



Технически университет София

Доклад

Тема: **Хоризонтални парогенератори**

Изготвил:

Георги Вълчков

гр. София

Съдържание

1. Предназначение на ПГВ-1000М.
2. Технически данни на ПГВ-1000М.
3. Разположение на ПГВ-1000М в топлинната схема.
4. Конструкция и принцип на действие на ПГВ-1000М.
5. Проблеми свързани с парогенераторите. Режими на работа на парогенераторите.
6. Конструкция и принцип на действие на вертикални парогенератори.
7. Сравнение на хоризонтални и вертикални парогенератори използвани в ЯЕЦ.
 - Технически характеристики на хоризонтален и вертикален парогенератор.
8. Исторически факти. Замяна на парогенератор и ползи от замяната му.
9. Основни проблеми при експлоатацията на хоризонталните ПГ и методи за тяхното решение.
 - Изследване на причините за напукване на заваръчен шев номер 111.
 - Осигуряване на надеждност на топлообменните тръбички.
10. Методика за замяна на парогенератор ПГВ-1000М.
 - Работи, които се извършват след вземане на решение за замяна на парогенератора до спиране на блока за неговата замяна.
 - Подготвителни работи, извършвани на блока след неговото спиране.
 - Работата по демонтажа на парогенераторите.
 - Работи по монтажа на парогенераторите.
 - Заклучителни работи.
11. Изисквания за новите проекти и развитие на конструкциите.
12. Основни технически характеристики.
13. Използвана литература.

1. Предназначение на ПГВ-1000М.

Парогенераторът ПГВ-1000М е предназначен за производство на суха наситена пара с влажност $\leq 0.2\%$, налягане 6.28 МРа и се явява съставна част от главния циркуляционен кръг (ГЦК) на реакторната установка (РУ).

Типът на парогенератора е хоризонтален, еднокорпусен с хоризонтално разположени топлообменни тръби, вградена система за сепарация на пара, система за подаване на питателна вода, система за аварийно подаване на питателна вода, парен колектор, система за продувка, система за дрениране и система за измерване на нивото на ПГ и влажността на парата.

Елементите за закрепване на ПГ осигуряват едновременно възприемане на натоварването, предизвикано от максимално разчетно земетресение (МРЗ) и разкъсване на тръбопровода ДУ 850 по пълното сечение.

Конструкцията на ПГ осигурява:

- охлаждане на топлоносителя на първи контур до необходимата температура във всички експлоатационни състояния и аварийни условия;
- схемата и разположението на оборудването на първи контур заедно с парогенераторите осигурява охлаждането на топлоносителя при естествена циркулация;
- работоспособност на ПГ във всички проектни режими;
- конструкцията на парогенератора изключва повреждането на друго оборудване и тръбопроводи при аварии.

2. Технически данни на ПГВ-1000М.

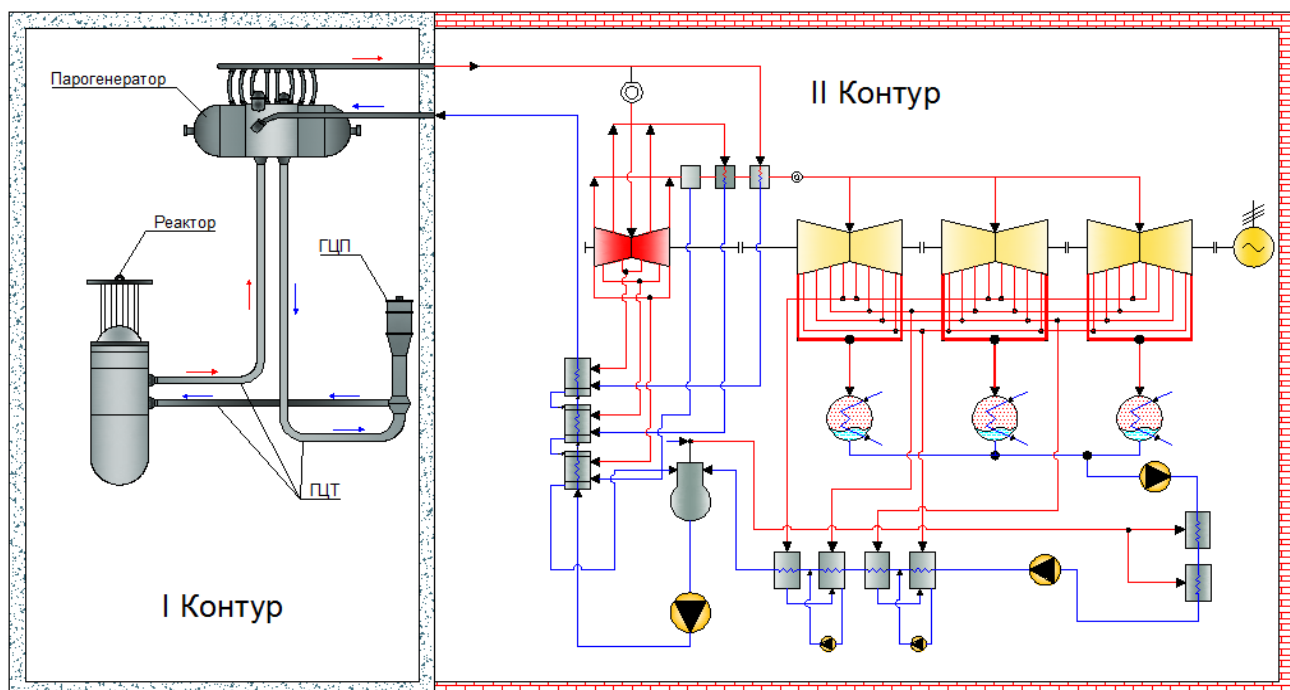
| | | |
|--|-------------------|---------------------|
| Топлинна мощност | MW | 750+53 |
| Паропроизводителност | kg/s | 408,33+28,8 |
| Налягане на генерираната пара | МРа | 6,27±0,19 |
| Температура на генерираната пара | °C | 278,5 |
| Температура на питателната вода (при включени ПВН) | °C | 220 ±5 |
| Температура на аварийната питателна вода | °C | 10÷40 |
| Температура на топлоносителя: - на вход - на изход | °C | 320 ±3,5 289,7±2 |
| Налягане на топлоносителя | МРа | 15,69±0,29 |
| Разход на топлоносителя през ПГ при работа на четирите кръга | m ³ /s | 5,82±0,3 |
| Влажност на генерираната пара | % | 0,2 |

| | | |
|--|----------------|---------------|
| Разчетно налягане: - I контур - II контур | Мра | 17,65 7,85 |
| Разчетна температура: - I контур - II контур | °C | 350 300 |
| Обем на ПГ по I контур | m ³ | 20,5 |
| Пълен обем на ПГ по II контур | m ³ | 127 |

