Jadrová elektráreň A1 v kocke

Slovenská nukleárna spoločnosť 2010

Spracoval: Karol Feik, Juraj Kmošena

Autori podkladov:

Antonín Bařinka
Milan Bošanský
Jozef Dopjera
Karol Feik
Juraj Kmošena
Ladislav Konečný
Jozef Mádel
Štefan Rohár
Ľudovít Tomík
Jozef Vrbenský
Ján Žembera

Obsah

1. Úvod 5
2. Umiestnenie a hlavné charakteristiky elektrárne 9
3. História budovania jadrovej elektrárne v československu 19
4. Komplexné skúšky atómovej elektrárne A1 30
5. Fyzikálne spúšťanie 41
6. Energetické spúšťanie 49
7. Aktívna zona 68
8. Palivové články 82
9. Reaktor 103
10. Primárny okruh reaktora 120
11. Okruh ťažkej vody 136
12. Sekundárny okruh 146
13. Plynové hospodárstvo 151
14. Transportno – technologické zariadenia 157
15. Meranie a regulácia 169
16. Elektrická schéma a jej zmeny 194
17. Dozimetria 218
18. Systém kontroly tesnosti pokrytia palivových článkov 227
19. Zariadenia chemickej technológie a chemický režim 239
20. Pomocné okruhy reaktora 257
21. Vážne havárie v elektrárni A1 273

Vysvetlivky: 290

Doslov 291

O autoroch podkladov a spracovateľoch 293

Literatúra: 298

1. ÚVOD

Jadrová elektráreň A1 v Jaslovských Bohuniciach stála na začiatku československej jadrovej energetiky. Dnes si už málokto uvedomuje, akou výzvou pre vtedajší československý priemysel bola jej výstavba a uvedenie do prevádzky. Tento projekt v rámci vtedajšej Československej republiky bol trochu krokom do neznáma. Rozhodovalo sa o ňom v roku 1956, kedy nebolo skúseností s jadrovou energetikou a nebola ani reálne podložená predstava, čo to všetko znamená. A možno práve toto bol podstatný fakt, ktorý „nezaťažoval" tých, ktorí prijali rozhodnutie o výstavbe našej prvej jadrovej elektrárne.

Jadrová elektráreň A1 s reaktorom KS150 typu HWGCR – ťažkou vodou moderovaný reaktor na prírodný kovový urán chladený plynným CO_2 s výkonom 150 MW_e bola vyvinutá s cieľom demonštrovať a overiť možnosti energetického využívania ťažkovodných reaktorov na prírodný urán. Československo vyvíjalo tento typ v rámci medzinárodnej deľby práce v socialistickej Rade vzájomnej hospodárskej pomoci. Jadrová elektráreň A1 bola unikátna svojim technickým riešením. Bola to koncepcia, ktorá sa v polovici 50-tych rokov zdala pre Československo optimálna. Mali sme svoje náleziská pomerne kvalitného uránu v jedenástich lokalitách – deväť z nich bolo v ČR a dve v SR. Pri tomto type elektrárne, kde bol palivom prírodný urán, nebola potrebná finančne i energeticky náročná technológia jeho obohacovania. Ďalší vývoj však ukázal, že tento typ reaktorov nemal nasledovníkov, aj keď elektráreň A2 už bola na rysovacích doskách a A3 v hlavách plánovačov.

Jadrová elektráreň A1 bola spustená v októbri 1972, kedy prvý krát prebehla riadená reťazová reakcia v reaktore. I keď elektráreň bola nazvaná priemyselnou, veľa zariadení a dejov bolo dovtedy nevyskúšaných v prevádzkových podmienkach. Možno sa čitateľom bude zdať úroveň projektu, technické riešenie a postupy účastníkov naivné a nedokonalé, ale taká bola vtedy úroveň poznania a účastníci venovali tomuto dielu všetky svoje sily. Určite nie je vhodné posudzovať všetko zo súčasného hľadiska a nekriticky hodnotiť konanie pionierov jadrovej energetiky v bývalom Československu. Neboli k dispozícii dnes bežné prostriedky výpočtovej techniky, ale pri podrobnom študovaní dokumentov zistíte, že sa nezanedbalo nič dôležité pre bezpečnosť. Málo skúseností o vlastnostiach a prevádzke jadrovej elektrárne ľudia často nahrádzali veľkou obetavosťou, oddanosťou a snahou bezpečne riešiť problémy. Naučili sa pristupovať k elektrárni s úctou a pokorou a na vlastných skúsenostiach sa

presvedčili, že nestačí niečo urobiť dobre, ale treba to urobiť bezchybne. Ak nie, potom príroda zdvihne svoj výstražný prst a pripomenie, že predsa len je silnejšia ako človek. Ako to výstižne vyjadril jeden z pracovníkov: „Elektrárni musíte vykať“.

Jadrová elektráreň odhalila množstvo technologických úskalí. Ukázalo sa napríklad, že parogenerátor s teplovýmennou plochou rúrkovnica v rúrke použitý v A1, vo svete známy a využívaný aj v konvenčných tepelných elektrárňach, nie je vhodný pre jadrovú technológiu. Na A1 použité konkrétne riešenie si vyžiadalo obrovské nároky na kvalitu a dĺžku zvarov. Aj zanedbateľné percento klasicky nezistiteľných mikroskopických defektov zvaru ako potencionálnych neskorších netesností rozhrania medzi teplonosným médiom CO_2 na primárnej strane a chladiacim médiom – vodou na sekundárnej strane malo za následok búrlivý rozvoj mikroskopickej netesnosti. Miešaním CO_2 a vody vzniklo agresívne korózne prostredie, korodujúce železný materiál parogenerátorov. V ďalšom programe konštrukcie sekundárnej strany jadrových blokov sa kombinácia „CO_2-voda-železo“ vyskytovalo už len výnimočne.

Jazyk i obsah knihy je výrazne technický. Mnohé grafy z minulosti, vytvorené i popísané len rukou, sú väčšinou kópie originálnych obrázkov a dokumentujú vtedajší prístup k technike a rozhodovaniu. Argumentovalo sa technickými dátami, s ceruzkou a logaritmickým pravítkom v ruke, logickým zdôvodňovaním, ktoré širší tím zodpovedných pracovníkov musel pochopiť. Tu neplatil argument, že „tak mi to ukazuje počítač“. Pod informatikou sa v sedemdesiatych rokoch chápalo viac využívanie knižnice, archívu a diskusie s odborníkmi. Autori sú si vedomí, že bez znalostí určitých partií z reaktorovej fyziky sú uvedené grafy nezrozumiteľné. Ale kedysi to boli „povinné cviky“ od technikov až po riaditeľa.

Je na mieste spomenúť aj účasť sovietskych špecialistov z výskumných ústavov, z prevádzkovaných elektrární i z výrobných závodov. Ich neformálna a kolegiálna spolupráca s pracovníkmi československých organizácií a pracovníkmi elektrárne vytvorila široký priestor pre neskoršiu samostatnú prácu. Pri spúšťaní i počas prevádzky účinne a nezištne pomáhali svojimi radami a skúsenosťami. Viedli personál k zodpovednému prístupu k rozboru a riešeniu problémov v rámci pracovných skupín zostavených zo špecialistov pre jednotlivé oblasti.

Jadrová elektráreň A1 sa kedysi nazývala Atómová elektráreň A1. Až neskôr fyzici si presadili, že sa neštiepi atóm, ale len jeho jadro. Pre drvivú väčšinu ľudí je to stále len nepatrná zmena, od ktorej už uplynulo niekoľko desaťročí, ale dokumentuje skutočnosť, že i vďaka rozvíjajúcej

sa jadrovej energetike vzrastalo aj fyzikálne a technické povedomie nielen medzi obyvateľstvom, ale aj medzi jeho predstaviteľmi. Práve takéto „fyzikálne povedomie“ je nevyhnutné, aby ste sa mohli pri sporných debatách oprieť o všeobecne platné argumenty. Že kamene podľa gravitačného zákona padajú zhora nadol, že pri náraze sa podľa zákonov akcie a reakcie a zachovania energie odovzdáva energia, že rádioaktivita je fyzikálny jav a riadi sa rozpadovým zákonom... Tí, ktorí sa mali možnosť zúčastniť diskusií napríklad s rakúskymi protijadrovými aktivistami, poznajú ten pocit rozčarovania zo základných nevedomostí, ktorý mám na mysli.

Význam A1 je i v tom, že vytvárala pocit hrdosti. Budovatelia i prevádzkovatelia si mohli povedať: „Dokázali sme to, spustili sme to, vyrábame!“ Ten hlas sa šíril nielen oficiálnou cestou propagácie úspechov socializmu, ale aj medzi technikmi, ich rodinami i blízkymi. Fyzici, či technici boli autoritou, ktorí boli spoločnosťou oceňovaní a uznávaní. Dôvera a úcta bola podložená pozitívnou skúsenosťou.

Pri štúdiu archívnych materiálov sa zistilo, že o elektrárni A1 bolo napísaných množstvo oslavných a popularizačných článkov, ale len málo takých, kde by boli zachytené technické detaily. Možno to bolo dobou, obmedzeným spektrom vedecko-technických časopisov, určitým stupňom utajenia informácií, ktoré sa dnes už považujú za bežné. Následkom však bolo, že o konštrukcii a prevádzke tejto elektrárne vedel iba pomerne úzky počet ľudí.

Napísanie tejto knihy je možné chápať i ako splnenie určitého morálneho záväzku, ktorý pociťovali „poslední mohykáni“, ktorí na jadrovej elektrárni kedysi pracovali. Kniha nevznikla na „spoločenskú objednávku“, ani preto, aby sa predávala a priniesla zisk. Autori ju napísali, aby sa zachovali ich skúsenosti, vedomosti i omyly, bez ktorých sa žiaden pokrok nezaobíde. Uplynulo už tridsaťtri rokov od ukončenia prevádzky A1 a je zrejmé, že Slovensko plynom chladený a ťažkou vodou moderovaný energetický reaktor s neobohateným uránovým palivom stavať nebude. Napriek tomu považujeme za potrebné, aby sa ťažko získané a draho zaplatené skúsenosti zachovali. Parafrázovaním spartského kráľa Leonidasa, ktorý tušiac smrť seba i svojich spolubojovníkov dal do skaly pri Termopylách vyryť nápis: „Postoj pútnik a zvestuj, že sme vykonali to, čo zákony kázali nám“. Som hrdý na to, že autori sú dlhoročnými členmi Slovenskej Nukleárnej Spoločnosti (SNUS) a že sa nám napokon túto knihu, najmä vďaka neúnavnej práci Ing. Karola Feika, podarilo vydať.

Vladimír Slugeň - Predseda SNUS

2. UMIESTNENIE A HLAVNÉ CHARAKTERISTIKY ELEKTRÁRNE

Hlavné a pomocné objekty elektrárne boli na pozemku s veľkosťou 34,2 ha ležiacom na Trnavskej tabuli v nadmorskej výške od 167,5 do 180 m. Rovina mala sklon 0,6 % smerom na juhovýchod. Prevládajúci smer vetra bol severozápadný. Elektrická energia bola vyvedená do linky 073 EBO – Križovany.

Vlastná spotreba bola zabezpečená z linky 110 kV Trnava – Nové Mesto nad Váhom a z priamej linky z hydroelektrárne Madunice. Voda na technologické účely sa odoberala z hate v Drahovciach, pri nízkej hladine z prívodného kanála do hydroelektrárne v Maduniciach. Voda sa filtrovala v čerpacej a filtračnej stanici v Pečeňadoch.

Chladiaci plyn CO_2 sa dovážal do elektrárne v cisternách s objemom 40 m^3 po železnici. Pri predpokladaných únikoch plynu z primárneho okruhu mala byť spotreba jedna cisterna za šesť až sedem dní.

Palivo sa do elektrárne dovážalo vo forme uránových prútikov z výrobného závodu v ZSSR železnicou v špeciálnych obaloch. Palivové články sa z prútikov a konštrukčných materiálov montovali priamo v elektrárni, v dielni na to určenej. Predpokladaná spotreba pri prevádzke na nominálny výkon mala byť v závislosti na vyhorení 53 až 106 t/rok. Vyhorené palivo sa malo odvážať po dostatočnom vychladení v dlhodo-

bom sklade v špeciálnych vagónoch s tieneným kontajnerom do ZSSR.

Z elektrárne boli vypúšťané rádioaktívne látky. Rádioaktívne plyny, ktorých zdrojom boli úniky CO_2 z primárneho okruhu a z odsávania niektorých technologických zariadení, boli vedené do tzv. vymieracích plynojemov v plynovom hospodárstve. Po určitom čase pobytu v nich a po prefiltrovaní cez aerosólové filtre boli spolu so vzduchom z ventilačných systémov vypúšťané do atmosféry cez 100 m vysoký ventilačný komín. Aktivitu výpustí merali dozimetrické systémy.

Rádioaktívne vody boli vypúšťané do odpadového kanála z čistiacej stanice rádioaktívnych vôd po spracovaní destiláciou a po kontrole ich aktivity. V odpadovom kanáli sa zmiešavali s odpadovou vodou z chladiacich okruhov a z odluhov parogenerátorov.

