

A négy VVER-1200 gőzfejlesztő és az Arabella™ gőzturbina illeszkedésének üzemi konstrukciós követelményei és biztonsági feladatai

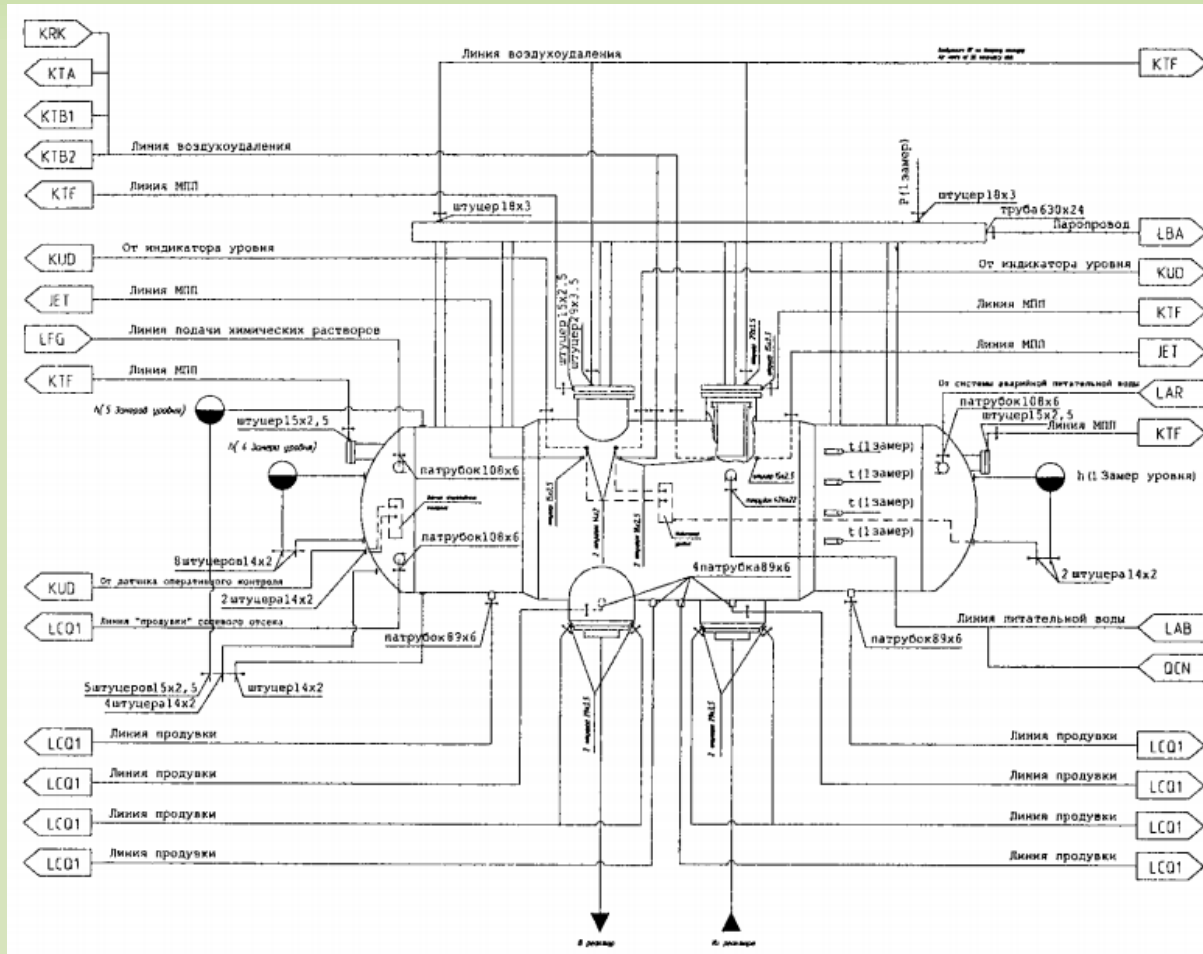
Dr. Ósz János



Tartalom

1. A VVER-1000 gőzfejlesztőkhöz kapcsolódó szekunderkörü rendszerek.
2. A GE ArabellaTM gőzturbina kapcsolása, berendezései, rendszerei, velük szemben támasztható követelmények.
3. A gőzfejlesztők harmóniaelvének kért mátrixa.