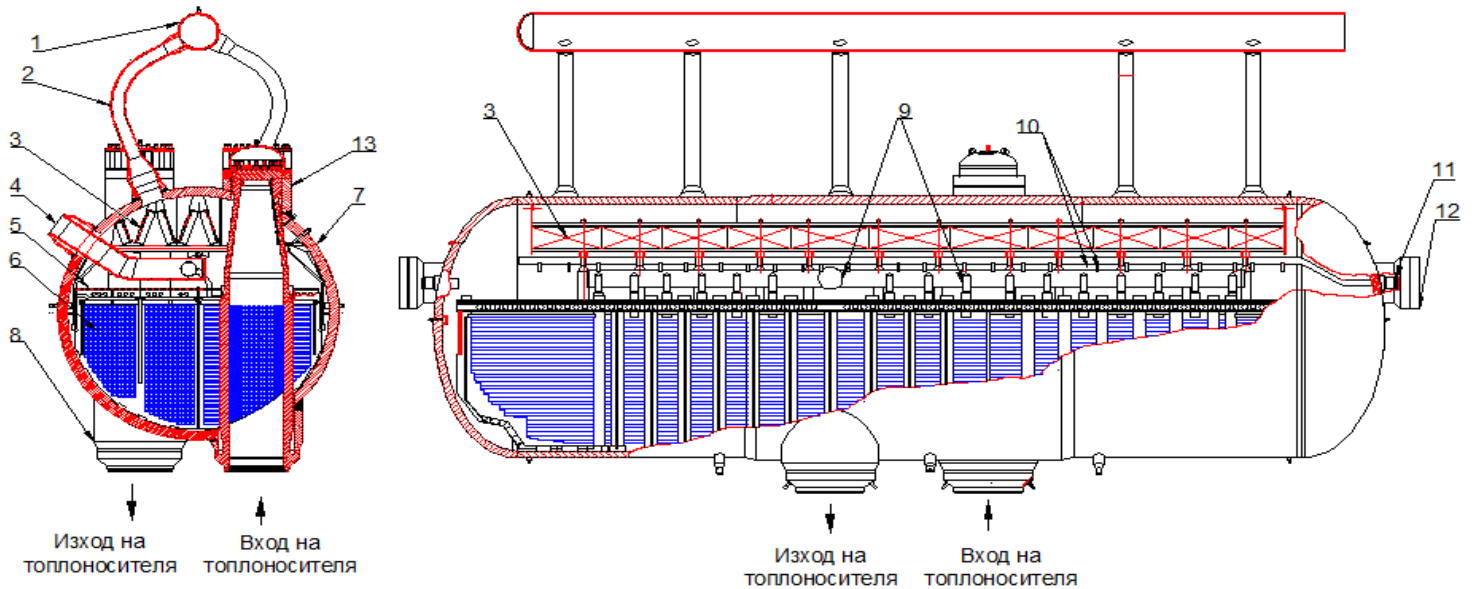
- Масата на парогенератора с опорната конструкция, парния колектор, изравнителните съдове в сухо състояние е 416 тона. При запълване с вода по I и II контур - 566 тона. Масата на парогенератора в сух вид е 322 тона.
- За измерване на нивото на водата в ПГ са предвидени четири броя еднокамерни и девет броя двукамерни изравнителни съдове.
- За предпазване от сеизмични въздействия, към парогенератора са монтирани осем броя хидравлични амортизъори.

3. Разположение на парогенератора в топлинната схема.

Топлинна схема на блока ВВЕР-1000



4. Конструкция и принцип на действие на ПГВ-1000М



1. Парен колектор;
2. Парни щуцери;
3. Сепариращи устройства;
4. Щуцер за питателна вода;
5. Устройство за изравняване на налягането;
6. Теплообменни тръби;
7. Корпус;
8. Щуцери към ГЦТ (главен циркуляционен тръбопровод);
9. Устройство за разпръскване на основната питателна вода;
10. Устройство за разпръскване на аварийната питателна вода;
11. Щуцер за аварийна питателна вода.
12. Люк-лаз;
13. Колектор 2-ри контур

➤ **Корпус:**

Корпусът на парогенератора е предназначен за поместване на вътрешнокорпусните устройства, теплообменните тръби и колекторите по I контур. Корпусът поема налягането по II контур на парогенератора и представлява сборка от заварени цилиндрични ковани пръстени, шамповани елиптични дъна, ковани щуцери и люкове.

Конструкцията на корпуса позволява нормален достъп за оглед на вътрешнокорпусните устройства от страната на II контур. За тази цел на елиптичните дъна е заварен по един люк Ду500, представляващ разглобяемо фланцево съединение. За оглед на колектора по I к-р са заварени два броя люкове Ду800 с разглобяемо фланцево съединение.

➤ **Топлообменни тръби:**

Топлообменът в парогенератора се осъществява от 11100 тръби $\phi 16 \times 1,5$, разположени хоризонтално в шахматна стъпка 19 mm по височина на колекторите и 23 mm по ширина са наредени във вид на U -образен сноп.

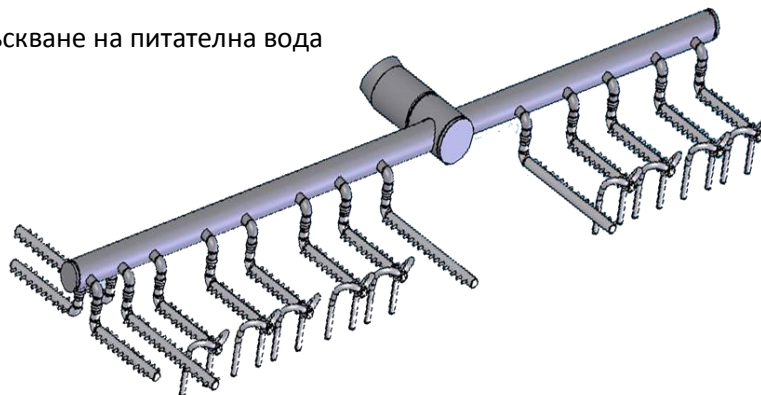
➤ **Сепариращо устройство:**

Сепариращото устройство се състои от пакет отражатели с вълнообразна форма и перфорирани пароприемни листа, които са разположени зигзагообразно и успоредно на надлъжната ос на парогенератора. Пакетите са разположени под ъгъл 26° спрямо вертикалната ос на парогенератора, на височина 750 mm от разтоварващите перфорирани листа. Пакетите, както и разтоварващите перфорирани листа са изработени от хромникелова неръждаема стомана. Разтоварващите перфорирани листа служат за изравняване на скоростта на парата.

➤ **Устройство (колектор) за подаване на питателна вода:**

Устройството за подаване на питателна вода се състои от тръбопровод, който е разклонен и по дължината има отвори. Питателната вода се подава откъм “горещата” страна над топлообменните тръби под потопените перфорирани листа, през 16 броя колектори Ду80, на които има по 32 бр. впръскващи тръбички Ду20.

Устройство за разпръскване на питателна вода



➤ **Устройство за подаване на аварийна питателна вода:**

Устройството за подаване на аварийна питателна вода се състои от колектор и разпръскващи тръби, по дължината, на които има отвори. Колекторът е разположен в парното пространство на парогенератора.

➤ **Устройство за изравняване на паровото натоварване:**

Устройството за изравняване на паровото натоварване се състои от перфорирани листа, разположени във водното пространство на парогенератора под огледалото на изпаряване и прихванати с болтове към вътрешната опорна метална конструкция.

➤ **Опорна конструкция:**

Парогенераторът е поставен на две опорни конструкции, всяка от които включва:

- ✓ опорна поставка
- ✓ ролкова опора
- ✓ основа
- ✓ закладни детайли
- ✓ анкерни болтове.

Опорната конструкция се състои от два реда ролкови опори, позволяващи преместването на парогенератора при термични разширения в ГЦТ в хоризонтално направление до 100 mm. Конструкцията е разчетена на земетресение от 9 бала и реактивно усилие от 1460 т, възникващо при аварийна ситуация от разкъсване на тръбопровод Ду 850 във вертикалната част на ГЦТ до парогенератора.

➤ **Хидроамортизьори:**

За поемане на сеизмичните натоварвания, действащи в хоризонтално направление е предвидена система от хидравлични амортизьори, поемащи натоварването. Системата от хидравлични амортизьори не препятстват преместването на парогенератора при разгриване и разхлаждане на блока.