Základné parametre elektrárne

Reaktor	Tlaková nádoba, heterogénny s tepelnými neutrónmi
Palivo	Prírodný kovový urán
Moderátor	D_2O
Chladivo	CO_2
Tepelný výkon	560 MW

Tlaková nádoba	Uhlíkatá perlitická oceľ s malým obsahom kobaltu
Vonkajší priemer	5 100 mm
Výška	20 100 mm
Menovitá hrúbka steny	150 mm
Maximálna hrúbka steny	600 mm
Pracovný tlak	6,5 MPa
Pracovná teplota	120 ÷ 150°C

Aktívna zóna	Valcová s bočným a čelnými reflektormi
Priemer	3 650 mm
Výška	4 000 mm
Bočný reflektor	420 mm D_2O
Mriežka	Štvorcová
Krok mreže	259,5 mm
Hmotnosť paliva	23,1 t
Merný tepelný výkon	22,8 kW/t uránu
Stredné vyhorenie paliva	2 800 MW/t
Hmotnosť moderátora	57,2 t

Počet technologických kanálov	148
Počet havarijných tyčí	4
Počet regulačných tyčí	4
Počet kompenzačných tyčí	32
Prietok D_2O cez reaktor	930 t/h
Teplota D_2O na vstupe do reaktora	do 40°C
Teplota D_2O na výstupe z reaktora	max. 90°C
Prietok plynu	1 576 kg/s
Rýchlosť plynu	maximálne 60 m/s
Stredný tok neutrónov	1 189 x 10^{14} n/cm^2.s
Maximálny tok neutrónov	2,598 x 10^{14} n/cm^2.s
Zásoba reaktivity na jódovú jamu	1,6 %
Zásoba reaktivity na vyhorenie	1,6 %

Palivový článok	Prútikový s rebrovaným pokrytím
Priemer prútika	6,3 mm
Dĺžka prútika	4 000 mm
Pokrytie	Mg – Be, hrúbka 0,5 mm
Počet prútikov v článku centrálnej zóny	75
Počet prútikov v článku periférnej zóny	63
Vonkajší priemer palivového článku	102 a 110 mm
Teplota pokrytia prútika	Maximálne 500°C
Stredné vyhorenie paliva	2 800 MW/t

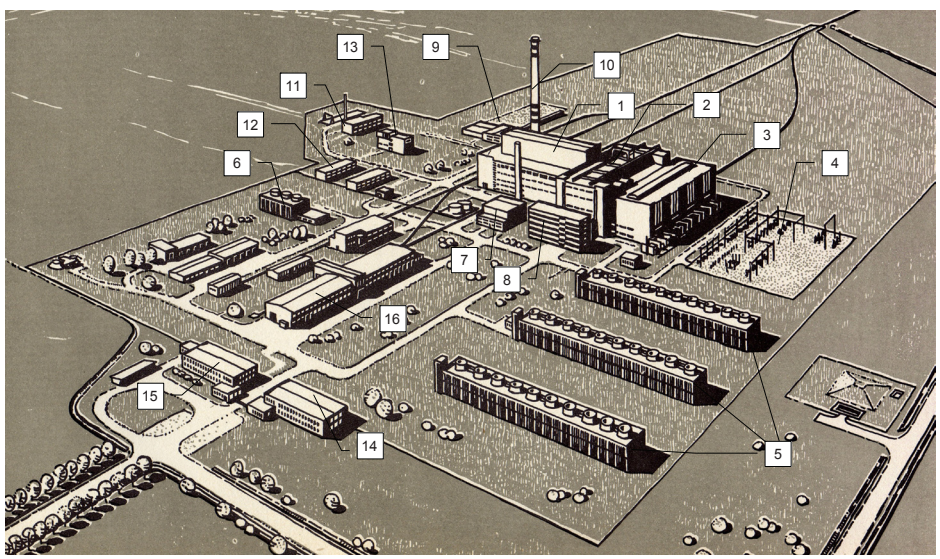
Primárny okruh	6 chladiacich cirkulačných slučiek
Počet cirkulačných potrubí	12
Počet cirkulačných turbokompresorov	6
Priemer potrubia	521x16 mm
Stredný tlak	6,5 MPa
Tlak na vstupe do reaktora	6,5 MPa
Tlak na výstupe z reaktora	5,54 MPa
Teplota CO_2 na vstupe do reaktora	112°C
Teplota CO_2 na výstupe z reaktora	426°C
Prietok plynu jednou slučkou	1 000 t/h
Celkový prietok plynu	6 x 1 000 t/h

Turbokompresory	6 ks
Otáčky turbokompresora	3 000 ot/min
Tlak CO_2 v turbokompresore na vstupe	5,32 MPa
Tlak CO_2 v turbokompresore na výstupe	6,57 MPa
Tlakový spád na turbokompresore	1,25 MPa

Parogenerátory	6
Prietok CO_2	6 x 1 000 t/h
Teplota CO_2 na vstupe	425°C
Teplota CO_2 na výstupe	97°C
Teplota strednotlakovej pary	410
Tlak strednotlakovej pary	3,15 MPa
Množstvo strednotlakovej pary	6 x 86 t/h
Teplota nízkotlakovej pary	185°C
Tlak nízkotlakovej pary	220 kPa
Množstvo nízkotlakovej pary	6 x 36 t/h

Turbogenerátory	3
Množstvo strednotlakovej pary	172 t/h
Tlak strednotlakovej pary	2,9 max. 3,15 MPa
Teplota strednotlakovej pary	390 max. 415°C
Množstvo nízkotlakovej pary	71,2 t/h
Tlak nízkotlakovej pary	220 kPa
Teplota nízkotlakovej pary	180 max. 200°C
Otáčky	3 000 /min
Elektrický výkon generátora	3 x 50 MW
Účinník	0,8
Výstupné napätie	10,5 kV

Areál elektrárne A1



***Legenda** – 1. reaktorovňa, 2. medzistrojovňa, 3. strojovňa, 4. rozvodňa, 5. ventilátorové chladiace veže sekundáru, 6. ventilátorové chladiace veže primáru, 7. pomocná kotolňa, 8. prevádzková budova, 9. plynové hospodárstvo, 10. ventilačný komín, 11. úložisko rádioaktívnych odpadov, 12. chemická úprava vody , 13. spracovanie kvapalných rádioaktívnych odpadov, 14. zdravotnícke stredisko, 15. administratívna budova, 16. dielne a sklady.*

Všeobecný popis elektrárne

Jadrová elektráreň A1 bola kondenzačného typu s inštalovaným elektrickým výkonom 150 MW. Tri turbogenerátory, každý s výkonom 50 MW dodávali elektrinu do siete 220 kV.

Zdrojom tepla bol jadrový reaktor typovým označením KS150, ktorý používal ako palivo neobohatený kovový urán. Moderátorom bola ťažká voda D_2O.

Teplo odvádzal oxid uhličitý CO_2 pod tlakom 6,5 MPa cirkulujúci v šiestich slučkách. V každej cirkulačnej slučke bol jeden turbokompresor, parogenerátor a uzatváracie – sekčné – armatúry po jednej na horúcej a chladnej vetve slučky. Zaujímavosťou bolo, že studený plyn vstupoval do reaktora zhora, horúci vystupoval zdola a viedol do hornej časti parogenerátorov, teda tvarovo bol cirkulačný okruh osmička.

S okruhom chladiaceho plynu boli spojené pomocné okruhy na udržiavanie požadovanej kvality CO_2.

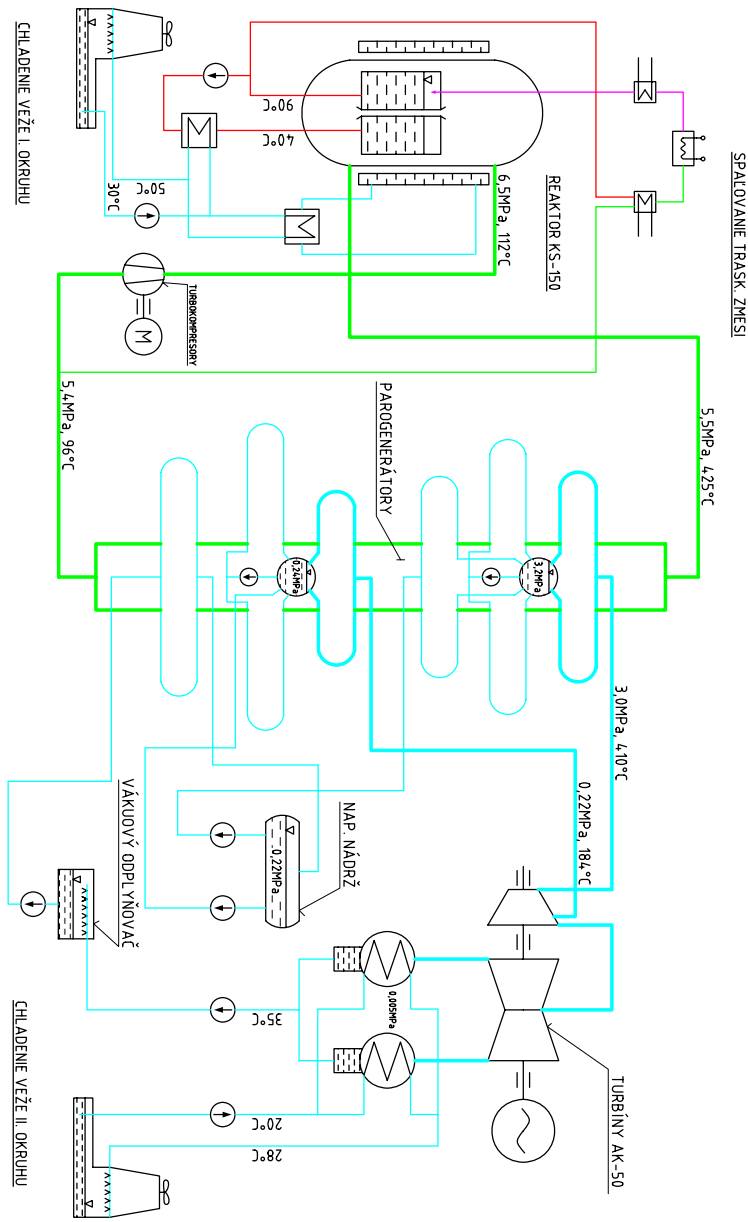
Nízko a strednotlaková para z parogenerátorov bola vedená na turbíny. Para z turbín bola ochladzovaná cirkulačnou chladiacou vodou prechádzajúcou cez ventilátorové chladiace veže sekundárneho okruhu.

Usporiadanie bolo trojblokové – každý blok mal dva parogenerátory, dva turbokompresory a jeden blok ventilátorových chladiacich veží.

V elektrárni bolo použitých veľa zariadení, ktoré boli prvý raz vyrobené a použité špeciálne pre takýto typ reaktora – tlaková nádoba reaktora, turbokompresory, avialová nádoba, palivové články, zavážací stroj a iné.

Na konštrukcii, výrobe a skúškach základných technologických zariadení sa zúčastnili mnohé závody. V Československu boli vyrobené tieto zariadenia: tlaková nádoba reaktora, zavážací stroj, turbokompresory, parogenerátory, základné potrubie, výmenníky tepla a nádrže primárneho okruhu, elektrotechnické systémy, systémy merania a regulácie a konštrukčné časti palivových článkov.

V ZSSR boli vyrobené a dodané: ťažká voda, palivové prútiky, časti vyrobené zo zirkónia, bezupchávkové čerpadlá D_2O, elektronická a elektrická časť systému riadenia a ochrán reaktora, prístroje a zariadenia pre dozimetrickú kontrolu a systémy a prístroje pre kontrolu tesnosti pokrytia palivových prútikov.