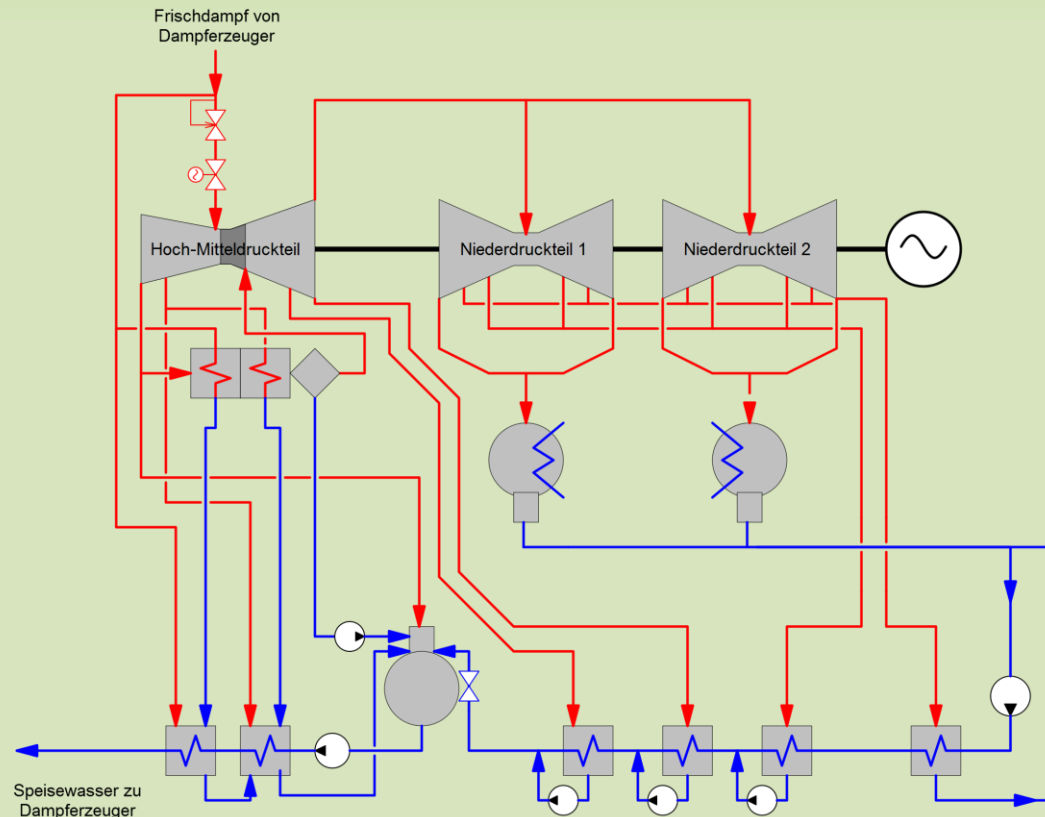
1. A VVER-1000 gőzfejlesztőkhöz kapcsolódó rendszerek [Lukaszevics]



A VVER-1000 gőzfejlesztőkhöz kapcsolódó rendszerek [Lukaszevics]

| Jelölés | Primerköri rendszer | Szekunderköri rendszer |
|---------|--|--|
| KUD | | Vízszint és gőznedvesség-szabályzó |
| KTA | Reaktorépületben levő berendezéseket leürítő | |
| JET | Hőhordozó-szivárgás elvezető és észlelő | |
| KTB1, 2 | Baleseti gázelszívó rendszer | |
| LAB | | Tápvízrendszer |
| LAR | | Baleseti tápvízrendszer |
| LBA | | Gőzvezetékek, gőzledobó berendezések |
| LCQ1 | | Gőzfejlesztők leiszapolása |
| LFG | | Gőzfejlesztők köpenytéri kémiai tisztító |
| QCN | | Vegyszer-előkészítő, adagoló a tápvízbe |
| KRK | Kisnyomású nitrogén | |
| KFT | Reaktorépület speciális csatorna | |

2. A GE Arabella™ gőzturbina egy közös nagy- és középnyomású aszimmetrikus házból és három (az ábrán 2 db) szimmetrikus kisnyomású házból áll.