➤ **Аварийни режими в парогенератора:**

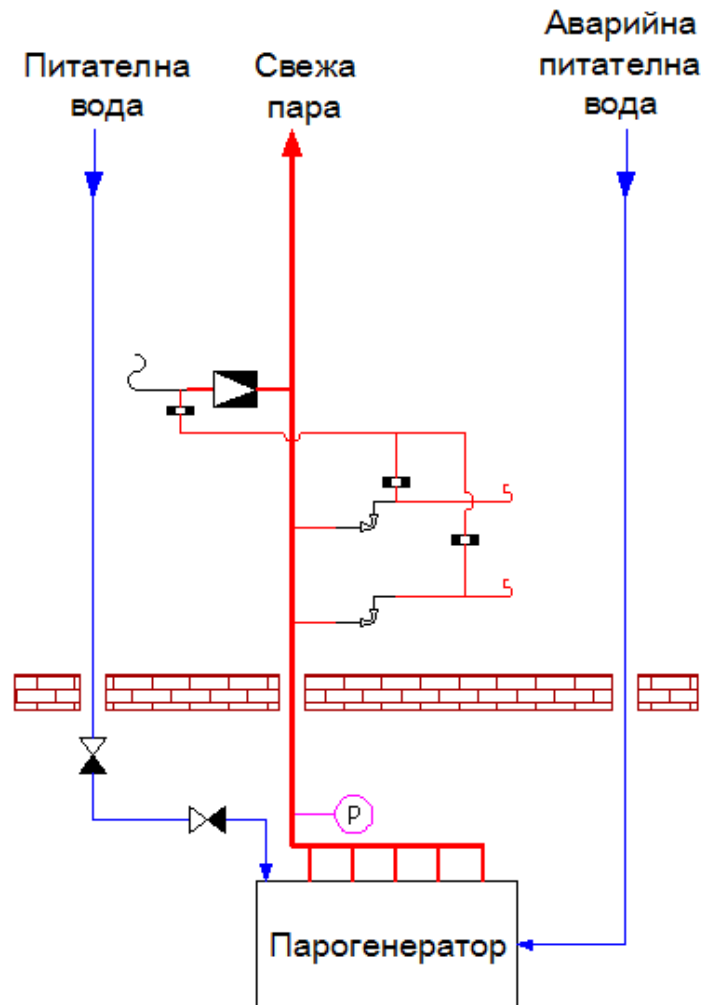
За защита на ПГ от увеличение на налягането ПГ има по две импулсно-предпазни устройства. Всяко ИПУ (импулсно предпазно устройство) се състои от основни и спомагателни клапани. Основния клапан е снабден със сервопривод, управляван от работната среда посредством спомагателния клапан.

За предотвратяване на увеличаването на налягането в ПГ над 7,26 МРа, а също за разхлаждане на ПГ при режими с нарушения на нормалните условия на експлоатация

са предназначени бързодействащите редукиционни устройства за изпускане на парата в атмосферата - БРУ-А .

При наличие на повреда в БРУ-А, има два предпазни клапана. Те сработват при повишаване на налягането над 8,24 и 8,43 МРа.

При аварийни режими на турбината, с цел безопасна работа, свежа пара от ГПК се отвежда в кондензатора. Капацитетът на кондензатора му позволява да поеме 40% от произвежданата свежа пара. Тази система за отвеждане на парата се нарича БРОУ-К (Бързодействаща Редукиционна Охладителна Уредба към Кондензатора).



➤ **Принцип на работа на ПГ:**

На всеки кръг е монтиран по един ПГ (общо четири на брой). "Горещия" топлоносител постъпва в парогенератора по тръбопровод Ду850 в "горещия" колектор, откъдето се раздава по топлообменните тръби.

Минавайки през топлообменните тръби, топлоносителят се охлажда от котловата вода и постъпва в "студения" колектор, откъдето по тръбопровод Ду 850 се подава на смукателната страна на ГЦП (главна циркуляционна помпа).

Питателната вода по тръбопровод Ду400 се подава в парогенератора, където чрез устройство за подвеждане и раздаване на питателната вода постъпва към

“горещата” част на топлообменния тръбен сноп, като се постига частично изравняване на паровото натоварване по сечение на парогенератора за сметка на кондензиране на част от парата.

Циркулацията на котловата вода в парогенератора е естествена, за сметка на хидродинамичните свойства на водата и конструкцията на парогенератора.

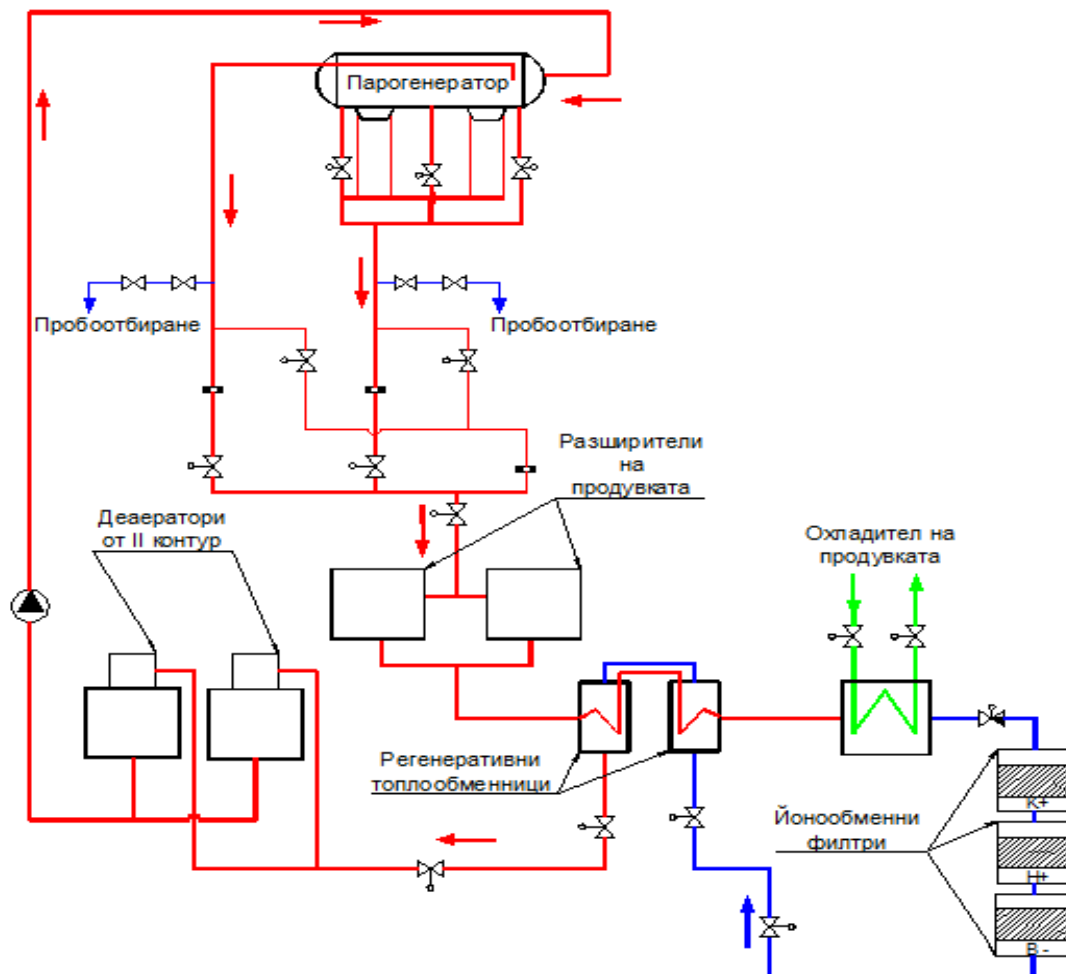
Получената пара се изсушава в парния обем на парогенератора за сметка на гравитационните сили и постъпва в сепариращото устройство, където допълнително се изсушава до необходимите показатели.

Сухата пара се събира в парен колектор, откъдето по паропровод се подава към турбината.

При обезточване на АЕЦ или при аварийни условия, свързани с нарушаване подаването на питателна вода към парогенератора по независима магистрала се подава аварийна питателна вода от резервоари за запас на химически обезсолена вода.

➤ Периодични и постоянни продувки на парогенератора

В ПГ се правят периодични и постоянни продувки, целта на тези продувки е предпазване на ПГ от корозия и почистване от продукти на корозия. Продувъчната вода се очисти от йонообменни филтри с цел поддържане на водохимичния режим.



5. Проблеми свързани с парогенераторите. Режими на работа на ПГ.

Проблеми свързани с парогенераторите в атомните електроцентрали са спукването на тръбички от топлообменната повърхност, изтъняване, корозия или деформация на свивката на U-образно извитите тръби.

Основни симптоми, които се проявяват когато имаме течове и е нарушено разделението между нерадиоактивната течност от радиоактивната са:

- ✓ Сигнализация за налягането на първи контур;
- ✓ Сигнализация за ниско налягане на топлоносителя;
- ✓ Сигнализация за ниско ниво в компенсатора на обема;
- ✓ Високо ниво на тревога в парогенератора;
- ✓ Дисбаланс между поток пара и питателна вода.