Principiálna technologická schéma elektrárne A1

Legenda

1 Kryt šachty reaktora

2 Železobetónové biologické tienenie

3 Vodná biologická ochrana

4 Veko tlakovej nádoby reaktora

5 Valcová tlaková nádoba reaktora

6 Podperná konštrukcia nádoby reaktora

7 Horná biologická ochrana vo vnútri nádoby

8 Stredná biologická ochrana vo vnútri nádoby

9 Dolná biologická ochrana vo vnútri nádoby

10 Grafitové tienenie nosnej dosky

11 Nádoba s ťažkou vodou – aktívna zóna

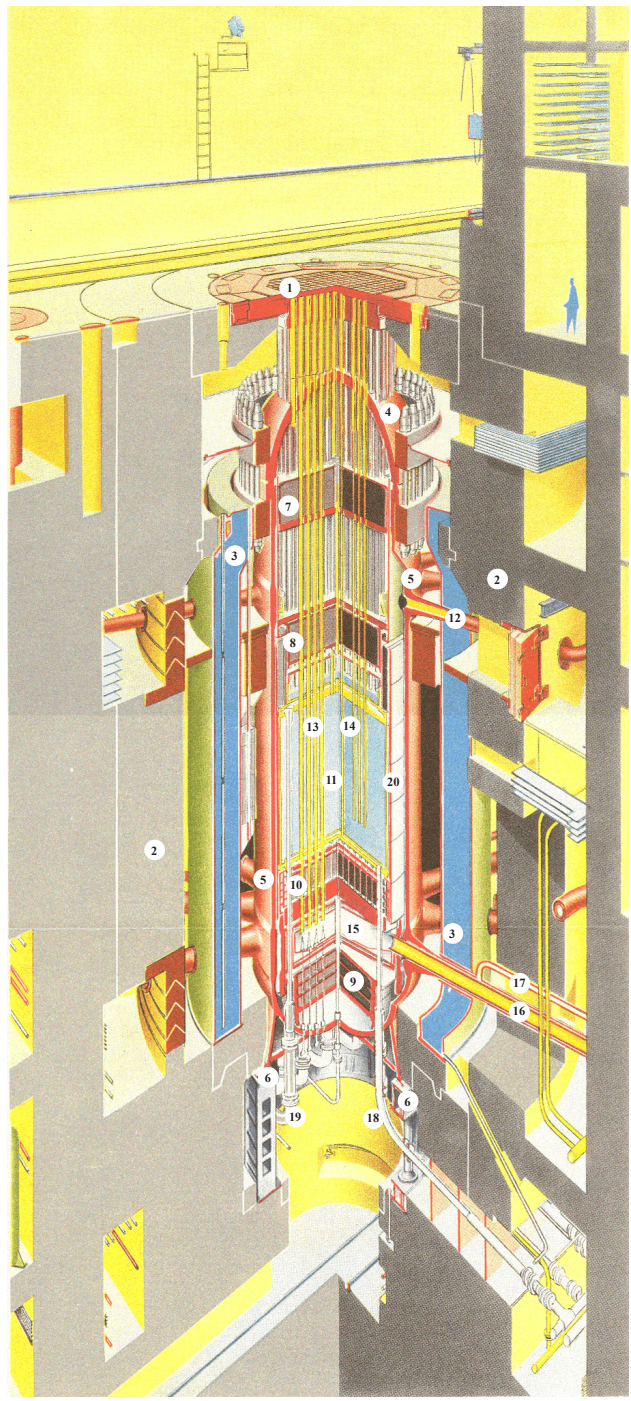
12 Vstupné potrubie chladného CO_2

13 Technologické kanály s palivovými článkami

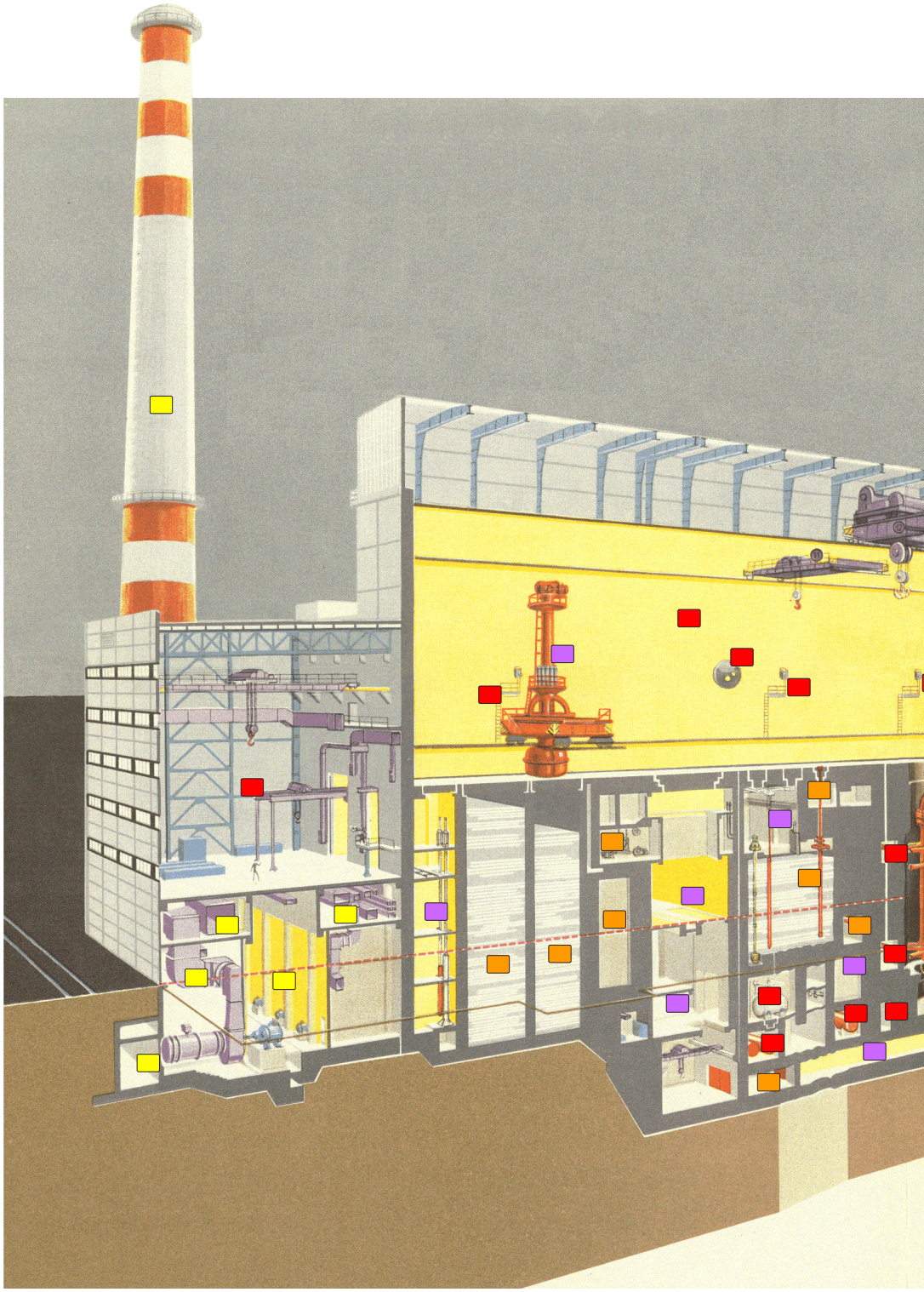
14 Riadiace a havarijné tyče

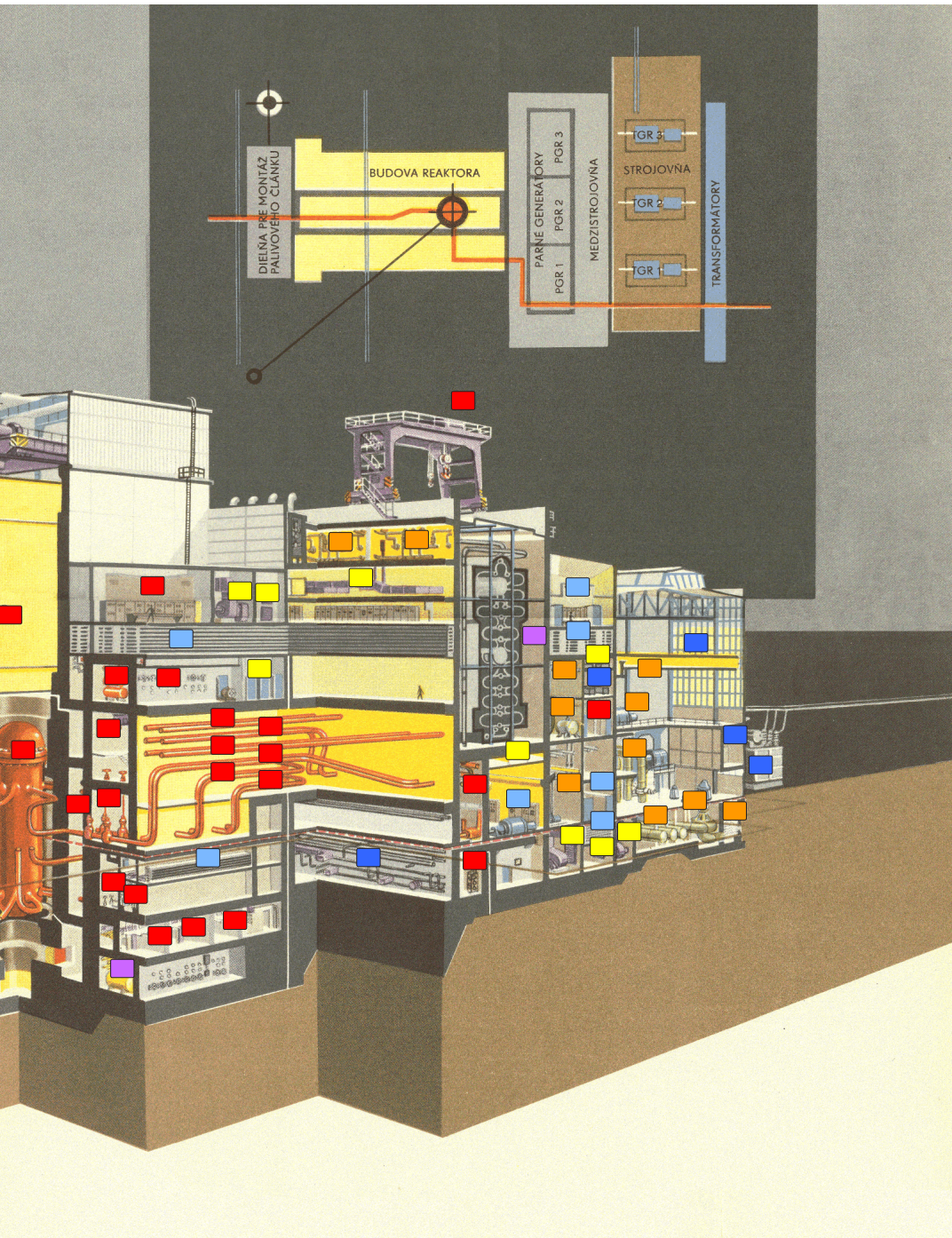
15 Komora horúceho CO_2

16 Výstupné potrubie horúceho CO_2



Pozdĺžny rez reaktorom





17 Vstup CO_2 na chladenie vnútorných častí

Legenda

k pozdĺžnemu rezu hlavným výrobným blokom

- Ventilačný komín
- Dielňa montáže palivových článkov
- Strojovňa špeciálnej ventilácie
- Vzduchový kanál
- Vzduchovody
- Reaktorová sála
- Zavážací stroj
- Miestnosť kompletovania palivových článkov
- Tieniace okno dozorne zavážacieho stroja
- Plošiny pre kamery priemyselnej televízie
- Špeciálny žeriav 5 t
- Žeriav 160 t
- Operátorovňa horúcej komory
- Vymieracia šachta horúcej komory
- Skladovacie šachty pre demontáž reaktora
- Priechod vlečky cez budovu reaktora
- Manipulačné priestory
- Ukladanie vyhoreného paliva do puzdier
- Bazén dlhodobého skladu vyhoreného paliva
- Manipulačný priestor nad bazénom
- Drenážne kolektory krátkodobého skladu
- Plynové hospodárstvo transportnej technológie
- Nádrže na D_2O
- Manipulačné nádrže horúcej komory
- Miestnosť na dekontamináciu
- Potrubný priestor hospodárstva D_2O
- Prístupová chodba k reaktoru
- Reaktor
- Priestor potrubia primárneho okruhu
- Sekčné armatúry primárneho okruhu
- Ovládanie sekčných armatúr
- Potrubie chladného CO_2
- Potrubie horúceho CO_2
- Kontrola tesnosti pokrytia paliva
- Zariadenie na dekontamináciu
- Potrubný priestor
- Káblový priestor
- Experimentálna slučka
- Dozimetrická dozorňa
- Káblový priestor
- Strojovňa ventilácie
- Parogenerátory
- Vzduchovody vetrania boxov parogenerátorov
- Poistné ventily
- Portálový žeriav 32 t
- Napájacie nádrže
- Napájacie čerpadlá
- Potrubný priestor sekundárneho okruhu
- Ústredná dozorňa
- Káblový priestor
- Vzduchový kanál
- Akumulátorová batéria
- Dozimetrická kontrola parogenerátorov
- Rozvodňa vlastnej spotreby 6 kV
- Káblové priestory
- Elektromotory turbokompresorov
- Obehový turbokompresor
- Olejové hospodárstvo turbokompresorov
- Potrubný priestor
- Priestor vzduchovodov
- Prívodný vzduchový kanál
- Strojovňa vzduchotechniky
- Strojovňa

3. HISTÓRIA BUDOVANIA JADROVEJ ELEKTRÁRNE V ČESKOSLOVENSKU

Počas 1. päťročného plánu asi stovka odborníkov vypracovala dokument „Generálny plán rozvoja energetiky“, vtedy nazvaný GE 60. Tento plán bol v roku 1954 konzultovaný v ZSSR a po doplnení technických a kapacitných možností strojárskeho priemyslu sa stal základom pre 2. päťročný plán na r. 1956 – 1960.

Už na začiatku roku 1955 bolo jasné, že napriek programu rozvoja uhoľných revírov budú energetické zdroje Československa vyčerpané počas niekoľkých päťročníc. Problémom bolo aj nevýhodné rozmiestnenie hlavných zdrojov v oblasti Mostu a Sokolova.

Hlavným výsledkom práce odborníkov na GE 60 a porád so sovietskymi odborníkmi bol návrh, aby sa uhoľné elektrárne budovali mimo tieto oblasti a tak by sa znížil diaľkový prenos vedeniami VVN.

Na objasnenie situácie: na rozhraní 1. a 2. päťročnice boli uvedené do prevádzky elektrárne Hodonín 100 MW, Nováky 128 MW a Třebovice 100 MW, zatiaľ čo v mosteckej oblasti pracovali iba elektrárne Ervěnice a Komořany. Podľa odporúčaní skupiny GE 60 boli postavené elektrárne Opatovice 300 MW, Mělník I – 300 MW a Tisová I – 200 MW.

Celková výroba elektriny v ČSR bola v roku 1950 necelých 10 TWh, v roku 1955 vzrástla na 15 TWh a v roku 1960 na takmer 25 TWh. Až intenzívna výstavba veľkoelektrární s blokmi 110 MW umožnila výrobu 36 TWh v roku 1965 a takmer 50 TWh v roku 1970.

V skupine GE 60 sa v roku 1954 prvý raz diskutovalo aj o možnosti budovať atómové elektrárne, ale vzhľadom na vtedajšie poznanie sa o nej ďalej nehovorilo.

Čoskoro po uvedení prvej priemyslovej atómovej elektrárne v Obninsku (ZSSR) v júni 1954 do prevádzky sa však situácia zmenila. Sovietska vláda oslovila všetky štáty sveta heslom „Atómy pre mier“ a ponúkla pomoc ľudovo – demokratickým štátom pri výskume a využití jadrovej energie. Následne bola 25. apríla 1955 podpísaná medzivládna dohoda ZSSR a ČSR, ktorej hlavnou náplňou bola výstavba Ústavu jadrového výskumu v Řeži u Prahy.

V čase rokovaní o pomoci Sovietskeho zväzu bolo veľmi málo informácií o atómových elektrárňach. Prvý seriózny popis jadrovej elektrárne bol v referáte sovietskej strany uverejnenom na I. ženevskej konferencii o mierovom využívaní jadrovej energie v lete 1955. Preto v rámci programu pomoci československá strana ako prvá zahraničná

delegácia navštívila atómovú elektráreň v Obninsku. Pri tejto návšteve sa diskutovalo aj o možnosti získania projektu elektrárne slúžiacej na prípravu odborníkov. Sovietska strana neodporučila opakovať projekt Obninska, ani inak ho použiť.

I. konferencia OSN o mierovom využívaní jadrovej energie na jeseň v roku 1955 prebiehala v znamení plánov na výstavbu jadrových elektrární a táto myšlienka sa preniesla i do úvah o riešení energetických problémov v ČSR z hľadiska veľkosti zdrojov a ich rozmiestnenia.

Tesne pred touto konferenciou prišla veľkorysá ponuka ZSSR, ktorá umožňovala nielen postaviť elektráreň, ale aj budovať jadrový priemysel. Sovietska strana bola ochotná pomôcť Československu pri výstavbe elektrárne s výkonom 50 až 100 MW na prírodný urán s ťažkovodným moderátorom a súčasne pri rozvoji potrebných oblastí priemyslu i pri výchove odborníkov.

Rozvoj mierového využívania jadrovej energie v ČSR riadil vtedy Vládny výbor pre atómovú energiu vedený podpredsedom vlády. Významné postavenie vo výbore mal minister energetiky. Na odporúčanie výboru sa pripravovali konzultácie a rokovania o ponúknutej pomoci.

Rokovanie bolo v Moskve na začiatku roku 1956. Sovietska strana predložila podklady iba pre jeden typ reaktora a elektrárne v podstate zhodné s neskôr vybudovanou elektrárňou A1. Varianty boli iba v tom, či má mať reaktor tlakovú nádobu alebo tlakové kanály. Boli predložené celkové rezy reaktora, základné schémy a náčrty hlavného zariadenia, konštrukcia palivového článku a výpočet aktívnej zóny. Diskusia sa sústredila na voľbu nádoby reaktora. Kritérium pre výber bolo v podstate jednoduché: oceľ bola tradičný československý materiál, preto mal priemysel šancu zvládnuť výrobu tlakovej nádoby. Naproti tomu variant s tlakovými kanálmi, vtedy zo zliatiny hliníka, bol problémový bez ohľadu na horšie fyzikálne charakteristiky reaktora. Československá delegácia, ktorá bola dosť reprezentatívna pre rôzne odbory si iba overila, či je možné v Kunčiciach vykovať prstence s potrebnými rozmermi. Prijala variant s tlakovou nádobou a odporučila vrcholným orgánom ČSR začať prípravu výstavby. Vhodnosť pôvodnej sovietskej koncepcie potvrdzovalo aj to, že sa viac alebo menej upravená objavila v programoch viacerých vyspelých krajín ako Francúzsko, Švédsko, Kanada, Anglicko a Švajčiarsko. Československá strana sa rozhodla, že výkon elektrárne by nemal byť menší ako 100 MW, pričom rozhodujúcim kritériom boli dosiahnuteľné rozmery tlakovej nádoby reaktora.