A gőzturbina-fokozatok számított gőz- és nedvességtartalma, a folyadékfázisú víz és gőz tömegárama az orosz hőséma alapján
 A hőséma HIBÁS adatai helyett saját számítás

| Gőzturbina fokozat | x | ω | $\dot{m}_{víz}$ [kg/s] | $\dot{m}_{gőz}$ [kg/s] |
|-------------------------------|-------|----------|------------------------|------------------------|
| Nagynyomású gőzturbina | | | | |
| belépő | 0,997 | 0,003 | 4,891 | 1680,918 |
| 1. fokozat | 0,910 | 0,090 | 138,050 | 1395,203 |
| 2. fokozat | 0,890 | 0,110 | 160,187 | 1294,084 |
| 3. fokozat (kilépő) | 0,857 | 0,143 | 171,350 | 1022,746 |
| Középnomású gőzturbina | | | | |
| belépő (4. fokozat) | 1,000 | 0,000 | 0 | 1194,096 |
| 5. fokozat | 1,000 | 0,000 | 0 | 1140,107 |
| Kisnyomású gőzturbina | | | | |
| belépő | 1,000 | 0,000 | 0 | 1042,522 |
| 6. fokozat | 0,905 | 0,095 | 99,459 | 943,063 |
| 7. fokozat | 0,891 | 0,109 | 104,986 | 861,357 |
| 8. fokozat (kilépő) | 0,894 | 0,106 | 94,209 | 795,955 |

Gőzturbina anyagminőségek, bevonatok

- A nagynyomású (HP) turbinaházba belépő gőz telített és az expanzió során nedvessé váló gőz erózióval szembeni védelme: *az összes nedvesgőzzel érintkező alkatrész 12 % krómtartalmú acél.*
- A cseppleválasztó-újrahevítőből túlhevített gőz lép be a nagynyomású házzal közös közbenső nyomású (IP) házba, és *az IP nyomású szakaszon végig száraz (túlhevített) gőz áramlik*, ezért nem igényel speciális eróziós-korróziós védelmet. Ennek ellenére a forgó és állólapátok valamint a tömítőgyűrűk anyagminősége 12 % krómtartalmú acél.
- A kisnyomású ház erózióval szembeni védelme az EDF nukleáris flotta feldolgozott üzemviteli tapasztalatán alapszik. Megítélésem szerint az LP4 és LP5 forgólapátok anyagminősége – az első adag élettartama után – titánötvözet lesz a rozsdamentes acélnál lényegesen hosszabb élettartammal és legalább kétszeres árral – a fejlett országok gyakorlatának megfelelően.

2.1. Tápvízrendszer: A gőzturbina hőcserélőinek általunk becsült felülete

A hőátadó csövek anyagminősége rozsdamentes acél.

Minden tápvíz-előmelegítő és újrahevítő – az eddigi hazai létesítésektől eltérően – fekvő (vízszintes) elrendezésű lesz.

