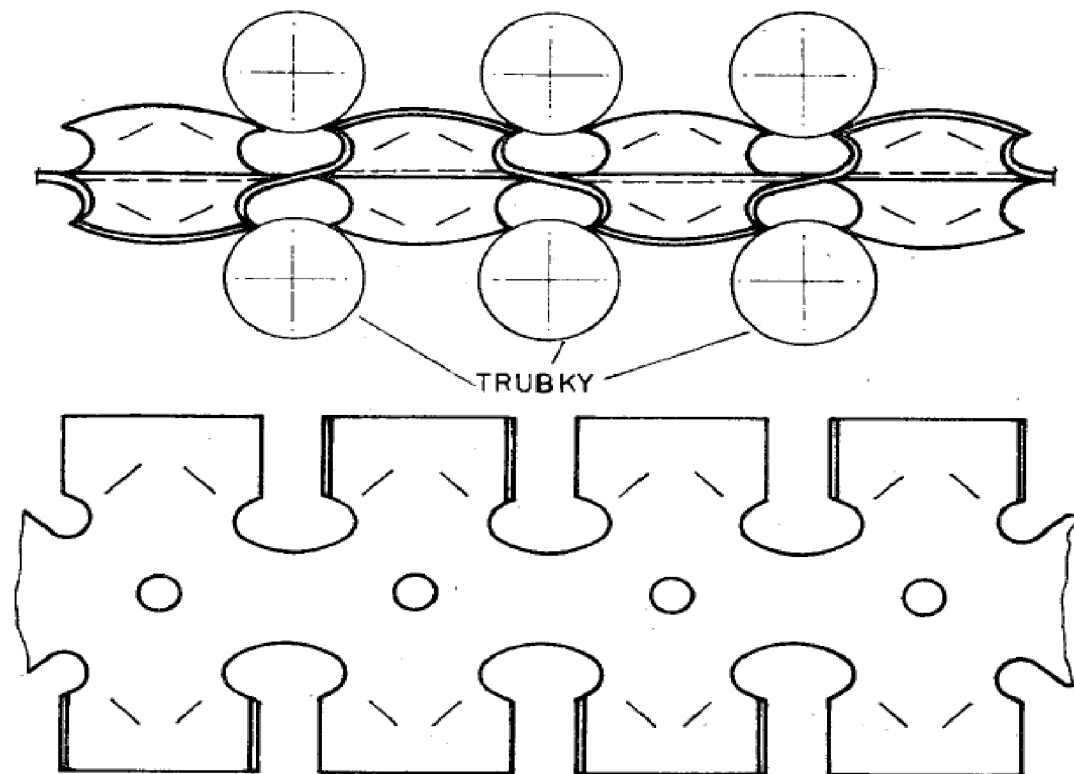
### 3.5 Distanční mříž

Teplosměnné trubky jsou uchyceny v distančních mřížích, které jsou připojeny k nosnému systému přivařenému k tlakové nádobě. Distanční mříž je tvořena plocháči opatřeny na obou koncích zářezy, které zapadají na jedné i druhé straně stojny, nebo do stojny a do žebra přivařeného na vnitřním povrchu nádoby a dále vlnitými pásky z plechu, které jsou na plocháčích položeny a do jejichž prohlubni se ukládají trubky příslušné řady. Tento způsob distancování nedovoluje omývání téměř poloviny obvodu trubky v šířce cca 40 mm. Mezi Trubkou a vlnitým pásem vzniká podle tolerancí větší, nebo menší klínová štěrbina, která je slabě vymývaná, v níž se mohou usazovat soli, železo a chloridy. V těchto stykových místech pak vznikají příznivé podmínky pro korozní napadení teplosměnných trubek. [3]



Obr. 26 Prvky distanční mříže trubkového svazku parogenerátoru VVER 440 [3]

Jendo z možných alternativních řešení distančních prvků trubkového svazku. Při dostatečných tuhostních a útlumových vlastnostech dovoluje omývání prakticky celého obvodu trubky a možnost ulpívání usazenin v oblasti mříže je velmi malá. [3]