Pri výbere typu elektrárne boli zohľadnené tieto hľadiská:

- Možnosť použiť prírodný urán ako najľahšie dosiahnuteľné palivo, ktoré sa prípadne dá získať v rámci československej ekonomiky.
- Možnosť použiť palivo v kovovej forme, ktorá je najvhodnejšia z hľadiska reaktorovej fyziky i z hľadiska konštrukčného.
- Možnosť použiť palivové články v podobe tenkých tyčí, ktoré sú po celej výške aktívnej zóny celistvé s minimálnym množstvom balastných látok. Tyče mali byť usporiadané v zavesenom zväzku a obmývané zhora dolu.
- Možnosť použiť pokrytie palivových prútikov z berýlium-horčíkovej zliatiny, ktorá je v predpokladanom rozsahu teplôt plastická, má vysokú odolnosť proti korózii a odolnosť proti difúzii štiepnych produktov z paliva do chladiva.
- Možnosť použiť CO_2 ako chladivo s minimálnou koróznou agresivitou (okrem hélia). Má veľkú radiačnú stabilitu, bol dostatočne lacný, dal sa vyrobiť v požadovanej čistote a umožňoval použiť nízkolegované materiály na výrobu hlavných technologických zariadení.
- Možnosť použiť D_2O ako fyzikálne najlepší moderátor, ktorý umožňuje v kombinácii s prírodným uránom dosiahnuť vysokú zásobu reaktivity.
- Špecifickou vlastnosťou ťažkej vody je možnosť dosiahnuť najvyšší plutóniový koeficient na tepelných neutrónoch.
- Vysoká tvorba plutónia spolu s veľkou počiatočnou zásobou reaktivity umožňovala dosiahnuť vysoké vyhorenie paliva už v prvom cykle a teda najväčší výťažok energie na spotrebovaný urán.
- V prírodnom uráne po vysokom vyhorení v reaktore s ťažkou vodou zostáva veľký obsah plutónia. Umožňovalo to ekonomicky výhodne ho separovať a vytvárať zásoby napríklad pre základnú náplň pre rýchle reaktory.
- Celá táto kombinácia pri tlaku CO_2 okolo 6 MPa umožňovala stavbu blokov s výkonom 500 až 1 000 MW, s veľmi lacným palivovým cyklom a optimálnou ekonomikou pri individuálnej výmene jednotlivých palivových článkov pri prevádzke.

V marci 1956 bola podpísaná medzivládna dohoda a v júli a auguste toho istého roka začali prvé skupiny československých projektantov a konštruktérov spoločne so sovietskymi odborníkmi v Leningrade spracovávať podklady. Na základe týchto podkladov bola v septembri 1956 schválená investičná úloha.

Úloha výstavby prvej československej jadrovej elektrárne však zďaleka neskončila v roku 1956. Základné parametre a zámer sa neskôr nezmenili, ale bolo sa treba neustále k nim vracať. Pri projekčnom riešení sa začali objavovať miesta, ktoré na úrovni vedomostí v rokoch 1955 až 1956 neboli docenené.

Medzivládna dohoda sa pôvodne netýkala výskumu a vývoja, ale v roku 1957 bol pri spoločnej expertíze dohodnutý zoznam hlavných experimentov sovietskej strany na overenie technického projektu. Preto aj spracovanie technického projektu trvalo oveľa dlhšie, ako sa predpokladalo.

Náročnosť základných experimentov, ako napríklad fyzikálny model aktívnej zóny a overenie palivových článkov na veľkej reaktorovej slučke, spôsobila pochybnosti o ich skorom uskutočnení. Preto sa schválenie úvodného projektu zdržalo do októbra 1957. Súčasne Československá akadémia vied dostala úlohu zriadiť z popredných členov akadémie a odborníkov komisie pre rozhodujúce problémy zámeru. Diskusia v komisiách bola určitým spôsobom opakovaním voľby typu reaktora a zdôvodnenia všetkých základných parametrov. Predchádzajúce rozhodnutia boli obhájené i v týchto komisiách. Okrem toho bol dohodnutý zoznam výskumných a vývojových prác, najmä pre spracovanie vykonávacieho projektu a výrobu zariadení. Jednotlivé komisie, v ktorých bolo viac ako sto československých a niekoľko desiatok sovietskych odborníkov, sa stali poradcami a oponentmi prác a boli základom pre expertné komisie na prerokovanie technického projektu.

Je celkom pochopiteľné, že elektráreň A1 ako prvá jadrová elektráreň v ČSR, narážala nielen na konzervativizmus v myslení, ale aj na vážne technicko – ekonomické problémy, pretože priemysel nebol pripravený na jej výstavbu. Ukázali sa určité pochybnosti o plynnom chladive CO_2, o D_2O ako moderátore a tiež o palivovom článku. Všetky tieto pochybnosti viedli k nerozhodnosti pri výrobe zariadení a pri výstavbe. Až v roku 1963 sa uznesením vlády rozhodlo o naplánovaní úloh pre dodávateľov a súčasne boli pre nich vytvárané podmienky.

Projektová príprava JE A1

Technický projekt

Práce na úvodnom a technickom projekte JE A1 prebiehali v rokoch 1956 – 1960 v leningradskom projektovom ústave LOTEP (Leningradskoe otdelenie teploelektroprojekta), s aktívnou účasťou projektantov Energoprojektu Praha a špecialistov niektorých československých závodov a ústavov.

Prvá skupina projektantov Energoprojektu nastúpila do LOTEP-u v r. 1956. Zúčastnila sa na riešení úvodného projektu, ktorý bol začiatkom roku 1957 v Energoprojekte doplnený podľa československých predpisov o rozpočtové údaje a následne predložený na schválenie. Skupina československých špecialistov bola potom v ZSSR postupne rozšírená a pracovala na technickom projekte. Projekt tzv. neaktívnych pomocných objektov spracoval Energoprojekt doma, podľa zadania autora projektu LOTEP. Československí špecialisti sa okrem toho bezprostredne zúčastňovali na spracovaní dokumentácie hlavného výrobného bloku a príslušných objektov. Tak ako postupovali práce na neštandardnom zariadení reaktora, jeho pomocných okruhoch, komponentoch primárneho okruhu a iných, bol technický projekt postupne korigovaný.

V roku 1960 sa korekcia technického projektu v ZSSR skončila a projekčné práce boli prenesené v plnom rozsahu do ČSR. Energoprojekt doplnil na základe záväzných podkladov od československých dodávateľov korigovaný technický projekt na tzv. československý technický projekt. Jeho posledná časť bola dokončená a odovzdaná v roku 1962.

Dodatky technického projektu

V priebehu prác, ešte pred dokončením československého technického projektu, bolo už zrejmé, že práce na technickom projekte neskončia. Dodatky technického projektu bolo treba spracovať prakticky vo všetkých profesiách. Príčin bolo viac. Tak rozsiahly projekt, s takým počtom neštandardných zariadení, neobvyklými nárokmi na vzájomné väzby medzi jednotlivými profesiami, neobvyklými pracovnými médiami (CO_2, D_2O a iné) a novým technologickým procesom bol v ČSR spracovaný vôbec prvý raz. Naviac zvolený typ reaktora nedovoľoval použiť žiadne zahraničné skúsenosti.

Ďalšie úpravy projektu boli spôsobené snahou po čiastočnom znížení investičných nákladov. Projektant vypracoval viacero dodatočných návrhov, ktoré umožnili efektívnejší spôsob výstavby bez toho, aby bola

zmenená koncepcia schválená československo – sovietskou medzištátnou expertízou.

Príčiny nutnosti spracovať dodatky technického projektu však boli i v inej oblasti. Postupné ukončovanie vývoja neštandardného zariadenia v budovaných vedecko – výskumných základniach československého priemyslu vyústilo do spracovania dodatkov technického projektu, dodatkov vykonávacích projektov vždy vtedy, ak vznikla významnejšia nezhoda medzi predpokladmi založenými v technickom projekte a dosiahnutými výsledkami.

Po dodatočne ukončenom vývoji boli spracované dodatky technického projektu pre okruhy čistenia CO_2, spaľovania traskavej zmesi, doplňovania D_2O, destilácie a vymrazovania D_2O, filtrácie CO_2 pre chladiaci systém riadiacich tyčí reaktora a iné. Každý dodatok bol spracovaný v úzkej spolupráci s dodávateľmi a ich budovanými vedecko – výskumnými základňami. Pritom sa využívali aj výsledky československých výskumných pracovísk (Československá akadémia vied, Ústav jadrového výskumu, Výskumný ústav energetický – pobočka J. Bohunice, Štátny výskumný ústav stavebných strojov a ďalších), pokiaľ boli k dispozícii.

Vypracované dodatky boli vždy prerokované a schválené pôvodným autorom projektu, alebo so sovietskym vedeckým vedením. V zásade každý dodatok rešpektoval základnú koncepciu schválenú v r. 1960. Rôzne snahy projektanta na vylepšenie koncepcie elektrárne neboli prijaté pre pokročilú výstavbu, ale boli zachytené v projekte predpokladaných ďalších elektrární A2 a A3.

Vykonávacie projekty

Vykonávacie projekty technologickej časti zabezpečovali jednotliví dodávatelia koordinovaní projektovou skupinou generálneho dodávateľa technológie ŠKODA – ZVJE. Generálny projektant spracovával vykonávacie stavebné projekty, pretože stavebný dodávateľ Hydrostav, n.p. nevedel vypracovať projekty takej zložitej a náročnej stavby.

Ťažiskom prác bol hlavný výrobný blok, v ktorom boli hlavné technologické zariadenie elektrárne s centrálnou časťou, budovou reaktora. Riešenie stavby muselo okrem iného spĺňať požiadavku na zamedzenie šírenia prípadne uvoľnených aktivít do priestorov elektrárne a tiež mimo objektu elektrárne.

Autorský dozor generálneho projektanta

Pri výstavbe elektrárne A1 bol na stavenisku autorský dozor generálneho projektanta v čase od 1.7.1960 do 31.12.1972. Rozsah jeho činnosti bol po celú dobu výstavby – v porovnaní s inými elektrárňami – značne väčší. Zvláštnosti elektrárne A1 násobili nároky na prácu autorského dozoru, ktorý bol v mnohých prípadoch posledným článkom generálneho projektanta, zabezpečujúcim operatívne rôzne zmeny a doplnky dokumentácie priamo na stavbe a na pracoviskách dodávateľov technologickej i stavebnej časti – u stavbyvedúcich a montážnikov mnohých profesií.

Zásadná zmena koncepcie zaistenia bezpečnosti

Všetky činnosti smerujúce k vybudovaniu JE A1 boli podriadené základnej úlohe – dodržať schválenú koncepciu z roku 1960 a tak prispieť k čo najrýchlejšej, ale i bezpečnej realizácii. Tejto úlohe bolo tiež podriadené všestranné zabezpečovanie dostatočnej spoľahlivosti jednotlivých komponentov elektrárne A1 ako celku. Priebežne od počiatočného riešenia elektrárne ako celku sa robili úpravy projektu podľa stavu vývoja a výskumu jednotlivých komponentov postupným potvrdením či nepotvrdením skôr prijatých predpokladov. V priebehu takéhoto riešenia potom často vznikala otázka, čím merať a ako hodnotiť nezhody medzi zvolenými predpokladmi a dosiahnutými výsledkami pri obmedzeniach, ktoré boli dané úrovňou vedeckých znalostí, dostupných technických prostriedkov, veľkosťou finančných a materiálnych prostriedkov a harmonogramami výstavby.

V Československu neboli v tom období kvantitatívne požiadavky, ani kritériá na spoľahlivosť energetických reaktorov alebo jadrových elektrární, hoci v zahraničí už bola značne prepracovaná teória spoľahlivosti a jej aplikácia v jadrových elektrárňach. Za takých podmienok je pochopiteľné, že určenie ďalšieho postupu sa neobišlo bez váhania, nerozhodnosti a obáv z konečného výsledku – prevádzkyschopnosti elektrárne.

V poslednom období realizácie už bolo možné sústrediť pozornosť na riešenie zostávajúcich „nezhôd“ medzi predpokladmi, ktoré boli vložené do koncepcie projektu a dosiahnutými výsledkami. V časti elektrickej schémy prevádzkovateľ od začiatku pochyboval o vhodnosti technického projektu na dosiahnutie spoľahlivosti vlastnej spotreby, ktorá bola jednou zo základných podmienok spoľahlivého dochladzovania reaktora. Nebolo možné preukázať ani spoľahlivosť už namontovaných, ale neoživených

a neudržovaných automatík nulového vypínania a ďalších prvkov. Naopak, čím viac sa blížilo spustenie elektrárne, tým viac narastali obavy.

Vznikla zásadná otázka, akým spôsobom za danej situácie zvýšiť spoľahlivosť dochladzovania reaktora, bez zásadného narušenia už dokončených celkov, ale predovšetkým bez neprípustného predĺženia termínov realizácie.

Pre jadrové elektrárne a teda aj pre A1 bolo potrebné okrem iného riešiť aj spoľahlivé normálne dochladzovanie, t.j. stav, v ktorom je po páde havarijných tyčí zachované napätie pre vlastnú spotrebu zo základných zdrojov elektrickej energie a pre havarijné dochladzovanie.

Koncepcia založená pôvodným autorom projektu LOTEP do technického projektu sa pri skúškach ukázala ako nedostatočná s nevyhovujúcou spoľahlivosťou týchto dôležitých funkcií:

1. elektrického napájania systémov ochrán reaktora,
2. zabezpečenia elektrického napájania spotrebičov II. kategórie prerušovanou elektrickou energiou 0,4 kV, 50 Hz ,
3. zabezpečenia elektrického napájania spotrebičov I. kategórie,
4. dobehu turbogenerátora, automatík nulového vypínania zabezpečujúcich odľahčenie (vypnutie nepotrebných spotrebičov) vlastnej spotreby a spoľahlivosť regulačných orgánov pre automatické obmedzenie prietoku CO_2 cez aktívnu zónu po zásahu havarijnej ochrany reaktora, čím sa mal zmierniť tepelný ráz,
5. automatického záskoku hydrocentrály Madunice – zabezpečenie automatického autonómneho režimu jedného vyčleneného predvoleného hydrogenerátora pre napájanie jedného synchrónneho motora.

V priebehu záverečných prác na stavbe a pri analýzach schémy prevádzkovým personálom sa však ukázalo, že funkcie v bodoch 1, 3 a 5 nevyhovovali požiadavkám. Získané skúsenosti, výsledky registračných meraní, mimoriadne opatrenia a zapojenie najlepších technických kádrov z projekcie, ale hlavne budúcej prevádzky vytvorili podmienky pre to, aby Energoprojekt mohol spracovať návrh komplexných úprav s cieľom dosiahnuť potrebnú úroveň spoľahlivosti dochladzovania reaktora. Návrh bol vypracovaný v spolupráci s pôvodným autorom projektu LOTEP, s domácimi dodávateľmi (predovšetkým Škoda – ZVJE, ČKD Praha, Sigma n.p., IBZKG) a s pracovníkmi prevádzky EBO.

Podstata tohto návrhu spočívala:

1. Vo zvýšení spoľahlivosti pomocou tzv. systému superhavarijného dochladzovania. V prípade úplného rozpadu energetickej siete, strate vlastnej spotreby v elektrárni A1 a zlyhaní trvale prevádzkovaných Maduníc, t.j. pri zlyhaní systému havarijného dochladzovania by sa použil systém superhavarijného dochladzovania – ďalšieho zdroja elektrického napájania, ktorým by boli dva trvale prevádzkované dieselgenerátory zo štyroch inštalovaných v existujúcej dieselgenerátorovej stanici so súčasným maximálnym obmedzením počtu spotrebičov pripojených na vlastnú spotrebu, ako aj s dostatočným časovým rozložením záťaže na dieselgenerátorovú stanicu. Týmto riešením sa podarilo úplne vylúčiť nutnosť pôsobenia pôvodných automatík havarijného dochladzovania.