В процеса на експлоатация на ПГ са възможни следните откази:

- ✓ нарушаване на херметичността на уплътненията по първи или втори контур;
- ✓ нарушаване на херметичността на топлообменните тръби и откъсване на шпилки на капака на колектора по първи контур;
- ✓ нарушаване на водохимичния режим на втори контур;
- ✓ намаляване на разхода на питателна вода;
- ✓ повишаване на влажността на парата на изхода от ПГ повече от 0.2%.

Количеството цикли при нормален режим на работа на ПГВ-1000М за срока им на служба:

| N | Наименование на режима | Количество цикли за срока на служба |
|----------|---|--|
| 1. | Запълване на ПГ | 60 |
| 2. | Уплътняване на фланцевите съединения на ПГ | 60 |
| 3. | Разделно ХИ на ПГ по I и II контур - на якост - плътност | 100 30 |
| 4. | Планово разгръване от студено състояние със скорост 10÷15 °С/ч. | 130 |
| 5. | Работа на стационарен режим | неогр. |
| 6. | Изключване и последователно включване на ПВН | 300 |
| 7. | Планово разхлаждане до студено състояние: - нормално (със скорост 20°С/ч) - ускорено (със скорост 60°С/ч) | 70 30 |
| 8. | Изпразване и разуплътняване на ПГ | 60 |

Количеството цикли при аварийен режим на работа на ПГВ-1000 за срока им на служба:

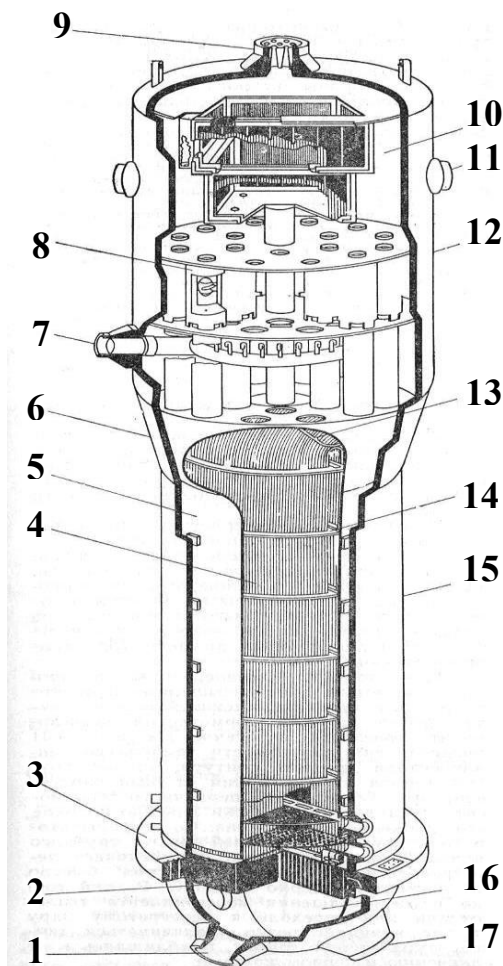
| N | Наименование на режима | Количество цикли за срока на служба |
|----|---|-------------------------------------|
| 1. | Незатваряне след сработване на ПК на ПГ | 1 за всеки клапан |
| 2. | Незатваряне след сработване на БРУ-А | 1 за всяко БРУ-А |
| 3. | Скъсване на паропровода от ПГ | 1 за всеки ПГ |
| 4. | Скъсване на питателния тръбопровод към ПГ | 1 за всеки ПГ |
| 5. | Скъсване на главния парен колектор | 1 път за 4-те ПГ |

В аварийни режими се допуска обливане на ПГ с разтвор с концентрация на H_3BO_3 до 16 г/кг на хидразин-хидрат 100±200 мг/кг и на калиеви йони до 3 г/кг.

В процеса на експлоатация на ПГ се допуска да бъдат заглушени до 2 % от топлообменните му тръбички.

6. Конструкция и принцип на действие на вертикални парогенератори.

Схема на ПГ с U-образни тръбички



- 1 – вход на топлоносителя на I контур
- 2 – тръбна дъска
- 3 – опорен пръстен
- 4 – тръбен сноп
- 5 – кожух около тръбния сноп
- 6 – конична повърхност на корпуса
- 7 – щуцер на подхранващата вода
- 8 – сепаратори на влага с усукани лопатки
- 9 – парен щуцер
- 10 – изсушаващи канали
- 11 – люк за оглед и ремонт
- 12 – горна повърхност на корпуса
- 13 – антивибрационна пластина
- 14 – опорна решетка
- 15 – долна повърхност на корпуса
- 16 – преграда
- 17 – изход на топлоносителя на I контур

- Горещата вода постъпва в долния ляв щуцер (1) и движейки се отначало нагоре, а след това надолу по тръбния сноп, попада в дясната половина на долната камера на ПГ, за да се върне в реактора (17).
- Подхранващата вода се влива от колектора (7), спуска се между корпуса и снопа на ПГ и облива от външната страна тръбния сноп като се превръща в пара.
- Парата се отделя от влагата с помощта на устройства, разположени в горната част на ПГ и се насочва към турбината (9).
- Отсепарираните капки вода се връщат към входа на тръбния сноп, стичайки се надолу по периферията на ПГ.

7. Сравнение на хоризонтални и вертикални парогенератори използвани в ЯЕЦ.



Вертикален ПГ



Хоризонтален ПГ

От появата на ядрените реактори с вода под налягане в СССР и САЩ се появяват две различни конструкции на парогенератори – вертикални и хоризонтални. В първия случай имаме вертикален корпус и U-образни топлообменни тръби вградени в хоризонтална тръбна дъска. В втория случай имаме хоризонтален корпус и хоризонтално разположени топлообменни тръби.

Днес можем да кажем, че и двете конструктивни концепции формират направление с богата история, включващи успехите и грешките. Опитът от експлоатацията показва слабите места в конструкциите. За съжаление, цената от натрупания опит е честата подмяна на парогенератори.

Основни предимства на хоризонталните парогенератори пред вертикалните.

- ✓ Умерено парно натоварване-позволява използването на проста схема на сепарация при безопасно постигане на необходимата влажност на парата.
- ✓ Умерена скорост на средата в втори контур до 0.5 m/s, благодарение на това се изключват опасности от вибрации на топлообменните тръби и други елементи.
- ✓ По голям запас на вода по втори контур, като по този начин имаме по-голямо разхлаждане на реактора чрез парогенераторите в случай на

нормална и аварийна ситуация. ПГ подобрява преходните режими по време на експлоатацията на РУ.

- ✓ Прилагането на принципа на поетапно изпарение значително увеличава надеждността на ПГ от гледна точка на корозия.
- ✓ Хоризонталното разположение на топлообменната повърхност осигурява надеждна естествена циркулация на топлоносителя в първи контур дори по време на намаляване на нивото на водата в ПГ под върха на топлообменните тръби.
- ✓ Лесен достъп до елементите на парогенератора за поддръжка и контрол, както по първи, така и по втори контур.

Предимство на вертикалните парогенератори пред хоризонталните е, че имаме икономия на метал и строителни обеми.

Друго много важно предимство на вертикалните парогенератори е, че при тях имаме естествена сепарация на парата.

Хоризонталните парогенератори показват доста висока надеждност и имат редица значителни предимства в сравнение с други видове ПГ. Основните насоки за подобряване надеждността на ПГ в действащи и в момента строящи се блокове е осигуряване на изискванията на водохимичния режим на ниво не по-лошо от постигнатото в световно ниво.