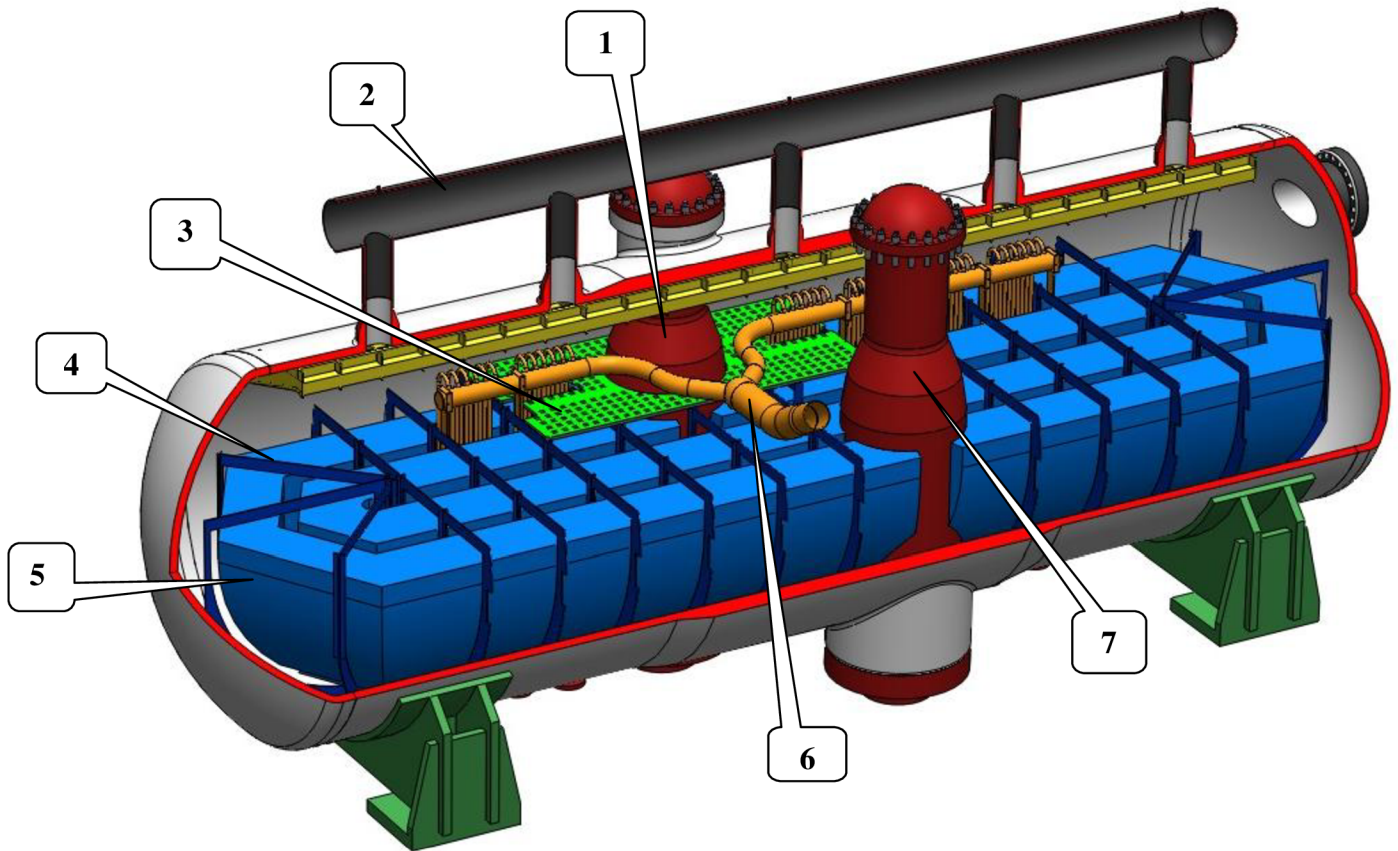
**Obr. 27 Alternativní řešení distančních prvků trubkového horizontálního svazku**  
[3]