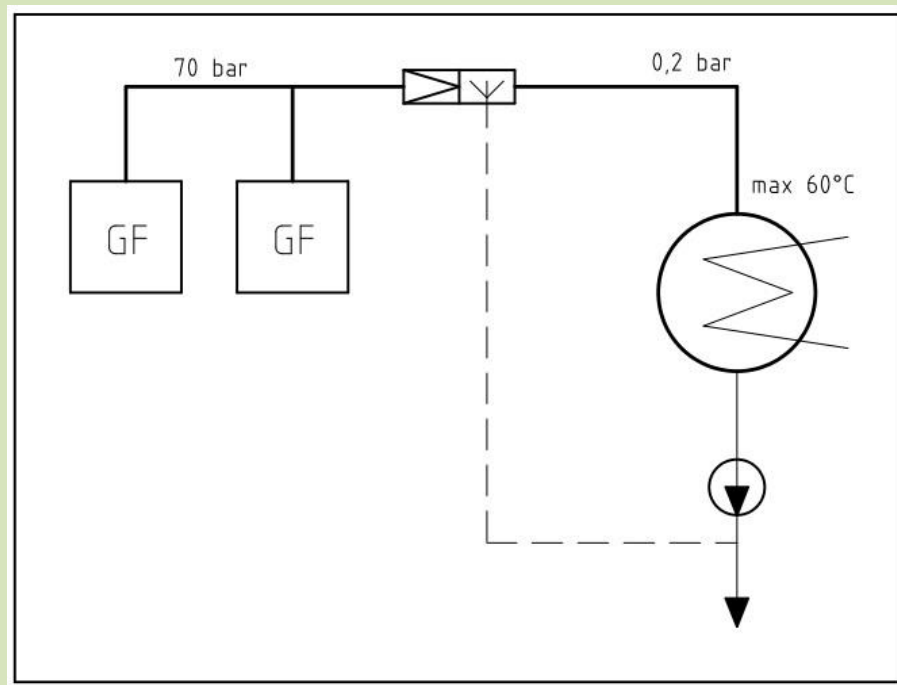
| Hőcserélők | \dot{Q} | Δt_{lm} | kF | k | F |
|---|------------------|-----------------|--------|----------------------|----------------|
| | kW _{th} | °C | kW/°C | kW/m ² °C | m ² |
| 3 db (harmad) kondenzátor | 1926300 | 13,92* | 326673 | 3,0 | 48000 |
| 3 db LP1 kisnyomású előmelegítő | 99589 | 11,99 | 8308 | 2,5 | 3600 |
| 2 db LP2 kisnyomású előmelegítő | 169406 | 15,02 | 11278 | 2,6 | 4400 |
| 1 db LP3 kisnyomású előmelegítő | 212491 | 16,26 | 13067 | 2,7 | 5200 |
| 1 db LP4 kisnyomású előmelegítő | 123348 | 8,36 | 14761 | 2,8 | 5200 |
| 1 db GTT gáztalanító táptartály | 28317 | | | | 0 |
| 2 db HP6 nagynyomású előmelegítő | 185435 | 16,41 | 11298 | 2,9 | 4000 |
| 2 db HP7 nagynyomású előmelegítő | 175985 | 12,86 | 13687 | 2,9 | 5000 |
| 2 db RH1 túlhevítő | 271034 | | 13032 | 0,6 | 22000 |
| 2 db RH2 túlhevítő | 320497 | 20,80 | 11813 | 0,7 | 19000 |
| 4 db gőzfejlesztő | 3212134 | 27,13 | 125222 | 5,3 | 24420 |