Технически характеристики на хоризонтален и вертикален ПГ

| | | |
|---|-------------|------------|
| Тип на реактора | ВВЕР-1200 | АП-1000 |
| Тип на парогенератора | ПГВ-1000МКП | Вертикален |
| Брой парогенератори | 4 | 2 |
| Височина на ПГ, m | 13820 | 22460 |
| Вътрешен диаметър на ПГ, mm | 4200 | 5334 |
| Топлообменна повърхност, m ² | 6105 | 11477 |
| Паропроизводителност, t/h | 1602 | 3397 |
| Количество ТОТ (топлоотделящи тръбички) | 10978 | 10025 |
| Разположение на ТОТ | коридорно | триъгълно |
| Диаметър на ТОТ, mm | 16 | 17,5 |
| Дебелина на ТОТ, mm | 1,5 | 1 |
| Температура на питателна вода на входа на ПГ, С | 225 | 227 |
| Температура на парата, С | 286 | 273 |

8. Исторически факти. Замяна на парогенератор и ползи от замяната му.



Хоризонтален ПГ

Тъй като ядрената енергия започва да се използва широко за търговски цели едва през 1960 г., различните оператори са имали различни проблеми с основни компоненти. Въпреки, че много от проблемите са намалели значително, проблемите свързани с парогенератори остават и до днес. Проблемите с парогенератори се класират на второ място, след прекъсванията за презареждане с гориво, като най-значителен принос за загуба на електрическа енергия. Собствениците на ЯЕЦ с влошени парогенератори трябва да решат дали да направят годишни ремонти, ако се наложи и замяна на парогенераторите или да затворят своите централи. Първоначално се е мислило, че това са единици инциденти в резултат на най-вече от дефекти в производствения етап, лош водохимичен режим и др. Но през 1970 година скъсването на тръбичка на парогенератора е бил най-регистрирания проблем в електроцентралите. Electric Power Research Institute (EPRI) формира две групи, които да решат проблема със спукването на тръбички на ПГ. През 1982 година вече причините и начините за защита от скъсване, се разбират много по-добре и този проблем драстично намалява. През 1979 г. в много централи започват да се проявяват проблеми свързани с корозионни пукнатини и умора на пукнатините.

В момента най-често срещания недостатък е интеркристалната attack/stress-corrosion пукнатина. Този недостатък в момента възлиза на 60-80% от всички дефектни тръби, изискващи запушване. Останалите дефекти се дължат на механични повреди, вдлъбнатини и умора на пукнатините.

Подмяната на парогенератор може да се каже, че до някъде е икономическо решение. Парогенераторите с прекомерна деградация на тръбичките създава допълнителни разходи за ядрената електроцентрала, като например: тръбни инспекции, наблюдение на течове, поддръжка и ремонт. Също така излагане на персонала на радиация, преоразмеряване на мощността вследствие на запушените тръбички и принудителни спирания на блока в следствие на скъсване на тръбичка на парогенератора, поради което може да се окаже, че подмяната на парогенератора е икономически по изгодно от неговото ремонтиране.

Когато собственик на ЯЕЦ реши да замени своите парогенератори, се преминава през обширно планиране, което включва: проучване на степента на увреждане на парогенераторите, приблизителна оценка на продължителността във времето, необходимо да се заменят парогенераторите, решавайки дали частично или пълно да се

заменят парогенераторите и за определяне на разходите свързани със замяната, включително и отчитането на разходите за закупуване на ток по време на замяната на парогенератора.

В общи линии, има четири ползи от замяна на ядрен парогенератор:

- Първата полза е значително намаляване на проблемите свързани с деградацията на тръбичките описани по нагоре. Икономии от избягване на принудително прекъсване поради разкъсване на тръба е трудно да се определят количествено, но със сигурност могат да възлязат на десетки милиони.
- Втората полза е, че се увеличава повърхността на пренос на топлина и се увеличава КПД-то на цялата инсталация, което може да позволи генериране на по-голямо количество електроенергия.
- Третата полза е, че се намалява излагането на персонала на радиация след подмяната.
- Четвъртата и най-важната полза е, че се отлага извеждането от експлоатация на ядреното съоръжение, а също така и възможност за получаване на допълнителен лиценз на съоръжението.

При ПГВ-1000М както беше посочено по нагоре, когато в процеса на експлоатация на парогенератора се достигне до запускане на тръбички над 2 % се налага крайна мярка подмяна на парогенератор.

Обикновено за замяната на един парогенератор са необходими 60-70 дни. Подмяната на парогенератори е практика, следвана от атомните електроцентрали по целия свят, за да се гарантира по дълъг експлоатационен живот на ядрената електроцентрала. Някои примери за централи където са подменени парогенератори са Three Miles Island (USA) and Angra 1 (Brasil)

9. Основните проблеми на експлоатация на хоризонталните ПГ и методи за тяхното решение.

Производството на работна пара за парната турбина на ЯЕЦ се осъществява или в ядрения реактор (едноконтурна ЯЕЦ) или в специални топлообменници (ПГ – двуконтурна ЯЕЦ). ПГ се явява важен елемент в ЯЕЦ с вода под налягане (ВВЕР и PWR). Исторически именно САЩ и СССР са положили основите на ядрената енергетика. ПГ представлява един топлообменен апарат, в който се осъществява предаване на топлина, отведена от активната зона на реактора чрез топлоносителя. От всички обекти на централата извън корпуса на реактора, за ПГ е най-трудно да се изберат материали, от които да бъде изработен, и производствени технологии. Някои детайли на ПГ контактуват с двете среди, поради което трябва да имат висока устойчивост от корозия. Свързващи елементи и детайли на ПГ трябва да премахнат възможността за изтичане от единия контур към другия. Изтичане на топлоносител във втори контур е недопустимо, защото турбинния цех няма биологична защита и е свързан с околната среда. При попадане на работна течност във втори контур, може да доведе до опасни режими на работа на реакторната установка (в резултат на намаляването на концентрацията на борна киселина в топлоносителя). Хоризонталните

ПГ използвани в ЯЕЦ с ВВЕР се различават по конструкция от вертикалните ПГ използвани в PWR. Главната особеност е използването на аустенитна стомана 08X18H10T като материал за топлообменните тръбички на ПГ. Този тип ПГ има редица предимства пред другите видове ПГ, както по отношение на надеждност и удобна експлоатация, така и по отношение на безопасността на блока като цяло. Към 2009 год. в ЯЕЦ с ВВЕР са в експлоатация 270 ПГ хоризонтален тип (162 ПГВ-440 и 108 ПГВ-1000). ПГ от този тип работят във всички двуконтурни ЯЕЦ в Русия, Украйна, България, Чехия, Словакия, Унгария, Финландия, Армения. ПГ от типа ПГВ-440 в момента са в експлоатация извън рамките на проектния срок на експлоатация от 30 години.

Развитието на конструкциите на ПГ за ЯЕЦ с ВВЕР в бившия СССР преминава през развитието на еднокорпусни хоризонтално потопени нагревни повърхности и вградени сепариращи устройства. Този тип парогенератори е монтиран в Красноярската ЯЕЦ (пусната в експлоатация през 1957г.) на ниско налягане на парата (0,1 до 15МРа). Тези парогенератори имат хоризонтален корпус с топлообменни тръби вградени в твърди дъски, снабдени с компенсатор на топлинно разширение.