2. V trvalej prevádzke dvoch turbokompresorov na 600 ot/min pomocou pomocných motorov (pony-motorov), napájaných z dieselgenerátorovej stanice. Počet turbokompresorov pre dochladzovanie pri 3 000 ot/min bol zvýšený z jedného na dva s tým, že pre dochladenie reaktora by stačil jeden turbokompresor.

3. V zrušení automatických zásahov regulačných orgánov na obmedzenie prietoku CO_2 cez aktívnu zónu reaktora. Dôvodom pre zrušenie boli výsledky výpočtov očakávaných tepelných rázov pri páde havarijných tyčí a analýza možných pulzácii pri parametroch I. a II. etapy energetického spúšťania.

Zmeny boli najmä v elektrickom rozvode elektrárne, kde sa museli rešpektovať predovšetkým dôsledky použitia nového nezávislého zdroja v režime so systémom superhavarijného dochladzovania. Z uvedených faktov je zrejmé, že týmto sa principiálne zmenilo pôvodné projekčné riešenie v dobe, keď sa už skončila montáž zariadenia.

V dňoch 19. a 20.12.1972 úspešne skončili komplexné skúšky po úpravách, vrátane systému superhavarijného dochladzovania. Tieto skúšky boli úspešné a tak sa potvrdila správnosť vloženej filozofie, projekčného riešenia a kvalita montážnych prác.

Jadrová energetika v roku 1972 vo svete

Obdobie päťdesiatych a hlavne šesťdesiatych rokov 20. storočia bolo charakterizované veľkým záujmom o nefosílne zdroje energie a te-

da aj nárastom vývoja a výstavby jadrových zdrojov elektrickej energie (jadrové zariadenia s armádnym zameraním nie sú komentované). Platilo to v krajinách s rozvinutým strojárskym priemyslom ako napríklad USA, ZSSR, UK, Francúzsko, Japonsko. K týmto krajinám sa pripojili aj ďalšie ako Taliansko, Belgicko, Kanada, a tiež krajiny patriace do hospodárskeho „východného“ zoskupenia „Rada vzájomnej hospodárskej pomoci“ (RVHP). Do RVHP patrilo aj Československo, ako priemyselne vyspelá krajina s tradíciou výroby komponentov klasických elektrární a komplikovaných strojárskych a chemických zariadení.

Vedúce postavenie v RVHP mal ZSSR a v rámci medzinárodnej spolupráce bol Československu prisúdený vývoj plynom chladeného ťažkovodného reaktora s palivom prírodný urán.

Samostatný podnik Atómové elektrárne Bohunice bol založený v máji 1957. Predtým, 26. júna 1954 bola k sieti pripojená vo svete prvá jadrová elektráreň v Obninsku v ZSSR, s reaktorom typu LWGR, (chladenie ľahkou vodou, moderátor grafit). Nasledovalo spustenie Calder Hall 1 vo Veľkej Británii dňa 27.08.1956 (typ GCR MAGNOX – plynom chladený reaktor s grafitovým moderátorom), a JE Shippingport v USA dňa 02.12.1957 (typu PWR – tlakovodný rektor).

V čase krátko po spustení A1, na konci roku 1972 bolo vo svete v prevádzke 113 reaktorov, s celkovým elektrickým výkonom 32 975 MW. Ich počet v najrozvinutejších krajinách je v tabuľke.

Krajina	Počet reaktorov	Elektrický výkon [MW]	Prevažujúci typ reaktora
Kanada	6	2 053	PHWR „CANDU“
Francúzsko	10	2 672	GCR [a)]
Nemecko	9	2 211	BWR, PWR
Japonsko	6	1 815	BWR, PWR
ZSSR	7	1 599	PWR, LWGR
Anglicko	29	5 067	GCR
USA	28	13 586	BWR, PWR

K 31.12.1972 bolo vo výstavbe 140 reaktorov, s celkovým elektrickým výkonom 100 130 MW. Ich počet v najrozvinutejších krajinách je v tabuľke.

Krajina	Počet reaktorov	Elektrický výkon [MW]	Prevažujúci typ reaktora
Kanada	5	3 546	PHWR „CANDU“
Francúzsko	4	2 913	GCR [a)]
Nemecko	13	8 923 [b)]	PWR, BWR
Japonsko	12	8492	PWR, BWR
Rusko (ZSSR)	10	4 201	LWGR, PWR
Anglicko	11	6 393	GCR,
USA	58	51 703	PWR, BWR

Poznámky

Z pohľadu dobudovanej a spustenej elektrárne A1, z elektrární v prevádzke k 31.12.1972 sú zaujímavé dva bloky, ktoré okrem A1 boli jediné typu HWGCR:

a) Francúzska elektráreň EL4, pripojená k sieti 09.07.1967, výkon 75 MWe, neskôr odstavená.

b) Nemecká elektráreň Niederaichbach, budovaná od r. 1966, pripojená k sieti 01.01.1973, odstavená z prevádzky 21.07.1974.

O týchto blokoch, „príbuzných“ našej A1, boli k dispozícii len všeobecné informácie; nebola možnosť spolupráce, výmeny skúseností z výstavby ani z prevádzky.

Do 31.12.1972 bolo už z predchádzajúcej prevádzky definitívne vyradených desať reaktorov s celkovým elektrickým výkonom 315 MWe.

4. KOMPLEXNÉ SKÚŠKY ATÓMOVEJ ELEKTRÁRNE A1

Komplexné skúšky základného zariadenia A1 začali v decembri 1970 po skončení individuálnych skúšok turbokompresorov. Ich cieľom bolo overiť očakávané hydraulické vlastnosti primárneho okruhu, tesnosť plynového a ťažkovodného okruhu, dlhodobú spoľahlivosť turbokompresorov, funkcie pomocných okruhov reaktora a tiež overiť všetky dôležité projektom predpokladané technologické postupy a prevádzkové stavy, napríklad ohrev tlakovej nádoby reaktora, pripojovanie studenej slučky primárneho okruhu k vyhriatemu reaktoru a ďalšie.

Po havárii upchávkového olejového systému turbokompresora č.1 v máji 1971 pokračovali komplexné skúšky až do začiatku augusta, kedy boli prerušené. Analýza havárie, pri ktorej vniklo do primárneho okruhu asi 700 kg oleja, odhalila vážnu nespoľahlivosť upchávkového systému.

Pri kontrole konštrukčných uzlov primárneho okruhu a reaktora, ktoré sa urobili po prerušení komplexných skúšok, sa prejavili poruchy, vyžadujúce úpravy a rekonštrukcie. Jednou z najzávažnejších chýb bolo praskanie pružín uzatváracích rúrok technologických kanálov (únavové lomy spôsobené vysokocyklickou únavou) a praskanie rúrok technologických kanálov v oblasti vstupných okien, spôsobené koncentráciou napätia v prechodových častiach. Potrebné úpravy, rekonštrukcie časti uzlov a odmastenie primárneho okruhu sa urobili v období od augusta 1971 do mája 1972.

Na odmastenie primárneho okruhu sa posúdili a vyskúšali rôzne možnosti suchou i mokrou cestou. Po vyhodnotení výsledkov účinnosti procesu sa zvolilo odmasťovanie slučiek primárneho okruhu mokrou cestou ohriatym saponátovým vodným roztokom. Reaktor sa týmto spôsobom nečistil, pretože sa pochybovalo o účinnosti navrhovaného spôsobu bez možnosti cirkulácie roztoku, ale hlavne z obavy pred zavlhčením grafitových blokov tvoriacich technologické a biologické ochrany reaktora. Mokrou cestou sa odmastil len ťažkovodný okruh, do ktorého olej vnikol cez trasy prefukovania priestoru nad hladinou v ťažkovodnej nádobe.

Vyberateľné časti (technologické kanály, absorpčné tyče a ostatné) sa odmastili mimo reaktora, prístupné miesta reaktora sa vytreli a podľa možnosti vydrenážovali. Pretože sa ukázalo, že aj grafitové časti sú čiastočne „zamastené“, urobili sa ožarovacie skúšky olejom nasiaknutého reaktorového grafitu v reaktore ÚJV Řež. Výsledky ukázali, že nehrozí nebezpečenstvo jeho poškodenia vplyvom zdechtovania neodpariteľných

zložiek oleja. Grafitové bloky sa nakoniec neodmasťovali, pretože proces by si vyžadoval veľmi zložitú technológiu. S cieľom vypudiť maximálne možné množstvo oleja z grafitu bol reaktor viacnásobne vákuovaný a následne zdrenážovaný.

Do konca mája 1972 sa rekonštruovali upchávky turbokompresorov a potom sa urobili individuálne skúšky spoľahlivosti turbokompresorov, pri ktorých sa potvrdila vhodnosť úpravy olejového prevádzkového upchávkového systému turbokompresorov.

V rámci úprav na zariadení bol v tomto období od primárneho a ťažkovodného okruhu oddelený systém dekontaminácie. Dôvodom oddelenia bola netesnosť zdvojených armatúr a následné tlakovanie dekontaminačných systémov únikmi z primárneho okruhu.

V rámci čiastkových skúšok sa preverovali aj zariadenia pomocných objektov (plynového hospodárstva, čerpacej stanice chladiacej vody, systému chladiacej vody, vzduchotechnických systémov a iných). Pre všetky skúšky boli vypracované a schválené programy. Výsledky skúšok boli podrobne uvedené v hodnotiacej správe.

Druhá fáza komplexných skúšok základného zariadenia začala 1.6.1972 ako posledná overovacia skúška pred energetickým spúšťaním. V tejto fáze komplexných skúšok sa okrem overenia spoľahlivosti jednotlivých zariadení, najmä na imitáciu bežných a poruchových prevádzkových stavov celého komplexu elektrárne, dával dôraz na overenie hydraulických charakteristík primárneho okruhu a jednotlivých okruhov chladenia vnútorných častí reaktora vrátane ich predbežného nastavenia, na štúdium chemického režimu primárneho a ťažkovodného okruhu, zisťovanie a odstraňovanie únikov z plynového i ťažkovodného okruhu, na previerky prevádzkových výmen palivových kompletov zavážacím strojom, na overenie práce pomocných okruhov reaktora a nakoniec na previerky systému merania a systému ochrán a riadenia reaktora.

Značná časť skúšok sa venovala overeniu funkcie elektrickej schémy navrhovanej pre I. etapu energetického spúšťania. Bolo to vlastne odskúšanie JE A1 „v komplexe“.

Počas komplexných skúšok sa do reaktora zaviezli makety palivových článkov, čiastočne odporové (na imitáciu tlakového spádu na aktívnej zóne) a váhové, určené na overovacie skúšky výmeny palivových komponentov zavážacím strojom. Ťažkovodný okruh bol zaplnený demineralizovanou vodou a primárny okruh bol zaplnený CO_2.

Tesnosť plynového a ťažkovodného okruhu

Na zisťovanie tesnosti plynového a ťažkovodného okruhu boli vypracované špeciálne metodiky na vyhľadanie, ohodnotenie, odstránenie a obmedzenie najväčších neorganizovaných, organizovaných i drobných únikov a na bilanciu CO_2 a D_2O.

Vyhľadanie veľkých únikov nebolo problémom preto, lebo veľké úniky CO_2 boli viditeľné, alebo sa vyskytli mimo miest hlučnej prevádzky a boli počuteľné. Úniky z ťažkovodného okruhu boli viditeľné vo forme kvapiek. Takýchto únikov bolo nájdených málo – tri na ťažkovodnom a jedenásť na plynovom okruhu na prírubových spojoch odberov.

Na zisťovanie malých únikov CO_2 sa vypracovali metodiky, ktorých základom boli skúsenosti z vyhľadávania netesností na francúzskych plynových reaktoroch. Malých únikov na plynovom okruhu sa zistilo viac ako sto.

Ďalšie úniky sa hľadali na miestach potenciálnych únikov. Týmto spôsobom sa podarilo nájsť a odstrániť 61 % neorganizovaných únikov a znížiť ich na 168 kg/h pri nominálnych tlakových podmienkach. Pri parametroch zodpovedajúcich tlakovým parametrom I. etapy sa neorganizované úniky dokonca nedali zaregistrovať.

V rámci týchto aktivít sa podrobne preverovali aj signalizačné systémy prítomnosti D_2O v nádržiach kanalizácie.

Predbežné ladenie prietokov CO_2 jednotlivými chladiacimi okruhmi reaktora

Základným problémom bolo správne nastavenie vzdúvacích klapiek na vstupe CO_2 do reaktora, vzhľadom na nedokonalú indikáciu ich polohy. Poloha vzdúvacích klapiek bola určená metódou hľadania minima tlakového spádu na vzdúvacích klapkách, ktorému bola prisúdená nulová (horizontálna) poloha vzdúvacích klapiek. Tlakový spád CO_2 bol potrebný na zabezpečenie prietoku cez chladiace trasy vnútorných častí reaktora.

Poloha vzdúvacích klapiek sa nastavila na výpočtové prietoky, pričom sa ukázalo, že v porovnaní s výpočtami sú všetky okruhy mierne predimenzované. Prietok chladiva na chladenie motorov tyčí systému ochrán a riadenia reaktora tak bol obmedzujúcim a pri nastavovaní veľkosti vzdutia sa stačilo riadiť minimálnym prietokom do kolektoru systému ochrán a riadenia reaktora. Chladenie ostatných vnútorných častí sa pri takto nastavenom vzdutí mohlo doladiť.

Práca zavážacieho stroja, výmena palivových kompletov

Výmena palivového kompletu (makety) sa simulovala na štyroch vybraných kanáloch. Urobilo sa dvadsať cyklov výmen váhových makiet a päťdesiat cyklov výmen mechanických filtrov zavezených do ôsmich technologických kanálov na sledovanie obsahu mechanických nečistôt v chladive.

Pri práci zavážacieho stroja na reaktore sa na technologických kanáloch vyskytli niektoré chyby, ktoré si vyžiadali krátkodobé prerušenie komplexných skúšok a dokonca vypustenie CO_2 z reaktora. Príčinou bolo zadieranie skrutkovača technologického kanála (dvakrát) a zadretie makety palivového článku v technologickom kanáli. Príčiny boli objasnené a poruchy boli odstránené.

Chemický režim primárneho okruhu

Plynový okruh

Po mokrom odmasťovaní zostal primárny okruh značne zavlhčený, čo sa prejavilo na kvalite CO_2 v okruhu. Počas komplexných skúšok sa však okruh vplyvom kondenzácie vlhkosti v systéme spaľovania traskavej zmesi postupne vysušoval. Pôvodná vlhkosť CO_2 1 000 ppm sa sušením zmenšila na 400 ppm. Na overenie vierohodnosti metodík merania vlhkosti používaných v A1 a bilanciu z nameraných hodnôt bola počas určitej doby komplexných skúšok zlievaná voda z kondenzátorov systému spaľovania traskavej zmesi. Tieto bilancie ukázali zhodu len pri meraní metódou orosenia zrkadielka (priame meranie teploty rosného bodu). Ostatné vo svete používané metódy vykazovali značné odchýlky.