Tápvízrendszer

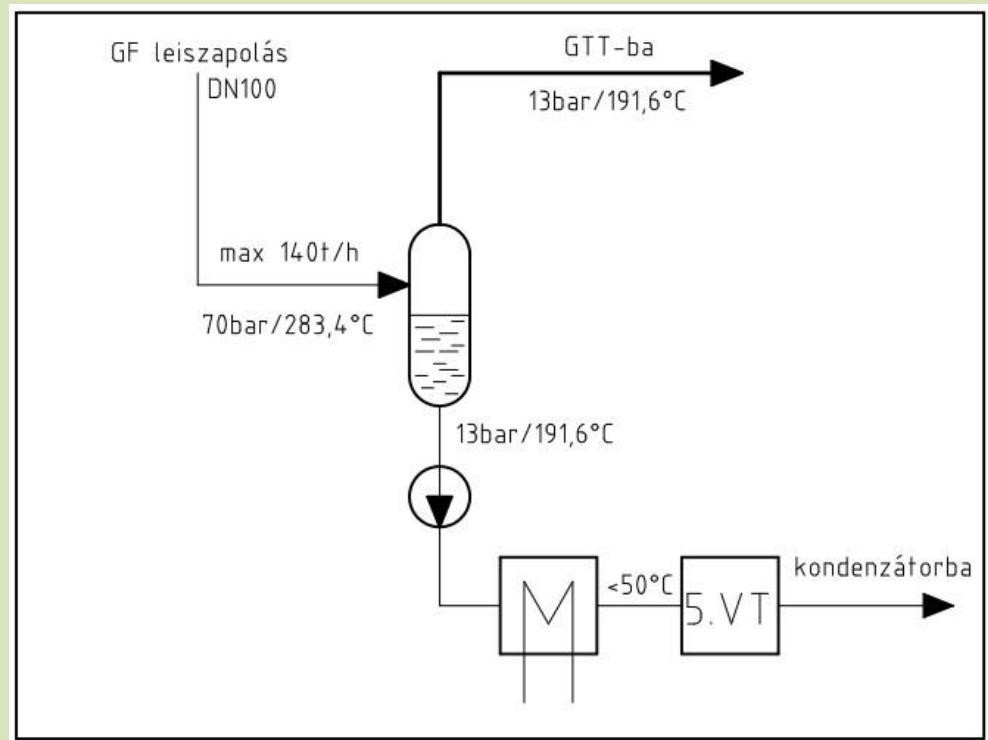
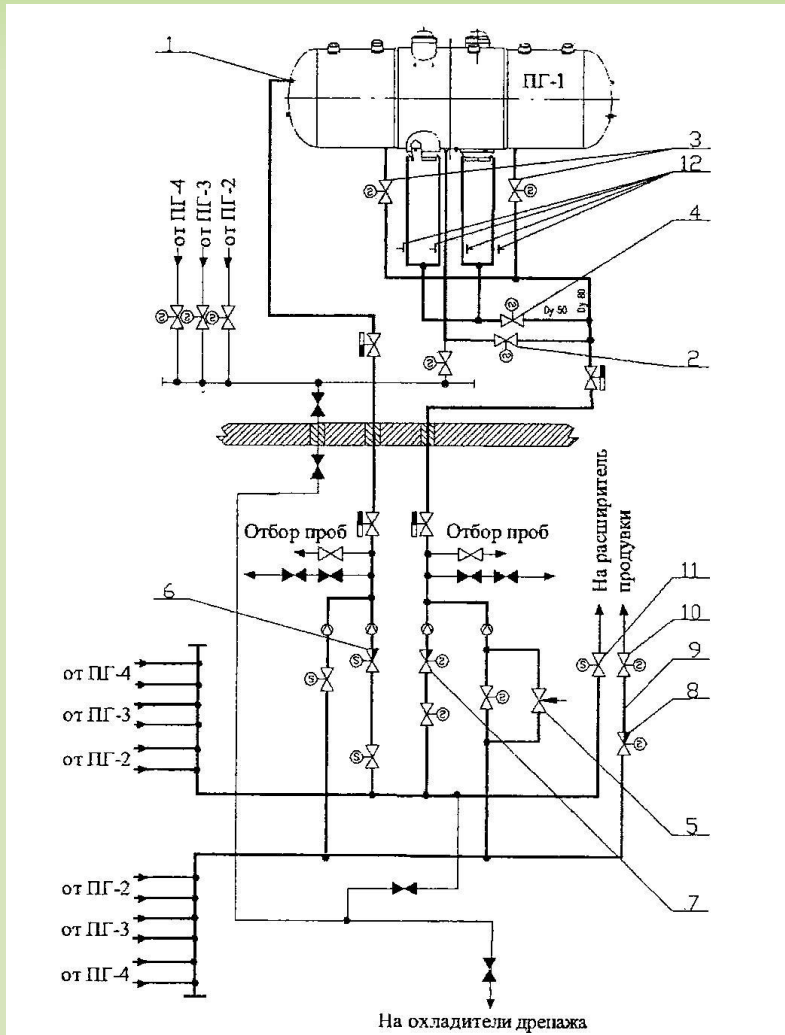
2.2. Baleseti tápvízrendszer.

- Kondenzátum-tisztító: 5 db egyenként $\dot{V}=950$ m³/h névleges kapacitású *mechanikus* (cartridge) *szűrő* 90/40/10 μm pórusméretű elemekkel – a diszperz korróziótermékek folyamatos eltávolítására → ***A GTT előtt EMF (kb. 150 oC) hatékonyabb lenne!***
- 5 db egyenként $\dot{V}=900$ m³/h névleges kapacitású *H⁺* kationcserélő és kevertágyas ioncserélő – ***CSAK indulás és hűtővíz-bekerülés esetén üzemel, mert szennyezőion-forrás nagy tisztaságú munkaközegnél!***