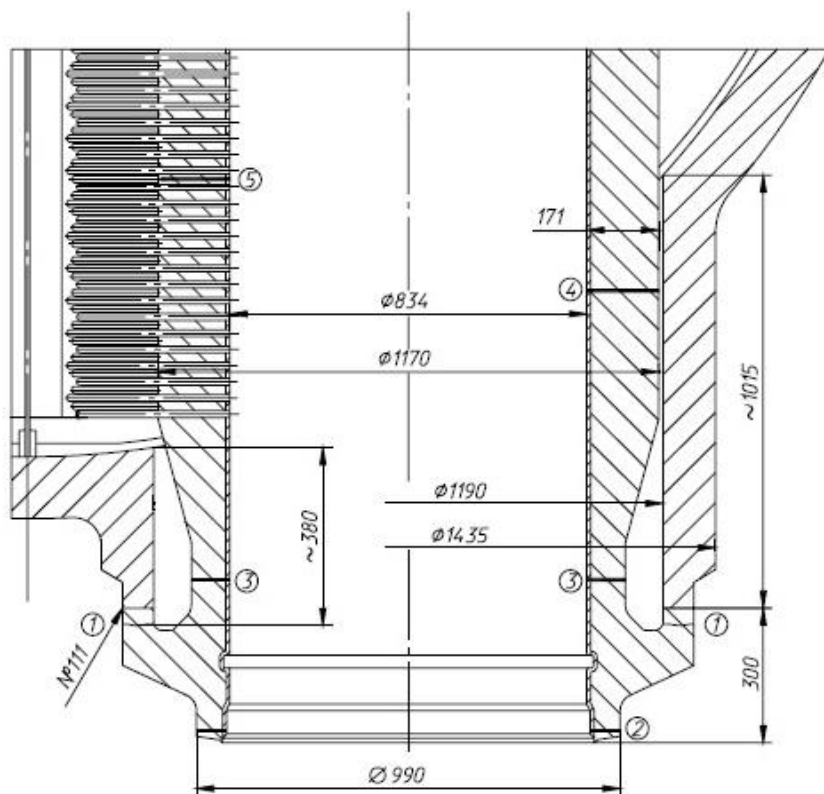
При разработването на ПГ за реактор ВВЕР-1000 са разгледани различни варианти за конструкция и технологична схема, включително и вертикални парогенератори. Въпреки това инженерите са взели решение типа на парогенератора да бъде хоризонтален. За първия тип реактор тип ВВЕР-1000 (проект В-187, блок номер 5 на нововоронежката ЯЕЦ) били изработени ПГ ПГВ-1000М, които е въз основа на конструкцията на ПГВ-1000. Конструктивно ПГВ-1000 почти повтаря ПГ на ЯЕЦ с ВВЕР-440, но се различават с вътрешния диаметър на тялото (4000mm за ВВЕР-1000 3200mm за ВВЕР-440), дебелина на топлообменните тръбички (16x1,5 за ВВЕР-1000 и 16x1,4 за ВВЕР-440), брой на топлообменните тръбички (11100 за ВВЕР-1000 и 5536 за ВВЕР-440), по ефективни сепариращи устройства. За регулиране на скоростта на идващата пара и равномерно разпределение на пароводната смес по пара в обема на парогенератора се поставя перфорирана потопена ламарината.

Проблемите, които възникват по време на експлоатацията на ПГ са :

- Структурна цялост на колекторите на ПГВ-1000;
- Структурна цялост на съединителните фланци на ПГВ-440;
- Корозионно-ерозионно износване на колекторите за питателна вода;
- Пукнатини в района на заваръчен шев номер 111 при ПГВ-1000;
- Корозионно износване на тръбички;

Редица структурни и технологични действия почти разрешават първите три от посочените по горе проблеми. Най-актуалните на днешното време са проблемите свързани с пукнатини в района на шев 111 и корозионното износване на тръбичките.

➤ **Изследване на причините за напукване на заваръчен шев номер 111.**



Област на заварка номер 111

- 1-1 – Сечение, в което се появяват поврежданията;
- 2-2 – ГЦТ Ду850;
- 3-3 – Колектор $\varnothing 834 \times 90$;
- 4 – Колектор $\varnothing 834 \times 171$ неперфорирана част;
- 5 – Колектор $\varnothing 834 \times 171$ перфорирана част;

Проблемът на напукване на метала в областта на свързване на колектора с корпуса на ПГ се появява за пръв път през 1998 на 5 блок на NVNPP по-късно същия тип увреждане е открито при още 3 ПГ, затова започнало да се смята, че това е проблем по обща причина. За да се идентифицират факторите, които водят до напукване, били преведени голяма сума пари на НИОКР (научни изследвания и експериментални разработки). В момента те по специално извършват следното:

- Подробни количествени проучвания на зависимостта от напрежените състояния от експлоатационни фактори;
- Оценка на зависимостта на остатъчното напрежение от технологиите на производство;
- Анализ на производствената технология и свойствата на метала;
- Определяне на критичния размер на пукнатината;
- Измервания и анализ на движението на реакторното оборудване при термично разширение;

Резултатите от изследването позволяват да се идентифицират основните фактори, които определят процеса на увреждане.

- Непроектно стресово състояние в случай на възпрепятстване свободното преместване на ПГ
- Технологична наследственост след операции : валцуване, заваряване , термична обработка.

Планирано е да се продължи комплексното изследване на причините и механизмите на увреждане в следните области:

- Изчислителни изследвания на остатъчни напрежения след валцуване , заваряване и термична обработка;
 - Изследвания за движение на оборудването;
 - Подобряване методите за оперативен контрол и др.
- **Осигуряване на надеждност на топлообменните тръбички**

Надеждната работа на топлообменните тръби на ПГ е важна задача на различни видове ЯЕЦ в целия свят. Както показва опитът, основния фактор, който влияе върху работоспособността на тръбичките се явява химическия режим на водата. Следователно се наблюдават значителни различия в работоспособността на тръбичките на различните енергийни блокове, а в някои случаи на един единствен елемент. Въз основа на анализа за повреждане на тръбите е показано, че решаващ фактор който води до повреда на тръбата е неприемливо високата стойност на замърсяване на тръбата с неразтворими корозионни продукти. В по ранен етап на експлоатацията, това е довело до множество корозионни повреди на топлообменните тръби на ПГ. Основните повреди са следните:

- Развитие на първична точкова корозия повреждания в резултат на присъствието на количество мед в утайките;
- Висока концентрация на корозионо-агресивни примеси в отлаганията;
- Развитие на корозионни пукнатини, в повечето случаи започват от върховете на първични ями, до счупване на тръбичката.

Основните причини, които причиняват щети на значителен брой тръбички са:

- Несъвършенство на системите по втори контур (наличното оборудване е недостатъчно корозионно устойчиво);
- Високи нива на отлагания на корозионни продукти върху топлообменните тръби, което е в резултат на несъвършенството на системите по 2-ри контур;

10. Методика за замяна на парогенератор ПГВ-1000М

1) Работи, които се извършват след вземане на решение за замяна на парогенератор до спиране на блока за неговата замяна.

- Изготвяне на проект и построяване на хранилище за демонтираните парогенератори.
- Поръчване на разглобяемо товарозахватно приспособление (траверса) за транспортиране на парогенераторите.
- Определяне на доставчика на новите парогенератори, реда и средствата за транспортиране на парогенераторите до вратата на транспортния коридор на блока.
- Определяне начина за доставка на парогенераторите от вратата на транспортния коридор до мястото за транспортното приемане в централна зала и обратно.

- Поръчване на предвижващи товароподемни механизми.
- Поръчване на необходимите приспособления, екипировка и инструменти, които са необходими.
- Подготвяне на щатните средства за защита на персонала, средства за дезактивация, хранилища за приемане на радиоактивните отпадъци.
- Подготвяне на детайли и възли за реконструкция на полярния кран.

- Определяне на последователността на монтаж (демонтаж) на парогенератор в случай на вземане на решение за замяна на повече от един парогенератор.

2) Подготвителни работи, извършвани на блока след неговото спиране.

- Извозване на ядреното гориво с тригодишен престой от БОК (басейн за отлежаване на касетите) на блока.
- Отваряне на реактора, изваждане на горивото от ядрения реактор и транспортиране до БОК, поставяне на горния блок на главния резьом.
- Покриване на БОК с щатните плочи.
- Реконструиране на пречещите за транспортиране на парогенераторите площадки.
- Демонтиране на главните циркуляционни помпи(ГЦП).
- Сваляне на топлоизолацията на главния циркуляционен тръбопровод (ГЦТ), главните паропроводи, тръбопроводите по питателна вода, аварийната подпитка, корпуса на ПГ и продувката. Подлежащата на замяна топлоизолация се транспортира до хранилището за твърди радиоактивни отпадъци .

- Извършване на дезактивация на парогенераторите, ЦЗ, боксовете на ПГ, оборудването и тръбопроводите в бокса на ПГ.
- Доставка на всички необходими приспособления, екипировка, инструменти в ЦЗ.
- Разкачване на ГЦТ.
- Затваряне на люковете над демонтирания ПГ.
- Демонтиране на оборудването за диагностика на I контур.