Na sledovanie mechanických nečistôt v primárnom okruhu boli do ôsmich technologických kanálov zavezené špeciálne filtre. Na základe výpočtov zo zachyteného množstva mechanických nečistôt a prietokov filtrami bol zistený merný obsah mechanických nečistôt a aj časový vplyv filtrácie na merný obsah mechanických nečistôt v CO_2. Na začiatku filtrácie bol merný obsah od 80 – 500 mg/t CO_2, na konci komplexných skúšok 9 – 17 mg/t CO_2. Meraním v skondenzovanej vlhkosti v kondenzátoroch systému spaľovania traskavej zmesi na počiatku filtrácie sa zistilo 40 – 90 mg/t CO_2 mechanických nečistôt. Uvedené hodnoty boli potvrdené aj inými metódami merania.

Obsah oleja v CO_2 sa sústavne sledoval na satí a výtlaku turbokompresorov a nebol počas komplexných skúšok väčší ako 5 ppm. Okrem

uvedených všeobecne používaných metodík sa špeciálne overoval prienik oleja do primárneho okruhu cez upchávkový systém turbokompresorov. Výsledky boli získané poradiačným vyhodnocovaním vzoriek CO_2 po predchádzajúcom nadávkovaní india do vysokotlakého oleja turbokompresoru. Prienik oleja do okruhu sa nezistil. Zamastenie vnútorného povrchu primárneho okruhu bolo kontrolované aj otermi.

Po druhej fáze komplexných skúšok bol priemerný obsah oleja stanovený na 1 m^2 plochy 410 mg/m^2. Porovnávaním hodnôt spred skúškami bolo možné konštatovať správnu funkciu upchávkového systému.

Ťažkovodný okruh

Okruh bol zaplnený demineralizovanou vodou z chemickej úpravy vody so známym chemickým zložením. Počas komplexných skúšok boli denne odoberané a analyzované vzorky z horúceho kolektora a cirkulačného čerpadla. Bolo zistené, že korózia nerezových častí ťažkovodného okruhu je zanedbateľná a korózia avialu (z počiatku komplexných skúšok) nízka. V druhej polovici komplexných skúšok obsah hliníka vzrástol až na hodnoty 10 ppm, čo bolo zaregistrované aj snímačmi korózie avialu (ku koncu skúšok rýchlosť korózie narástla až na 0,3 mm/rok). Na koncentráciu hliníka vo vode podstatne vplývala práca ťažkovodnej destilačnej stanice.

Vzhľadom na neúplné odmastenie vnútorných častí reaktora sa očakávalo aj objavenie sa oleja v ťažkovodnom okruhu. Olej sa objavil s priemernou koncentráciou iba 2 mg/l. Pre overenie jeho možného hromadenia na hladine vody v avialovej nádobe boli počas jednej odstávky zliate horné vrstvy vody cez horúci kolektor až do úrovne prepadových rúr. Ďalšie zlievanie horných vrstiev sa urobilo pomalým doplňovaním demineralizovanej vody do studeného kolektora a zlievaním toho istého množstva cez prepadové rúry. Namerané koncentrácie oleja v mnohých vzorkách neprevýšili maximálne hodnoty koncentrácií oleja vo vzorkách z kolektora, čo nasvedčovalo tomu, že nedochádzalo k hromadeniu oleja na hladine.

Obsah oleja bol meraný aj počas zlievania demineralizovanej vody z ťažkovodného okruhu po skončení komplexných skúšok. Priemerná koncentrácia oleja bola 3,1 mg/l, čo zodpovedalo približne 215 g oleja v celom ťažkovodnom okruhu.

Systém spaľovania traskavej zmesi

Komplexnými skúškami sa dokázalo, že úroveň vlhkosti v primárnom okruhu bude vyššia ako predpokladaná projektová vlhkosť a bude v nominálnych podmienkach približne 600 ppm. Zistilo sa tiež, že v kondenzátoroch systému spaľovania traskavej zmesi dochádza k intenzívnemu strhávaniu mechanických nečistôt a oleja. Uvažovalo sa so zavedením tohto kondenzátu do destilačnej stanice D_2O.

Kondenzačná očistka CO_2

V očistke CO_2 bola sústavne sledovaná účinnosť znižovania vlhkosti a odstraňovania oleja. Vplyv na znižovanie vlhkosti sa ukázal významným len v období vysokého zavlhčenia okruhu. Vplyv na odstraňovanie oleja sa pohyboval od 0 do 80 % v závislosti od spôsobu prevádzkovania.

Destilačná stanica D_2O

Destilačná stanica bola prevádzkovaná iba počas krátkej doby vlastných komplexných skúšok. Vykazovala 90 až 95 %, čistiaci efekt na hliník,, obdobne pre železo. Čistiaci efekt na olej bol veľmi malý.

Meranie hydraulických charakteristík primárneho okruhu

Cieľom merania hydraulických charakteristík primárneho okruhu bolo overiť výpočtové charakteristiky a zistiť vplyv práce jednotlivých turbokompresorov pri rôznych prevádzkových stavoch na prietokové pomery v príslušnej časti primárneho okruhu. Jednou zo závažných úloh bolo overiť nestabilitu spätných klapiek na výtlaku turbokompresorov. Z nestability boli obavy pri niektorých anomálnych prevádzkových stavoch. Experimentálne merania sa zamerali na zistenie:

1. maximálneho prípustného rozladenia regulačných lopatiek v saní jedného zo šiestich paralelne pracujúcich turbokompresorov z hľadiska nestability spätných klapiek,
2. maximálneho prípustného rozladenia by-passov jedného zo šiestich paralelne pracujúcich turbokompresorov z hľadiska nestability spätných klapiek,
3. vplyvu otvorenia by-passu jedného zo šiestich paralelne pracujúcich turbokompresorov na zmenu hydraulickej charakteristiky,

4. tlakových a prietokových pomerov pri rôznom počte pracujúcich turbokompresorov pri rovnakej plynovej náplni,

5. vplyvu pripojenia nepracujúcej slučky na prietoky chladiacimi okruhmi reaktora – vplyvu „skratovania“ kolektoru chladiaceho plynu a komory studeného plynu,

6. prietoku cez by-pass a reaktor pri jednom pracujúcom turbokompresore v závislosti na otvorení by-passu a polohe regulačných lopatiek,

7. „natekania“ do horúcej vetvy netesnosťami spätných klapiek turbokompresorov imitáciou režimu I. etapy energetického spúšťania (dva turbokompresory na 600 ot/min so zatvorenými spätnými klapkami).

Merania poukázali na určité odklony od výpočtových charakteristík, ktoré bolo potrebné zohľadniť v analýzach prevádzkových stavov a vložiť ich do prevádzkových predpisov.

Závažným poznatkom bolo, že rozladením regulačných lopatiek pri paralelnej spolupráci turbokompresorov nedochádza k žiadnej nestabilite spätných klapiek na výtlaku turbokompresorov a takisto maximálne rozladenie by-passov nemalo vplyv na stabilitu. K nestabilite dochádzalo až po superpozícií oboch efektov, pričom sa ukázalo, že spätné klapky nekmitajú tak ako sa predpokladalo, ale „plávajú“ mimo svojej hraničnej polohy. Pohyb plávania bol pomalý a nedochádzalo k nárazom na dosadacie plochy. Ďalej sa ukázalo, že by-passy turbokompresorov majú vplyv na prietokové pomery len pri otvorení regulačných posúvačov do 65 % v by-passe a že oblasť 65 až 100 % otvorenia je bez efektu. Charakteristika regulačných lopatiek zodpovedala charakteristikám zmeraným na skúšobných zariadeniach.

Významný vplyv skratovania kolektoru chladiaceho plynu s komorou studeného plynu sa prejavil pri pripojení nepracujúcej slučky k reaktoru. Skratovanie spôsobilo väčšie zníženie prietokov cez horné chladiace okruhy reaktora. Na spodných chladiacich okruhoch bol efekt malý, pretože tieto okruhy boli závislé od celkového tlakového spádu na reaktore.

Pri väčšom počte pracujúcich turbokompresorov sa prejavovalo zníženie tlakového spádu na vzdúvajúcich sa klapkách. Znížil sa aj prietok hornými chladiacimi okruhmi.

Imitácia prevádzky na parametroch I. etapy energetického spúšťania poslúžila na spracovanie prevádzkového predpisu pre I.etapu, na overenie veľkosti prietoku reaktorom od turbokompresorov pracujúcich na 600 ot/min, na nastavenie by-passov turbokompresorov pracujúcimi na 600 ot/min a na overenie reálnosti projektom predpokladaného režimu slučiek 2. bloku počas I.etapy energetického spúšťania pri práci turbokompresorov na 600 ot/min).

Z meraní hydraulických charakteristík primárneho okruhu vyplynul rad záverov pre prevádzku a pre spracovanie prevádzkových predpisov. Overila sa tiež technológia ohrevu slučiek primárneho okruhu. Na základe získaných výsledkov sa vypracovali odporúčania úprav turbokompresorov a plynového okruhu:

1. realizovať signalizáciu polôh spätných klapiek.
2. vymeniť stupnice indikátorov polôh regulačných lopatiek za presnejšie.
3. realizovať na by-passoch zarážku na 65 % a upraviť snímače polohy tak, aby existujúci rozsah 0-65 % zodpovedal novému rozsahu 0 -100 %.
4. venovať za prevádzky maximálnu pozornosť presnosti prenosu polôh by-passov a selzynov. pravidelne kontrolovať správnosť údajov selzynov.
5. vzhľadom k systému ovládania by-passov bolo možné aj 10 % rozladenie pri ich otváraní do určenej polohy a tým vyvolanie asymetrie v prúdení by-passmi. preto sa navrhlo separátne ovládanie na prípadné doladenie určenej polohy.
6. nainštalovať citlivejší prístroj pre registráciu nízkych tlakových spádov na zaistenie kontroly prietoku cez aktívnu zónu v prípade chladenia reaktora turbokompresormi pracujúcimi pri 600 ot/min.
7. inštalovať citlivejšie meranie prietokov na ich kontrolu cez jednotlivé slučky pre prípad, keď turbokompresory budú pracovať na 600 ot/min.
8. vyriešiť presnejší spôsob regulácie tlaku v primárnom okruhu vzhľadom na významné kolísanie prietoku primárnym okruhom pri kolísaní tlaku v saní o 2 – 2,5 kp/cm^2.

Sušenie primárneho okruhu JE A1

Reaktor a okruhy primárnej časti elektrárne A1 sa sušili s cieľom zmenšiť na minimum množstvo ľahkej vody, ktorá zostala v technologickom zariadení po komplexných skúškach. Sušenie zahŕňalo tieto okruhy elektrárne:

1. reaktor, plynové slučky (6x) so skúšobnými potrubiami,
2. slučky chladenia D_2O,
3. okruh čistenia CO_2 a systému spaľovania traskavej zmesi,
4. destilačnú stanicu a vymrazovače,
5. vysokotlakové nádrže a nízkotlakovú nádrž D_2O,
6. okruh doplňovania D_2O do reaktora,
7. okruh plnenia čistej D_2O,
8. odparovač - prehrievač skvapaľňovač s príslušnými trasami,
9. plynové hospodárstvo (objekt 28).

Na sušenie sa spracoval osobitný program, rešpektujúci konštrukčné a technologické zvláštnosti všetkých okruhov a uzlov.

Sušenie reaktora a slučiek primárneho okruhu

V priebehu komplexných skúšok bolo teleso reaktora, jeho konštrukčné časti a slučky primárneho okruhu nahriate na teplotu 100 ÷ 110°C.Vlhkosť plynu v okruhu sa postupne znižovala kondenzáciou na systéme spaľovania traskavej zmesi. Po skončení komplexných skúšok sa od reaktora oddelilo päť slučiek primárneho okruhu. Jedna zostala pracovať na postupné ochladzovanie reaktora. Z tohto vyčleneného okruhu sa súčasne vypúšťal plyn CO_2 cez havarijný kondenzátor. Po dosiahnutí tlaku 1 MPa a znížení teploty na 80 ^{0}C bol odstavený kompresor a následne i čerpadlo D_2O. Potom sa začala vypúšťať demineralizovaná voda z okruhu D_2O.

Pri tlaku plynu približne 0,5 MPa začali prefukovať impulzné potrubia. Na zabezpečenie sušenia reaktora a avialovej nádoby vákuovaním boli na horúcom a studenom kolektore po vypustení vody z okruhu D_2O navarené výustky Ø159 mm pre napojenie dvoch dvojstupňových vývev typu WDK860 s výkonom 860 m^3/h a do potrubí

v najnižších miestach sa privarili špeciálne drenážne zátky.

Slučky sa pri sušení vákuovali oddelene vývevami z objektu 28 do tlaku 50mm Hg. Reaktor a slučky primárneho okruhu sa sušili v troch cykloch. Každý cyklus trval päť až šesť dní a zahrňoval:

1. zaplnenie reaktora a slučiek suchým plynom (s vlhkosťou menšou ako 70 ppm) s tlakom 0,3 ÷ 0,5 MPa,
2. ohrev reaktora a slučiek na teplotu 70 ÷ 80°C kompresnou prácou turbokompresorov,
3. oddelenie reaktora od slučiek a vákuovanie vývevami v objekte 28 (slučky) a vývevami WDK 860 (reaktor). Teplota reaktora sa znižovala na 50 ÷ 60°C.

Pri každom cykle sa sledovala vlhkosť cirkulujúceho plynu. Pri poslednom cykle sa k reaktoru pripojili aj slučky chladenia D_2O a vákuovali sa cez dusíkové vymrazovače, aby sa vizuálne skontrolovalo tvorenie námrazy na povrchu vymrazovača pri vákuovaní okruhu.

Sušenie pomocných okruhov reaktora

Pomocné okruhy reaktora sa sušili podobným spôsobom. Plyn sa ohrieval elektrickými ohrievačmi, horúcou vodou a parou. Vlastné vákuovanie bolo cez dusíkové vymrazovače vývevami. Rozdelenie všetkých okruhov na samostatné systémy a stanovenie niekoľkých vákuovacích miest umožnilo vysušiť pomocné okruhy reaktora súčasne s reaktorom. Tým sa výrazne skrátila doba sušenia.

Suchosť okruhov sa zisťovala meraním teploty v niekoľkých miestach, ale najmä sledovaním tvorenia námrazy na povrchu dusíkových vymrazovačov a sledovaním zlievania kondenzátu z nich. Na pomocných okruhoch sa urobili štyri cykly sušenia; každý trval šesť až sedem dní.

Bezprostredne po sušení boli héliové skúšky tesnosti chladičov D_2O, chladičov a telies cirkulačných čerpadiel CENTV-134 a kondenzátorov destilačnej stanice pomocou héliového hľadača. Pri týchto skúškach sa dosiahlo vákuum v primárnom okruhu od 2 do 10^{-3} torr.

Po skončení sušenia sa všetky okruhy reaktora zaplnili CO_2 s vlhkosťou menšou ako 20 ppm.