### 3.6 Separátor Páry

Směs vody a páry, která vystupuje nad hladinu, se zbavuje těžkých kapiček vody tíhovými silami. Poté vstupuje do žaluziového separátoru. Separátor je tvořen vlnitými plechy s tloušťkou 1 mm, které tvoří kanálky s šířkou 10 mm a výškou cca 80 mm. Rovnoměrné využití celého průřezu nádoby v oblasti proudění páry do směrných nátrubků umístěných v horní části tlakové nádoby je zajištěno děrovanými plechy umístěnými nad žaluziovým separátorem. Děrovaný plech má otvory o průměru 6 – 10 mm. Tento typ separátoru dostatečně zajišťuje požadavky na vlhkost páry o maximální hodnotě 0,25%. [3][11][12]

### 3.7 Parní kolektor

Parní kolektor je trubice o průměru 427 mm a tloušťce 26 mm sloužící ke sběru páry. Parní kolektor je připojen k pěti nátrubkům, skrze které do ní vstupuje separovaná pára. Na horní straně kolektoru je pět nátrubků, z nichž tři slouží pro měření tlaku páry, jeden slouží pro odvzdušnění a jeden je rezervní. [3][11][12]



**Obr. 28 Vertikální parogenerátor VVER 440 [3][11][12]**

*1 – vstupní kolektor, 2 – parovod, 3 – separátor hladiny, 4 – dinstanční mříž, 5 – teplosměnné trubky, 6 – napájecí potrubí, 7 – výstupní kolektor*

### **3.8 Měření hladiny**

Pro měření výšky hladiny se používají dva hladinoměry. Vyrovnávací nádoby hladinoměru jsou umístěny na závěsech parogenerátoru. Měření hladiny v parogenerátoru je velice obtížné, protože je těžké definovat rozhraní mezi kapalinou a parovodní směsí důsledkem intenzivního varu. Výška hladiny nad trubkovým svazkem se pohybuje kolem 95 mm. Celková výška hladiny se pohybuje v rozmezí  $2105 \pm 50$  mm. [3][11][12]

### **3.9 Odluh**

V dolní části tlakové nádoby jsou dva nátrubky pro odvod kontinuálního odluhu. Odluh se odvádí do sběrného kolektoru a odtud do expandéru odluhu. Z expandéru je odluh odváděn do chladiče odluhu, kde se chladí turbínovým kondenzátem. Z chladiče je dluh odváděn do čistící stanice, nebo do sběrné nádrže. Kondenzátu ve strojovně. Na trase odluhu je za dochlazovačem umístěna odbočka do vypouštěcí nádrže. [3][11][12]

### **3. 10 Odkal**

Odkal je prováděn pomocí dvou nátrubků umístěných na spodním nátrubku kolektoru a z jednoho nátrubku umístěném na spodní straně tlakové nádoby parogenerátoru v blízkosti „horského víka“. Odkal je odváděn do kolektoru periodického odkalu, ze kterého je dále odváděn do trasy kontinuálního odluhu a odtud míří do vypouštěcí nádrže. Z vypouštěcí nádrže je voda odváděna k čištění. Čištění se provádí pomocí třech filtrů. [3][11][12]

## 4. Závěr

V první části bakalářské práce je popis parogenerátoru západní koncepce. Rešerše začíná historií vývoje tepelných výměníků. Konkrétně jsou popsány okolnosti, které vedly ke konstrukci vertikálních parogenerátorů. Rešerše dále popisuje aspekty separace páry a samotná separační zařízení, jejichž konstrukce vychází z požadavků na kvalitu separovaná páry. Dále jsou popsány další konstrukční prvky parogenerátoru. V závěru první části bakalářské práce jsou popsány poruchy parogenerátoru. Konkrétně se jedná o poruchy způsobené mezikrystalickou korozí, vibracemi a kalovými usazeninami.