3) Работата по демонтажа на парогенераторите.

- Определяне на местата за рязане на ГЦТ.
- Съставяне на подробна дозиметрична карта на боксовете на ПГ. Да се постави в необходимите места преносна биологична защита.
- Отрязване и демонтиране парния колектор, отрязване на всички съединителни тръбопроводи, демонтиране на всички изравнителни съдове.
- Запушване на всички штуцери и тръби на корпуса на ПГ.
- Заваряване на транспортните щифтове.
- Поставяне на куката на крана разглобяемото товарозахватно приспособление и проверяване на неговата работоспособност без товар.
- Поставяне на капака на колектора по I контур. Транспортиране на ПГ от бокса през транспортния люк в транспортния коридор, поставяне на ПГ върху транспортните колички (транспортен модул).
- Поставяне на капаци на ревизионните люкове, колекторите по II контур и тръбите на парния колектор.
- Транспортиране на ПГ на площадката пред транспортната врата, натоварване на транспортния модул, доставка в хранилището и разтоварване.

4) Работи по монтажа на парогенераторите.

- Новият парогенератор се вкарва в транспортния коридор.
- Демонтират се капациите на колекторите и люковете, заваряват се щифтовете за парогенератора.
- С крана се транспортира новият парогенератор от транспортния коридор в бокса на ПГ.

- Монтиране на хидроамортисьорите, парния колектор, паропроводите, всички съединителни тръбопроводи на ПГ.
- Отрязване на щифтовете от корпуса на ПГ.
- Демонтиране на временните площадки. Възстановяване на площадките за обслужване на ПГ.
- Монтиране на топлоизолация на: ПГ, парния колектор, паропроводите и всички съединителни тръбопроводи.

5) Заключителни работи.

- Монтиране на ГЦП.
- Възстановяване на площадките.
- Провеждане в работно състояние всички защитни системи, системи за безопасност и локализиращи системи. Да се възстанови оборудването за диагностика на I контур.
- Зареждане на ЯР с гориво.
- Разгриване на I и II контур до температурите, определени в регламента и паспортите на оборудването и тръбопроводите и да се извърши хидроизпитание на I и II контур по щатните схеми в съответствие с изискванията.
- Пристъпване към пускане на блока.



Напускане на завода
производител
(хоризонтален
парогенератор)



Пристигане на ПГ на
площадката на ЯЕЦ
(вертикален
парогенератор)



Вкарване на ПГ в
транспортния коридор

11. Изисквания към новите проекти и развитие на конструкциите

Основни изисквания за нови проекти на ПГ

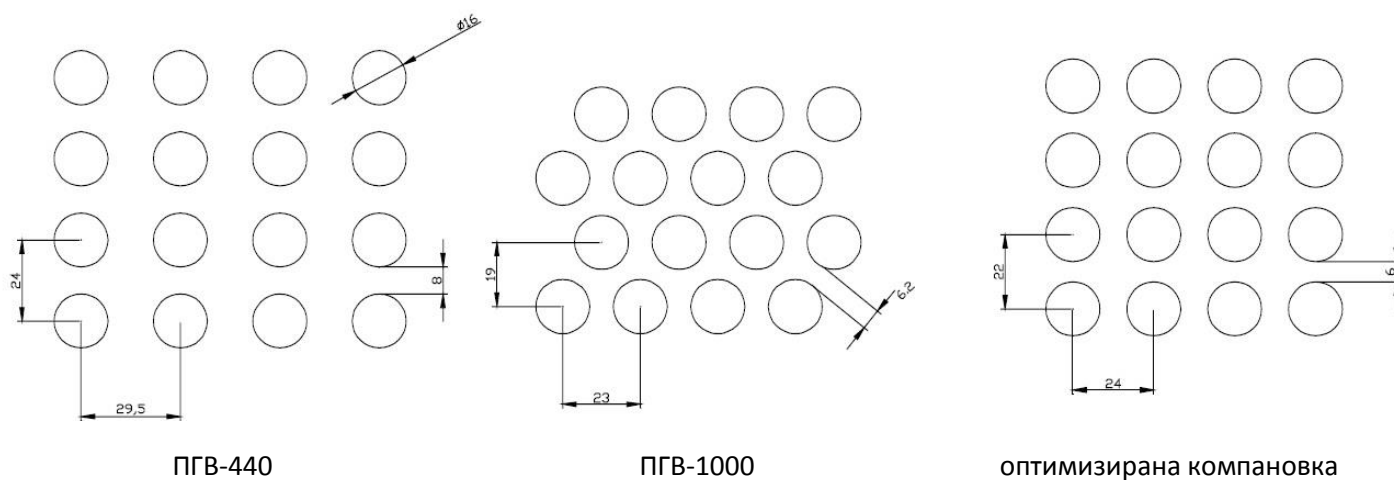
- Еволюционен принцип на развитие, с максимално използвания на натрупания опит до момента;
- Схемата на парогенератора и конструкцията на неговите елементи трябва да осигуряват необходимата производителност и параметри на парата при всички режими на ЯЕЦ.
- Всички елементи на ПГ трябва да осигуряват надеждността и сигурността по време на експлоатация;
- Възможността на възникване на корозионни процеси трябва да бъде елиминирана или значително намалена;
- Конструкцията на ПГ трябва да бъде проста, удобна за инсталиране и експлоатация;
- Трябва да бъде решен въпроса с транспортирането на ПГ и мястото за неговото монтиране в ЯЕЦ.
- Трябва да бъдат отстранени или неутрализирани недостатъците налични за ПГ в ЯЕЦ ВВЕР-440 и ВВЕР-1000

Да вземем за пример ПГВ-1000МК Парогенератор ПГВ-1000МК е модификация на серийния ПГВ-1000М, направен с цел да се постигне по-висока производителност надеждност и сигурност, за да се подобрят условията за експлоатация и поддръжка. Диаметъра на корпуса на ПГ се увеличава с 200 mm, което позволява да се реализират редица нови конструкторски решения. Главната особеност на този тип ПГ е използването на коридорно разположение на тръбите в топлообмения сноп, което позволява:

- Увеличаване на скоростта на циркулация в тръбния сноп, като по този начин ще се намали вероятността за повреждане на топлообмените тръби, породени от по ниската скорост, чрез намаляване скоростта на нарастване на отлаганията по ТОТ и концентрацията на корозиоактивните примеси под тях;

- Да се намали възможността от запушване на междутръбното пространство;
- Да се облекчи достъпа в междутръбното пространство за инспекции на ТОТ и за почистване при необходимост;
- Увеличаване на запаса на вода в ПГ;
- Увеличаване на пространството под тръбния сноп, което позволява по лесно отстраняване на утайките;
- Подобряване на напрегнатото състояние на колектора на топлоносителя.

При използване на коридорно разположение на тръбите, хидравличното съпротивление по втори контур е по-ниско от колкото при шахматно разположение. Коридорната компановка позволява почти 15% повече свободно пространство (в междутръбното пространство), отколкото при ПГВ-1000М с шахматна компановка. На фигурата са показани компановките на тръбни снопове при ПГВ-440, ПГВ-1000 и новия оптимизиран вариант:



За да се подобри циркулацията и повиши надеждността на работа тръбичките се предвижда разделяне на части на питателната вода в щранговия коридор. В тези ПГ при увеличаване на височината на теплообмения сноп, и запазване на височината на сепариращото пространство, осигурява необходимата влажност на парата.