2.3. Gőzvezetékek és gőzledobó berendezések A blokk redukáló berendezés (BRU) és kondenzátor (K) elvi kapcsolása



2.4. A négy gőzfejlesztő leiszapolása



Az orosz névleges adatok

- Mind a négy gőzfejlesztő folyamatos leiszapolása az ún. „sótérből” történik 15 t/h maximális tömegáramig (DN80), valamint a két kollektor és köpeny közötti szűk térből, az ún. „kollektorzsebből” 2x5 t/h tömegáramig (2 db DN20 csonk 1 db DN50 vezetékbe bekötve) → Kevesebb elegendő nagy tisztaságú munkaközegnél.
- Tehát a négy gőzfejlesztő folyamatos leiszapolásának maximális tömegárama $\dot{m}_{maxfoly} = 4 \cdot 15 + 4 \cdot 10 = 100$ t/h, a tápvíz névleges tömegáramának (6420 t/h) 1,56 %-a.
- A periodikus leiszapolás a köpeny aljáról 25 t/h tömegáramig (DN80) valamint a két kollektorzsebből 10-20 t/h tartományban a négy csonkon keresztül történhet → *Kijön ekkora tömegáram? Vezetékek hidraulikája?*
- Egy gőzfejlesztőből a folyamatos és periodikus leiszapolás együttes tömegárama 35 t/h lehet, így a négy gőzfejlesztőből $\dot{m}_{max} = 4 \cdot 35 = 140$ t/h, a tápvíz névleges tömegáramának 2,18 %-a lehet (2 db DN80 csővezeték a kigőzölögtető előtt DN100 vezetékkel egyesül).

A négy gőzfejlesztő leiszapolása

- A négy gőzfejlesztő köpenyteréből leürített $p \approx 70$ bar nyomású telített víz a $p_{KG} \approx 13$ bar nyomású kigőzölögtetőbe kerül, ahol a telített víz tömegáramának 23 %-a telített gőzként a gáztalanítós táptartályba, 77 %-a pedig lehűtésre (< 50 °C) kerül egy hőcserélőben (lúghűtőben).
- *Az 5. víztisztító névleges tömegárama így 108 t/h, amelyre nem találtam adatot az orosz dokumentációban.*
- Kíváncsú, hogy leállítás alatt a gőzturbinától független hűtés (pl. közbenső hűtőköri hűtővízzel) biztosítsa a gőzfejlesztő víz lehűtését, ami a K-220-44 gőzturbina leállása alatt a hat VVER-440 gőzfejlesztőnél nem volt lehetséges.

2.5. A gőzfejlesztők kémiai tisztító rendszere

- Elfogadható, hogy az orosz üzemviteli tapasztalatok alapján kiépítésre kerül a gőzfejlesztők kémiai tisztító rendszere. Az orosz üzemviteli gyakorlat, hogy jelentős tömegű korróziótermék halmozódik fel a csőkötegben és rakódik le a hőátadó csöveken. Ugyanakkor túlzottnak tartjuk, hogy kémiai tisztítást akkor kell elvégezni, ha a lerakódás meghaladja a 100 g/m^2 értéket, ami $25 \text{ }\mu\text{m}$ vastag lerakódásnak felel meg [2]. (Paks 1 VVER-440 gőzfejlesztőinek hőátadó felületét – a vízüzem-váltás után – lerakódásmentesnek tekintjük, ha (a felső hőátadó csöveken) mérhető lerakódás vastagsága nem éri el az $50 \text{ }\mu\text{m}$ értéket.)
- Ugyanakkor hazai tervezési elvárás, hogy **lehetőleg ne kerüljön sor a gőzfejlesztők köpenytéri kémiai tisztítására**. Ahhoz, hogy ez az elvárás realizálható legyen, ismerni kell a VVER-1200 gőzfejlesztő köpenytéri áramlási képét (**CFD modell szükségessége!**), mert a melegoldali csőkötegben elhelyezkedő tápvíz-elosztó a diszperz korróziótermékek lerakódását támogatja a hőátadó csöveken. Ez felveti a tápvíz-elosztó helyének megváltoztatását a köpenytéri cirkuláció megváltoztatása érdekében. Az orosz dokumentációban van olyan magyarázó ábra, amelyen a tápvíz-elosztó a csőköteg felett helyezkedik el.)
- A másik követelmény, hogy a gőzfejlesztőkbe lépő tápvíz összes korróziótermék koncentrációja normál üzemben ne $10 \text{ }\mu\text{g/kg}$ -nál ($\dot{C}_{kt} \leq 62 \text{ g/h}$) [1] hanem $5 \text{ }\mu\text{g/kg}$ -nál kisebb ($\dot{C}_{kt} \leq 31 \text{ g/h}$) legyen [2]. A különbség ($\Delta \dot{C}_{kt} \leq 31 \text{ g/h}$) folyamatosan a gőzfejlesztőkben marad, hiszen a kollektorzsebből a folyamatos és a periodikus leiszapolás nem képes többet eltávolítani **A sótérből elvett leiszapolásban nincs, ill. alig lehet diszperz korróziótermék.**