Cílem druhé části bakalářské práce byla tvorba modelu horizontálního parogenerátoru VVER 440. Model by měl sloužit jako výuková pomůcka v rámci projektu CENELÍN. Tvorba takto rozměrného model klade vysoké nároky na výkon výpočetní techniky. Je velice obtížné obstarat jakékoli materiály, které by vedly k modelu parogenerátoru s veškerými prvky konstrukce. Díky těmto skutečnostem není výsledný model zcela dopracován. Zde nastává určitý prostor pro následné úpravy a dopracování výsledného modelu.

## 5. Použitá literatura

- [1] M. DYKE, John a Wm. J. GARLAND. *Evolution of CANDU Steam Generators – a Historical View* [online]. 2006, 15 s. [cit. 2015].
- [2] WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION WATER REACTOR DIVISIONS. *The westinghouse pressurized water reactor nuclear power plant* [online]. Pittsburgh, Pennsylvania 15230, 1984 [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: [http://www4.ncsu.edu/~doster/NE405/Manuals/PWR\\_Manual.pdf](http://www4.ncsu.edu/~doster/NE405/Manuals/PWR_Manual.pdf)
- [3] MATAL, Oldřich. *Konstrukční cvičení (Vybrané komponenty jaderně energetických zařízení)*. 1. vyd. Brno: VUT, 1988, 136 s
- [4] NUCLEAR POWER INDUSTRY NEWS. *NRC REGULATORY ISSUE SUMMARY 2009-04 STEAM GENERATOR TUBE INSPECTION REQUIREMENTS* [online]. 2009 [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: [http://nuclearstreet.com/nuclear\\_power\\_industry\\_news/b/nuclear\\_power\\_news/archive/2009/04/10/nrc-posts-new-steam-generator-tube-inspection-requirements.aspx#.VXAFMM\\_tmkq](http://nuclearstreet.com/nuclear_power_industry_news/b/nuclear_power_news/archive/2009/04/10/nrc-posts-new-steam-generator-tube-inspection-requirements.aspx#.VXAFMM_tmkq)
- [5] GREEN, S.J. a G. HETSRONI. PWR steam generators. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 1995, roč. 21, s. 1-97 [cit. 2015-05-21]. DOI: 10.1016/0301-9322(95)00016-Q
- [6] KONDO, Yoshiyuki, Tadahiko SUZUTA, Toshiyuki MIZUTANI a Yasuhiko HIRAO. MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. *Steam-water separator*. Dostupné také z: <http://www.google.com/patents/US20090007530>
- [7] MITSUBISHI HEAVY IND., Tatsuo, ISHIGURO MITSUBISHI HEAVY IND. a Yoshiyuki MITSUBISHI HEAVY IND. MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. *Moisture separator, and vapor generator*. Dostupné také z: <http://www.google.com/patents/EP1442777B1?cl=en>
- [8] PASCAL, Yves. FRAMATOME. *Steam generator with device for the distribution of feed water and recirculation water in the secondary part*. Dostupné také z: <http://www.google.com/patents/US5323736>
- [9] M. WEPFER, Robert. WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LLC. *Steam generator tube lane flow buffer*. Dostupné také z: <http://www.google.com/patents/US20120247727>
- [10] J. WACHTER, William. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, INC. *Anti-vibration support of U-bend flow tubes in a nuclear steam generator*. Dostupné také z: <https://www.google.com/patents/US5072786>
- [11] STANĚK, Václav. *Porovnání a hodnocení konstrukčních uspořádání PG = Comparison and evaluation of steam generator design*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. : pdf.



[12] ING. KRETEK,, ING. KLIMEŠ, ING. GRATZA a HRNČÍŘ. VÍTKOVICE MACHINERY GROUP, A.S. *Výkresová dokumentace PG-VVER 440* [online]. 1986 [cit. 2015].

## 6. Seznam příloh

P1

CD s 3D modelem parogenerátoru