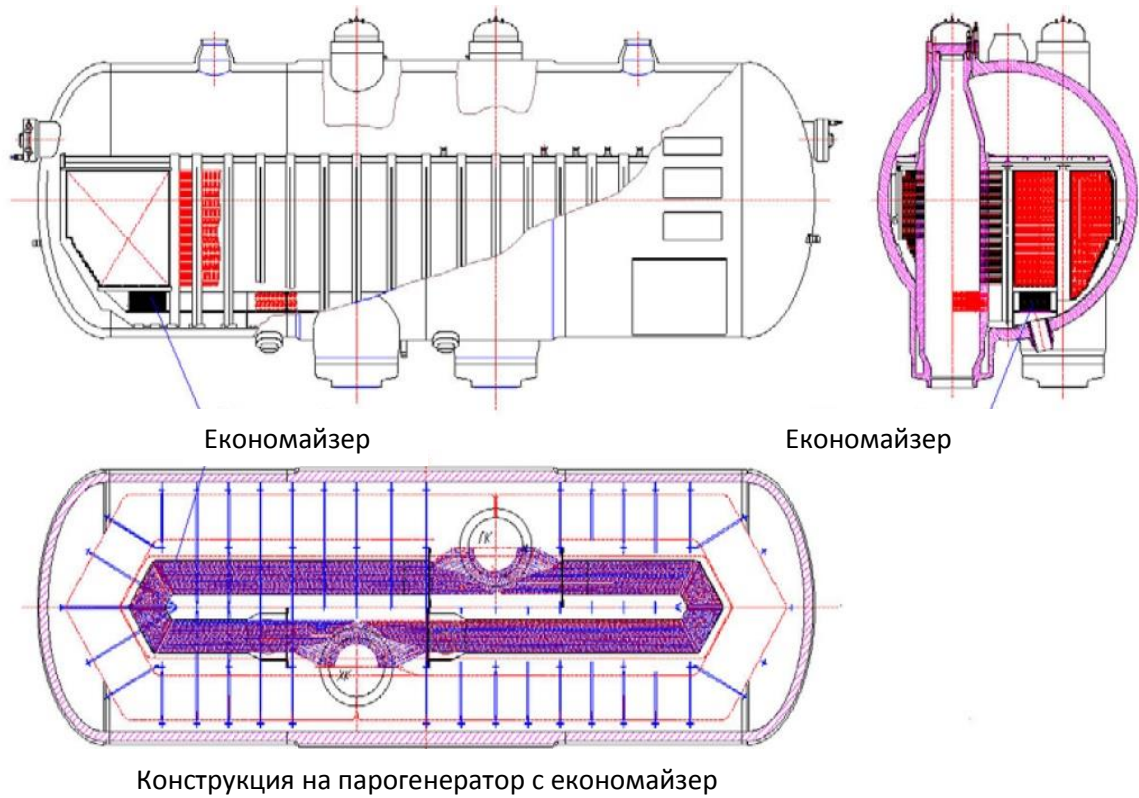
Разработения ПГ с повишена мощност ПГВ-1000МКП се явява модификация на ПГВ-1000МК и позволява по-голямо паропроизводителност и по високо налягане на парата.

Подобрения на ПГВ-1000МКП в сравнение с ПГВ-1000МК:

- Увеличена интензивност и повишен разход;
- Като уплътнения за фланцовите съединения на ПГ се използват подложки от експандиран графит;
- Вградени почистващи устройства на утайки в ниските редове на ТОТ.

Проектът на парогенератор ПГВ-1500 се явява еволюционно продължение и развитие на опита и достиженията в областта на създаването на ПГ за ЯЕЦ с ВВЕР. Той наследява всички положителни качества на хоризонталните ПГ и е насочен към постигане на по-съвременни характеристики и параметри на ЯЕЦ с високи мощности, включително и към постигане на конкурентноспособност в световен мащаб. Отличителните особености на конструкциите (различни от тези на ПГВ-1000МК) – отсъствие на парен колектор, по-голям радиус на ТОТ, по лесен достъп до долните ТОТ. За обслужване на ПГ се предвижда прилагането на дистанционна проверка и ремонт, което позволява значително да се намали времето и дозата при обслужвания. Главната цел на проекта е да постигнат параметри и характеристики, отговарящи на нивото на най-новите проекти на ЯЕЦ. Чрез оптимизиране на различни параметри налягането на парата може да бъде повишено до 7.34 МРа, а при наличие на економайзер до 7.8 МРа. По надолу е показана схема на ПГ с економайзер. Теплообменият сноп на тези ПГ се състои от изпарител и економайзер, свързани паралелно по пътя на топлоносителя в първи контур. Питателната вода се подава директно в подбрани за тази цел места в долната част на централния пакет, без да се смесва с водата на ПГ и минава по ТОТ (измиване на външната страна на тръбата) и се нагрява до температура малко под температурата на насищане и излиза от економайзера през отвори в горните тръби на обема на изпарителния сноп. Трябва да се има в предвид, че говорим за проектни решения, които са необходими за реализирането на проекти на ново ЯЕЦ. При използването на економайзер в проект ПГВ-1600, трябва да бъдат решени редица научно-технически и конструктивни проблеми :

- Изключване на мъртви зони и местни кипения в ТОТ;
- Да се направи организация на оптимално разпределение на концентрацията на соли в обема на ПГ;



В заключение ще отбележа, че при разработването на проекта на ПГ за РУ с ВВЕР-1500 се е установило, че размера и типа на ПГ не са фактори, ограничаващи размерите на контеймънта, както се е смятало по рано. Този извод подчертава предимствата на хоризонталните ПГ и го прави обещаващ за нови проекти реакторни установки.

12. Основни технически характеристики

| Наименование | ПГВ-440 | ПГВ-100М | ПГВ-1000МК | ПГВ-1000МКП | ПГВ-1500 | ПГВ-16000 |
|---|-----------|----------|------------|-------------|-----------|-------------------------|
| Топлинна мощност, MW | 229 | 750 | 750 | 800 | 1062,5 | 1087,5 |
| Паропроизводителност, t/h | 450 | 1470 | 1470 | 1602 | 2150 | 2210 |
| Налягане на парата, MPa | 4,61 | 6,27 | 6,27 | 7 | 7,34 | 7,8 |
| Температура на парата, C | 258,9 | 278,5 | 278,5 | 287 | 289 | 293 |
| Температура на топлоносителя на вход/изход, C | 297/270 | 320/289 | 321/291 | 329/298 | 330/297,6 | 330,2/298,6 |
| Налягане на топлоносителя, MPa | 12,26 | 15,7 | 15,7 | 16,14 | 15,7 | 16,2 |
| Разход на топлоносител, m ³ /h | 7100 | 21200 | 21500 | 21400 | 26971 | 28440 |
| Диаметър на корпуса, m | 3,2 | 4 | 4,2 | 4,2 | 4,8 | 4,8 |
| Наличие на економайзер | Не | Не | Не | Не | Не | Да |
| Диаметър на ТОТ, mm | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| Дебелина на ТОТ, mm | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 1,5 1,4 | 1,5 | 1,3 1,2 |
| Разположение на ТОТ | коридорно | шахматно | коридорно | коридорно | коридорно | коридорно о шахматно |
| Топлообменна повърхност, m ² | 2577 | 6115 | 6105 | 6105 | 9490 | 9212 |
| Брой ТОТ | 5536 | 11100 | 10978 | 10978 | 15120 | 14750 |

13. Използвана литература

- 1) Списание "Първа атомна", издава АЕЦ "Козлодуй" ЕАД
- 2) Владимир Велев и Калин Филипов, Ядрена техника
- 3) Георги Глухов, Ядрени енергийни реактори
- 4) Тодориев Н., И. Чорбаджийски, Енергийни парогенератори, С., Техника, 1983.
- 5) Батов С.Г., Топлоелектрически и ядрени централи, Техника, С., 1986
- 6) Хаджигенова Н.П., Термична чата на ТЕЦ и ЯЕЦ, Техника, С., 1994
- 7) Трунов Н.Б., Драгунов Ю.Г. Совершенствование конструкции ПГ АЭС сВВЭР. The International Nuclear Forum "Nuclear Energy - Challenges and Prospects",Warna, Bulgaria, June 2003.
- 8) R.W.Staele, J.A.Gorman. Quantitative assessment of submodes of stress corrosion cracking on the secondary side of steam generator tubing in pressurized water reactors. Corrosion, 2003, Vol 59, №11.
- 9) Трунов Н.Б., Лукасевич Б.И., Харченко С.А., Сотсков В.В., Парогенератор ПГВ-1500
- 10) «Отчет об опыте эксплуатации и усовершенствованиях парогенератора типа ПГВ-1000М» ОКБ Гидропресс, 1998 год.