2.6. Vegyszer-előkészítő és adagoló rendszer

- Az orosz terv szerint vagy a főkondenzátumba (valószínűleg a kondenzátum-tisztító után) vagy a (gáztalanítós táptartályból kilépő) tápvízbe illékony ammóniát (NH_4OH oldatot), hidrazint (N_2H_5OH oldatot) és nem illékony etanol-amin oldatot kell adagolni. Szerintem
 - a gáztalanítós táptartályból kilépő tápvízbe, a tápszivattyú szívóágába ammóniát és hidrazint,
 - a gőzfejlesztőkbe lépő tápvízbe etanol-amint adagolni.
- A nem illékony etanol-amin a gőzfejlesztő vizet, az illékony ammónia a tápvizet (és főkondenzátumot, gőzt) lúgosítja megfelelően, valamint a maradt hidrazin a hőmérséklet növekedésével ammóniára bomlik.
- Ma már az adagoláshoz nem szükséges külön vegyszeroldat bekeverő és adagoló tartályt létesíteni, elegendő a leszállított koncentrációjú vegyszer közvetlen adagolása ausztenites acél anyagminőségű precíziós dugattyús szivattyúval és az adagolást a tápvíz, ill. a gőzfejlesztő leiszapolás pH_{25} értékéről vezérelni.
- *Ki lehet-e többfunkciós kondicionáló vegyszerrel az orosz szabványos munkaközeg kondicionálást váltani, ha kizárólagos érvényű az orosz dokumentáció?*

Anyagminőség jelölések

- „A VVER-1200 gőzfejlesztő két kollektorának anyagminősége 10MnNi2MoVA-Sh vagy 10MnNi2MoVA-A-KP30.” Több hazai szakember szerint ez nem a VVER-1000 gőzfejlesztők orosz irodalomban előforduló 10GN2MFA anyagminősége. Az anyagminőség összetételéből azonban egyértelműen megállapítható, hogy *az orosz (10GN2MFA), ill. „latin” (10MnNi2MoVA) jelölésű anyagminőség azonos.*
- Így a 4 db VVER-1200 gőzfejlesztő hőátadó csöveinek anyagminősége 08Cr18Ni10Ti (08H18N10T).

3. A gőzfejlesztők harmóniaelvének kért mátrixa

| Konstrukció | Szerkezeti anyag | Víz kémia |
|---|--|--|
| A konstrukció megszabja a berendezésekben lejátszódó áramlási, hő és anyagátviteli folyamatokat, ezek lokális egyenlőtlenégeit: | A szerkezeti anyag megszabja a fémfelület/ek/ általános korróziójának minimális sebességét és a lokális károsodási folyamatokra való érzékenységet | A víz kémia a szerkezeti anyag és víz érintkezésével befolyásolja a szerkezeti anyag(ok) általános korrózióját, a korróziótermékek vízbe kerülését, valamint a szerkezeti anyagot károsító lokális korróziós környezet kialakulását. |

A gőzfejlesztők harmóniaelvének kért mátrixa

Már a tervezésnél ismerni kell az egyenlőtlenségek helyét és mértékét! Ezt ma már a gőzfejlesztők CFD (multimédiás) modelljei lehetővé teszik. A gőzfejlesztők lokális egyenlőtlenségei:

- holt áramlási zónák a hőátadó csövek megfogása környezetében (konstrukciós rések), a hőátadó cső és csőfal-furat közti résekben (PWR), két kollektor körüli gyűrűben (VVER);
- a fővízköri hőhordozó egyenetlen tömegáram-eloszlása a hőátadó csövekben (PWR és VVER GF-ben egyaránt);
- a hőátadó felület térfogati hőáram-sűrűségének 4-5 nagyságrendnyi különbsége (PWR és VVER GF-ben egyaránt).
- Az egyenlőtlenségek miatt lokálisan nagyobb húzófeszültségek ébredhetnek az egyes hőátadó csövekben.