Po zváračských prácach, ktoré nasledovali po sušení, sa musela urobiť tlaková skúška reaktora a jeho okruhov pri teplote do 80°C a tlaku do 5,4 MPa. Systém bol naplnený CO_2 s vlhkosťou do 70 ppm.

Počas celej tlakovej skúšky sa merala vlhkosť CO_2 v okruhu. Analýza opäť potvrdila, že pri teplotách plynu do 80°C systém neuvoľňuje vlhkosť.

Kvalita ťažkej vody sa pri plnení do okruhu nezhoršila. Zistilo sa to analýzou izotopického zloženia D_2O v jednotlivých úsekoch potrubí, v avialovej nádobe a v nádržiach po jej naliatí. Analýzy sa robili hneď po naliatí a po úplnom zaplnení okruhu alebo nádrže.

Degradácia koncentrácie D_2O, ktorá sa zistila najmä v priebehu energetického spúšťania, bola spôsobovaná stopovými nečistotami v CO_2, ktorý dodával výrobca na doplňovanie chladiaceho okruhu elektrárne na kompenzáciu únikov. Aj napriek tomu, že na čistotu dodávaného CO_2 boli dohodnuté najprísnejšie podmienky na úrovni hraničných možností vtedajšieho dodávateľa, stopové množstvá H_2, H_2O a ďalšie nečistoty obsahujúce ľahký vodík mali za následok pomalé, ale trvalé znižovanie koncentrácie ťažkej vody. Preto bolo treba zabezpečiť jej izotopické čistenie (bolo zakúpené zariadenie od fy Sulzer).

Sušenie plynového hospodárstva (objekt 28)

V súvislosti s haváriou turbokompresorov pri komplexných skúškach a následným premývaním primárneho okruhu bol reálny predpoklad, že do plynojemov plynového hospodárstva preniklo väčšie množstvo ľahkej vody, oleja a odmasťovacích prostriedkov. Ohrev týchto plynojemov na vysušenie bol vylúčený, pretože tlakové nádoby boli pod zemou. Pri určovaní postupu na sušenie plynového hospodárstva sa rozhodlo vybudovať prielezy do plynojemov a vysušiť ich povrch vytieraním. Bolo to nutné najmä preto, lebo ich spádovanie bolo 3 mm/m a prakticky nebolo možné úplne ich vydrenážovať.

Po otvorení plynojemov sa potvrdila oprávnenosť prijatého riešenia. V plynojemoch boli mláky vody a oleja. Okrem spomínaných prielezov boli do najnižších úsekov potrubí zavarené drenážne zátky, ktorými sa počas sušenia niekoľkokrát drenážovali potrubné trasy aj technologické zariadenia.

V záverečnej časti sušenia sa potrubné trasy, plynojemy a ostatné zariadenia sa prefukovali suchým CO_2 s vlhkosťou menšou ako 50 ppm.

5. FYZIKÁLNE SPÚŠŤANIE

Príprava prevádzkového personálu

Na vedúce miesta v prevádzke sa vyberali pracovníci, ktorí mali skúsenosti s prevádzkou klasických elektrární a s ich uvádzaním do prevádzky. Až po úroveň operátorov reaktora absolvovali zaškolenie v bývalom ZSSR v dĺžke od troch do šesť mesiacov, po ktorom robili skúšku pred komisiou. Podľa výsledkov pri týchto skúškach a podľa praktických výsledkov pri zaškoľovaní v A1 sa obsadzovali funkcie zmenový inžinier, vedúci operátor a operátor reaktora. Operátori sekundárneho okruhu a operátori primárneho okruhu sa pripravovali priamo v A1, alebo v klasických elektrárňach.

Po začiatku zmenovej prevádzky zaškoľovanie svojich pracovníkov riadili zmenoví inžinieri. Na zdokonalenie vedomostí a zručností prispela účasť zmenových i denných pracovníkov na odmasťovaní, sušení a vyskúšaní elektrárne ako celku. Pred fyzikálnym spúšťaním boli všetci pracovníci znova odskúšaní z projektu fyzikálneho spúšťania a programu testov.

Riadiaci pracovníci boli znovu preskúšaní pred I. etapou energetického spúšťania komisiou, ktorej členmi boli aj sovietski experti.

Príprava legislatívy a dokumentácie pre fyzikálne a energetické spúšťanie

V čase uvádzania elektrárne A1 do prevádzky neexistovali vhodné legislatívne ani iné predpisy. V rámci prípravy fyzikálneho spúšťania československí a sovietski odborníci spolu s pracovníkmi dozorných orgánov vypracovali a schválili zoznam potrebnej dokumentácie a definovali jej obsah.

Pre I. etapu energetického spúšťania a ďalšie úseky spúšťania sa tento dokument doplnil a schválila ho Atómová komisia ČSR po prerokovaní v „Rade pre jadrovú bezpečnosť“. Pred vydaním súhlasu so začatím fyzikálneho spúšťania sa vypracovali takéto dokumenty:

1. protokoly (doklady) o pripravenosti základného zariadenia a všetkých systémov elektrárne; osobitne pred fyzikálnym a pred energetickým spustením,

2. limity a podmienky fyzikálneho spustenia reaktora KS150 s nasledovnými predpismi:
   - jadrová bezpečnosť reaktora KS150,
   - predpis pre zavážanie článkov do reaktora,
   - predpis na plnenie D_2O a manipulácie na okruhu D_2O,
   - predpis pre manipulácie s regulačnými tyčami v období fyzikálneho spúšťania,
   - predpisy všeobecnej a radiačnej bezpečnosti.
3. súhlas orgánov hygienického dozoru so začatím fyzikálneho a energetického spustenia elektrárne,
4. súhlas protipožiarnych orgánov ČSR so začatím fyzikálneho a energetického spustenia elektrárne,
5. súhlas inšpektora bezpečnosti práce s prevádzkou a s podmienkou dodržať príslušné predpisy na prevádzku zariadení,
6. závery o potrubiach a tlakových nádobách – vypracoval závod ŠKODA,
7. protokol o zdravotnej spôsobilosti personálu,
8. havarijný plán potvrdený príslušnými organizáciami,
9. protokoly o skúškach prevádzkového personálu

Fyzikálne spúšťanie

Prípravu a realizáciu experimentálneho programu fyzikálneho spúšťania JE A1 zabezpečovali štyri organizácie – špecialisti z bývalého ITEF (Institut teoretičeskoj i eksperimentalnoj fiziky) (ZSSR), ŠKODA, Ústavu jaderného výskumu Řež a pracovnici prevádzkovateľa elektrárne A1. Koncepcia spolupráce týchto organizácií pri fyzikálnom spúšťaní prototypového reaktora vychádzala z dohody o spolupráci bývalých ČSSR a ZSSR uzatvorenej v roku 1966 a podľa nej vedecké vedenie spúšťania zabezpečoval ITEF, koordináciu prípravy projektu fyzikálneho spúšťania zabezpečovala ŠKODA v spolupráci s ITEF, EBO a ÚJV Řež a práce počas fyzikálneho spúšťania koordinoval budúci prevádzkovateľ.

Obsahovú náplň programu experimentov tvorili experti ITEF-u, ktorí v bývalom ZSSR rozvíjali koncepciu ťažkovodných reaktorov. ITEF, ktorý bol autorom fyzikálneho výpočtu reaktora KS150, predložil už v roku 1962 prvú alternatívu programu experimentov fyzikálneho spúšťania. Vypracovanie projektu fyzikálneho spúšťania koordinovala ŠKODA. Projekt obsahoval aj metodiky a inštrukcie na vykonanie testov (experimentov) a v priebehu riešenia sa posudzoval na odborných expertízach v rokoch 1967 a 1968. Rešpektoval široký rozsah požiadaviek výrobcov a konštruktérov reaktora, výskumných inštitúcií a prevádzkovateľa. Preto v konečnom dôsledku harmonogram fyzikálneho spúšťania vyžadoval viac ako 120 dní. Takýto rozsah testov nebol akceptovateľný a v roku 1969 sa program podstatne zredukoval. Pri rozhodovaní o rozsahu experimentálnej náplne spúšťania sa zohľadnili potreby budúcej prevádzky, požiadavky na overenie konštrukcie a ochrán reaktora a priestor dostala aj realizácia neopakovateľných experimentov potvrdzujúcich fyzikálne výpočty reaktora. Redukovaný program fyzikálneho spúšťania vyžadoval tridsaťdva dní experimentálneho času.

Fyzikálne spúšťanie reaktora KS150 prebiehalo v októbri a v novembri 1972 (v dňoch 4.10.1972 až 21.11.1972).

Zavážanie reaktora

Zavážanie palivových kaziet do reaktora začalo 4. októbra 1972 o 19.30 hod. a skončilo sa o sedemdesiatsedem hodín. Počas prípravy na zavážanie sa vyskytlo viacero chýb, z ktorých vážnejšie boli tieto:

- jedna palivová kazeta sa nedala zasunúť do kanála, pretože bola v hornej časti krivá,
- zadrhávali sa pružiny a v dvoch prípadoch sa nedali zaskrutkovať matice kanála,
- šesť technologických kanálov bolo netesných,
- v ôsmich kazetách boli chybné termočlánky,
- v ôsmich tyčiach ∅ 36 mm boli chybné kompenzačné vodiče termočlánkov.

Uvedené chyby boli odstránené do začiatku fyzikálneho spúšťania. Po zavezení paliva do aktívnej zóny boli do reaktora zavezené aj špeciálne kanály, v ktorých boli detektory neutrónového toku s vyššou

Nalievanie ťažkej vody do okruhu D_2O z prepravných kanistrov

citlivosťou, ktorá sa vyžadovala pre testy na nulovom výkone. D_2O sa začala nalievať 19. októbra 1972 a 24. októbra 1972 o 01.26 hod. dosiahol reaktor kritický stav. Potom nasledovali podľa programu ďalšie testy fyzikálneho spúšťania. Základný program skončil 21. novembra 1972 a potom bolo niekoľko doplňujúcich testov rozšíreného programu fyzikálneho spúšťania.

Testy fyzikálneho spúšťania a niektoré základné výsledky

V programe fyzikálneho spúšťania A1 zostalo po niekoľkonásobnej korekcii zaradených celkom dvanásť experimentov*, z toho desať bolo

* V programoch fyzikálneho a energetického spúšťania sa používal pojem experiment pre jednotlivé skúšky a overovanie. Pojem vznikol z toho, že A1 bola prvou elektrárňou tohoto typu a projektové parametre sa overovali v praxi.

pri tzv. nízkej hladine ťažkej vody v aktívnej zóne reaktora.

Výsledky experimentov spravidla veľmi dobre súhlasili s teóriou. Ilustrujú to výsledky niektoré základných testov fyzikálneho spúšťania pri nízkej hladine D_2O v reaktore :

1. Určenie kritického objemu reaktora.

   Pre štandardnú náplň paliva sa kritický stav dosiahol pri hladine D_2O v aktívnej zóne 1 533 ± 5 mm, počítanej od spodných koncov palivových prútikov. Teplota D_2O pri tomto teste bola 35°C. Podľa výpočtov bola kritická hladina 1590 ± 50 mm.

2. Kalibrácia tyčí systému ochrán a riadenia reaktora.

   Váha (reaktivita) absorpčných tyčí sa zisťovala pomocou zmeny hladiny D_2O, pomocou periódy rozbehu reaktora, meraním podkritičnosti reaktora (bol používaný impulzný zdroj neutrónov) a prekompenzáciou. Pri meraniach reaktivity sa používal takýto nameraný hladinový koeficient reaktivity - $d\rho/dH = (1{,}09 \pm 0{,}03).10^{-3}$/cm nameraný pre kritickú hladinu D_2O v reaktore, kde ρ – je reaktivita a H – je výška aktívnej zóny.

   Podkritičnosť studeného reaktora bola 5,87 % pri nominálnej hladine D_2O v reaktore s kompenzačnými tyčami zasunutými do aktívnej zóny, t.j. reaktor bol spoľahlivo v podkritickom stave systémom ochrany a regulácie reaktora. Váha havarijných tyčí pri nominálnej hladine D_2O s kompenzačnými tyčami zasunutými do aktívnej zóny bola (2,4 ± 0,l) %.

3. Funkčné skúšky systému automatickej regulácie.

   Regulačný systém automatickej regulácie výkonu reaktora pracoval spoľahlivo pri projektových hodnotách prúdov ionizačných komôr. Systém zvládol predpísané skokové zmeny reaktivity, pričom prechodový režim sa blížil k optimálnemu.

4. Rozloženie neutrónového toku v aktívnej zóne.

   Rozloženie neutrónového toku po výške a polomere v čistom reaktore pri nízkej hladine D_2O sa meralo bez prítomnosti absorpčných tyčí.

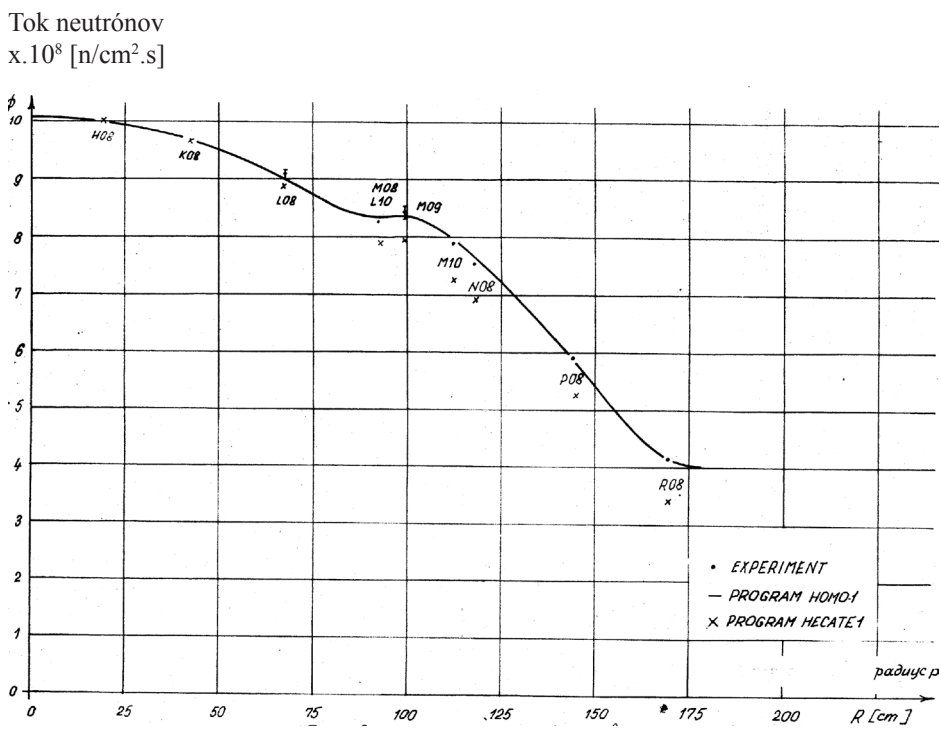
   Nameraný extrapolovaný prídavok ako príspevok dolného reflektora bol 20,3 ± 0,9 cm, celkový prídavok dolného a horného reflektora bol 24,0 ± 1,2 cm.