A gőzfejlesztők és szekunderköri hőcserélők hőátadó csövei: a szerkezeti anyag/ok/ általános korróziójának sebessége minél kisebb legyen, és ne legyen érzékeny a lokális korrózióra.

- A VVER gőzfejlesztők hőátadó csöveinek anyagminősége (08Cr18Ni10T) 9-11 % nikkeltartalommal érzékeny a transzkrisztallin feszültségkorrózióra.
- A 08Cr18Ni12T) 11-13 % nikkeltartalommal kevésbé érzékeny a transzkrisztallin feszültségkorrózióra (lásd Dukovany VVER-440, Busher, Kudamkulan VVER-1000 GF-k hőátadó csöveit).

A munkaközeg minden állapotában nagy tisztaságú és megfelelően kondicionált, a szerkezeti anyag/okk/al kompatibilis legyen.

A gőzfejlesztők harmóniaelvének kért mátrixa

| | | |
|--|--|--|
| <p>A tápvíz felmelegítéséhez szükséges gőz 5,3-szor nagyobb a VVER-1200 gőzfejlesztőben, mint a 108 % hőteljesítményű VVER-440-ben. Tápvíz-elosztó csőkötegben vagy csőköteg felett?</p> | | <p>Ha a csőkötegben, akkor a diszperz korróziótermékek hőátadó csöveken való lerakódását, ha a csőköteg felett az iszap felhalmozódását a köpeny alján támogatja.</p> |
| <p>A VVER gőzfejlesztők két kollektorának valamint a kollektor köpeny kapcsolat (№111 varrat) repedésének ma már nagyobb a kockázata, mint a hőátadó csövek feszültségkorróziós repedésének.</p> | <p>A VVER-1200 gőzfejlesztő két kollektorának anyagminősége 10MnNi2MoVA-Sh vagy 10MnNi2MoVA-A-KP30 gyengén ötvözött acél, a primerköri (belső) felületén a hőátadó csővel azonos anyagminőségű, kb. 6 mm-es felrakott hegesztésével.</p> | |
| <p>A VVER-1200 GF-k sótérből elvett leiszapolása az ionokra hatékony, míg a kollektorzsebből és a köpeny aljáról elvett leiszapolás a diszperz korróziótermékekre nem hatékony.</p> | <p>Ausztenites acélból kell készíteni a tápvíz-elosztó kollektort, kivágott távtartó szalagokat, a meleg kollektor környezetében a vízszint alatt elhelyezett perforált lemezt, valamint a cseppleválasztó perforált lemezt.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ A gőzfejlesztő maximális ionkoncentrációjú helyéről, az ún. sótérből elvett leiszapolás kloridion koncentráció várt értéke 10 µg/kg (orosz 30 µg/kg). 10 µg/kg-nál lehet nagyobb kis tömegáram mellett. ▪ A gőzfejlesztőből elvett periodikus leiszapolás számított összes vas koncentráció várt értéke >270 µg/kg – a felhalmozódás elkerülése érdekében. |

A gőzfejlesztők harmóniaelvének kért mátrixa

Az 5. víztisztító a pótvízzel azonos vízminőségre tisztítja a gőzfejlesztők leiszapolását.

▪ Gőzturbina tápvíz és gőz, a kapcsolódó pótvíz rendszer kizárólag acél, rézmentes, a hőcserélők hőátadó csövei nagy krómtartalmú vagy ausztenites rozsdamentes acél.

▪ Nagy tisztaságú pótvíz és a gőzfejlesztők tisztított leiszapolása;
▪ Hűtővíz-tömör kondenzátor;
▪ Légtömör vákuumos részek;
▪ Zárt szekunderkör (minimális pótvíz-veszteség).
▪ A gőzfejlesztőkbe lépő tápvíz összes vas korróziótermék koncentráció várt értéke $<5 \mu\text{g}/\text{kg}$.
▪ Korróziótermék-szűrő a kondenzátor után vagy a gáztalanító táptartály előtt.
▪ A gőzfejlesztőkbe lépő tápvíz $pH_{25}=9,5-9,7$ lehetőleg multifunkciós kondicionáló vegyszerrel.

Köszönöm a figyelmet!

Ősz János: Hő- és
atomerőművek vízüzeme
(e-book Akadémiai Kiadó, 2019.)