5. Počiatočný plutóniový koeficient a absorpcia neutrónov v ^{238}U.

   Nameraná hodnota počiatočného plutóniového koeficientu bola 0,831 (u kaziet s ∅112 mm) a 0,804 (u kaziet s ∅100 mm) meraná s chybou (2,5 - 3) %. Pomer počtu neutrónov zachytených jadrami ^{238}U v nadtepelnej a tepelnej oblasti bol 0,498 (u palivových článkov s 112 mm) a 0,432 (u palivových článkov s ∅100 mm).

6. Tok rýchlych neutrónov na steny tlakovej nádoby reaktora.

   Nameraná hodnota toku rýchlych neutrónov na tlakovú nádobu reaktora sa takmer zhodovala s vypočítanou. Presnosť merania sa odhadovala na 30 %.



Radiálne rozloženie hustoty toku rýchlych neutrónov pri fyzikálnom spúšťaní (9.11.1972)

Program experimentov v záverečnej fáze fyzikálneho spúšťania zameraný na kalibráciu regulačných a kompenzačných tyčí sa plnil pri tzv. „vysokej“ (nominálnej) hladine D_2O v aktívnej zóne. Výsledky týchto testov preukázali veľký vplyv absorpčných tyčí zasunutých do aktívnej zóny na celkový tvar rozloženia neutrónového toku po priemere aktívnej

zóny a to v závislosti od kombinácie absorpčných tyčí, ktoré sa použili na kompenzáciu prebytku reaktivity v reaktore. Zistila sa aj významná axiálna deformácia globálneho poľa neutrónového toku v dôsledku prítomnosti čiastkovo zasunutých absorpčných tyčí v aktívnej zóne (napríklad regulačných).

Závery programu fyzikálneho spúšťania a prijaté odporúčania:

V hodnotení fyzikálnych vlastností aktívnej zóny reaktora KS150 sa podľa výsledkov uskutočnených experimentov konštatovala:

- dobrá zhoda výpočtových a experimentálnych hodnôt fyzikálnych parametrov,
- dostatočná zásoba reaktivity studeného, neotráveného reaktora s čerstvým palivom na dosiahnutie projektového výkonu a projektového vyhorenia paliva (2 800 ÷ 3 000 MW/tU),
- vyhovujúca účinnosť tyčí havarijnej ochrany reaktora v zhode s projektom,
- vyhovujúca zásoba podkritičnosti reaktora so všetkými absorbentmi zasunutými v aktívnej zóne.

Ďalej sa overila funkčnosť systému ochrany a riadenia reaktora, ktorá bola (po malých úpravách zadávača úrovne výkonu a zosilňovača) v zhode s projektom. Účinnosť biologickej ochrany reaktora bola v zhode s projektom.

Tok rýchlych neutrónov na teleso tlakovej nádoby reaktora počas dvadsaťročnej projektovanej doby prevádzky na nominálnom výkone by neprevýšil hodnotu, ktorá by mohla spôsobiť neprijateľné zmeny mechanických vlastností ocele tlakovej nádoby reaktora.

Podľa výsledkov experimentov pri nominálnej hladine D_2O sa zistil veľký vplyv zasunutých absorpčných tyčí na rozloženie neutrónového toku v ich bezprostrednom okolí a tiež aj na celkové tvarovanie rozloženia neutrónového toku v aktívnej zóne.

Fyzikálne vlastnosti aktívnej zóny reaktora KS150 sa testovali a riešili aj pri energetických parametroch reaktora. V priebehu prvej etapy energetického spúšťania sa realizoval tzv. doplňujúci program fyzikálnych experimentov.

Hľadanie spôsobu optimálnej kompenzácie prebytku reaktivity kompenzačnými absorpčnými tyčami bolo predovšetkým záležitosťou programu energetického spúšťania.

Túto úlohu významne uľahčila možnosť merať výkony jednotlivých palivových kaziet v reaktore kalorimetricky.

Okrem vyššie uvedenej úlohy orientovanej na problematiku rozloženia neutrónového toku a výkonu v aktívnej zóne v rámci programu doplňujúcich experimentov sa meral teplotný koeficient reaktivity moderátora a absorpčných tyčí, otrava reaktora xenónom a samáriom, kalibrovali sa absorpčné tyče, zmeral sa vplyv prázdnych technologických kanálov na reaktivitu reaktora a napokon sa hodnotila aj zmena reaktivity v závislosti od znižovania izotopickej čistoty D_2O.

Po podrobnom vyhodnotení výsledkov fyzikálnych experimentov počas spúšťania sa spracovali tieto odporúčania:

1. Inštalovať do reaktora kompenzačné tyče systému ochrán a riadenia reaktora s absorbentom v dolnej časti tyče. Účelom bolo zlepšiť rozloženie neutrónového toku pozdĺž výšky a tak zvýšiť výrobu elektrickej energie pri danej teplote pokrytia palivových kaziet.

2. Urobiť testy s cieľom zmerať rozloženie neutrónového toku v horúcom otrávenom reaktore. Inštalovať do reaktora zariadenie, dovoľujúce nepretržite merať rozloženie neutrónového toku (teploty) pozdĺž výšky.

3. Nepretržite sledovať reaktivitu a vyhorenie v reaktore.

4. Zorganizovať skúšku pre prechod „jódovej jamy“ pri vysokých tepelných výkonoch reaktora. Spresniť výpočet tohto efektu.

5. Urobiť všetky opatrenia pre udržanie vysokej izotopickej čistoty D_2O v reaktore (neskôr bola inštalovaná kolóna Sulzer).

6. Sledovať integrálny tok rýchlych neutrónov na teleso reaktora.

V celkových záveroch spúšťania JE A1 sa konštatovalo, že program fyzikálnych experimentov v priebehu spúšťania elektrárne zahŕňal všetky podstatné náležitosti súvisiace s potrebami budúcej prevádzky tohto prototypového reaktora.

6. ENERGETICKÉ SPÚŠŤANIE

Príprava energetického spúšťania

Rozhodujúcim medzníkom pre energetické spúšťanie bol marec roku 1972, keď sa určil program rozsiahlych organizačno-technických opatrení na zabezpečenie prípravy a energetické spustenie do konca roku 1972.

Organizačné a technické opatrenia v tejto etape boli ovplyvnené výsledkami I. etapy komplexných skúšok technologického zariadenia v roku 1971, ktorá sa skončila neúspešne. Do primárneho okruhu a reaktora preniklo značné množstvo oleja pre nespoľahlivú funkciu upchávok turbokompresorov.

Bolo teda treba odmastiť asi 50 000 m^2 vnútorných povrchov jednotlivých okruhov na taký stupeň čistoty, ktorý by zaručil bezpečnú funkciu palivových článkov a izotopickú čistotu ťažkej vody. Okrem toho bolo treba rekonštruovať upchávkový systém turbokompresorov a technologické kanály reaktora na zvýšenie ich spoľahlivosti.

Nespoľahlivá funkcia automatiky dochladzovania reaktora a elektrický systém napájania vlastnej spotreby podľa projektu neumožňovali pri danom stave a spoľahlivosti slovenského energetického systému zaručiť dochladzovanie reaktora za každých podmienok. Preto bolo treba zabezpečiť nezávislý zdroj elektrickej energie s výkonom potrebným na dochladzovanie reaktora v podmienkach úplnej straty dodávky elektrickej energie z vonkajších zdrojov.

Na splnenie tohoto cieľa bola vybudovaná dieselgenerátorová stanica, zrekonštruoval sa systém elektrického napájania cirkulačných turbokompresorov a systém rozvodu elektrickej energie tak, aby zabezpečil spoľahlivé dochladzovanie. Boli vypracované dispečerské opatrenia, aby sa na minimum skrátilo možné prerušenie dodávky elektrickej energie z vonkajších zdrojov.

Komplexné skúšky na hlavných technologických zariadeniach bolo treba opakovať v celom rozsahu a pritom sa presvedčiť o tom, že režim činnosti uzlov primárneho okruhu, funkcia technologického zariadenia, kvalita a zloženie plynu CO_2 v primárnom okruhu vyhovujú parametrom predpísaným v projekte.

Na všetkých zariadeniach potrebných pre energetické spustenie sa kontroloval stav a odstraňovali sa závady z predchádzajúcich skúšok. Dôsledná príprava bola na rozvodnom zariadení 6, 110 a 220 kV. Tur-

bogenerátory č. 1 a č. 3 vrátane príslušenstva sa vyskúšali na otáčkach s prifázovaním na sieť parou z kotolne.

Najnáročnejšími prácami bolo dokončenie dieselgenerátorovej stanice a celého zariadenia inštalovaného pre zabezpečenie funkcie superhavarijného dochladzovania, rekonštrukcie a úpravy turbokompresorov na zabezpečenie zvýšenia prevádzkovej spoľahlivosti, vrátane funkčných a komplexných skúšok. Okrem toho sa demontovalo neštandardné zariadenie z fyzikálneho spúšťania, montovali sa ochrany systémov napájania I. a II. kategórie, upravovali sa regulačné obvody motorgenerátorov, urobila sa skúška chodu turbokompresora č.2 s generátorom v hydrocentrále Madunice a mnoho ďalších prác a skúšok.

Vyhodnotenie pripravenosti zariadenia

Vlastná príprava zariadenia elektrárne na energetické spúšťanie bola v harmonograme prác zaradená medzi fyzikálne a energetické spúšťanie, ale začala už v období komplexných skúšok elektrárne ako celku. Tieto preukázali schopnosť zariadenia na spoľahlivú prevádzku, ale aj nedostatky, ktoré bolo potrebné odstrániť.

Predovšetkým sa musela dosiahnuť maximálna tesnosť okruhov CO_2 a D_2O a urobili sa opatrenia brániace vniknutiu ľahkej vody z pomocných zariadení do plynového alebo ťažkovodného okruhu. Všetky zvary sa röntgenovali a tesnosť okruhov D_2O sa overovala tlakovými skúškami tlakom CO_2 6,5 MPa ešte pred nalievaním D_2O do vysokotlakových nádrží a do avialovej nádoby reaktora. Neoddeliteľná časť okruhu D_2O sa skúšala spolu s reaktorom pri tlaku 5,4 MPa dňa 17.10.1972. Reaktor bol pritom zaplnený palivovými článkami a bol nahriaty kompresormi bez ťažkej vody v avialovej nádobe.

Tesnosť vybraných výmenníkov tepla na okruhu D_2O sa overila héliovými skúškami. Tesné boli aj parogenerátory, ktoré sa skúšali pri tlakových skúškach jednotlivých slučiek CO_2 primárneho okruhu sledovaním únikov CO_2 do sekundárnej strany.

Aktívna experimentálna slučka sa nedokončila a preto bola oddelená od tlakového systému primárneho okruhu a experimentálny kanál G01 na reaktore sa vymenil za štandardný, osadený uzatváracou zátkou.

Dokumentácia pre energetické spúšťanie

Pred začiatkom energetického spustenia boli vypracované „Limity a podmienky pre I. etapu energetického spúšťania“, „Prevádzkový predpis pre reaktor“ a „Prevádzkový predpis pre komplex zariadenia elektrárne pri I. etape energetického spúšťania“. Všetky prevádzkové predpisy sa aktualizovali podľa výsledkov komplexných skúšok, fyzikálneho spúšťania reaktora a výsledkov predchádzajúcich etáp energetického spúšťania.

Priebeh energetického spúšťania

Energetické spúšťanie sa urobilo v troch etapách s postupne zvyšovanými parametrami.

Hlavné parametre v jednotlivých etapách energetického spúšťania			
	Výkon reaktora [MW_{tep}]	**Tlak v primárnom okruhu** [MPa]	**Teplota palivových článkov** [°C]
I. etapa	126	2,5	350
II. etapa	400	5,4	400 (500)
III. etapa	114 elektr.		500 (510)

Poznámka: Čísla v zátvorke boli povolené teploty na článkoch v centrálnej zóne.

Energetické spúšťanie zabezpečoval prevádzkový personál elektrárne. Sovietsky vedecko-technický vedúci bol v prvej etape energetického spúšťania zodpovedný za jadrovú a radiačnú bezpečnosť a riadil skupinu „Vedecko-technického vedenia“. V základných pracovných funkciách pôsobili sovietski špecialisti.

Etapa	**Dátum**
Začiatok energetického spúšťania	05.12.1972
Prvé prifázovanie na energetickú sieť	25.12.1972
Skončenie I. etapy energetického spúšťania	31.03.1973

Pri začatí spúšťania sa uvažovalo s prevádzkou 1. a 3. bloku, zatiaľ čo 2. blok, t.j. turbokompresory č. 3 a č. 4 boli určené na zabezpečenie superhavarijného dochladzovania reaktora s použitím dieselgenerátorovej stanice ako zdroja elektrickej energie pre pohon dvoch turbokompresorov pony-motormi na 600 ot/min.

I. etapa energetického spúšťania

Program prvej etapy energetického spúšťania, ktorý pripravila československá strana, sa posudzoval hlavne z pohľadu výsledkov komplexných skúšok a testov fyzikálneho spúšťania. Schválený bol 25.10.1972 sovietskym vedecko-technickým vedením a československou stranou.

Filozofia programu I. etapy energetického spúšťania sa spracovala na základe týchto základných princípov a cieľov:

1. Dokonale si osvojiť prácu s reaktorom a ostatnými jadrovými zariadeniami pri zachovávaní všetkých požiadaviek jadrovej a radiačnej bezpečnosti.

2. Postupne zvyšovať výkon reaktora a ostatného zariadenia na 3, 10, 17 a 22,5 % nominálneho výkonu reaktora, t.j. 560 MW_{tep}.

3. Na jednotlivých úrovniach zabezpečiť:
   - pri 3 % N_{nom} previesť riadenie reaktora na automatickú reguláciu,
   - pri l0 % N_{nom} zhodnotiť tepelný výkon a porovnať ho s údajmi prístrojov registrujúcich neutrónový tok,
   - pri 17 % N_{nom} spustiť turbogenerátor pri takom množstve výroby pary v parogenerátoroch, aby sa zabezpečil jeho chod naprázdno,
   - Na úrovni 22,5 % N_{nom} prevádzkovať elektráreň v režime normálnej prevádzky.

Zámery l. etapy energetického spúšťania boli určené takto:

- Dosiahnuť určenú výkonovú hladinu a pracovať pri parametroch predpísaných v programe spúšťania po dostatočne dlhú dobu, tak, aby sa mohlo urobiť prvé predbežné zhodnotenie celého zariadenia a systémov.
- „Havarijne“ odstaviť elektráreň a zistiť parametre na ohodnotenie tepelného šoku pri odstavení z parametrov I. etapy a na kontrolu a revíziu zariadení a systémov po práci na výkone a odstrániť objavené defekty.
- Ďalej zvýšiť výkon na parametre I. etapy s cieľom pracovať dlhšie pri týchto parametroch a získať skúsenosti s prevádzkou a charakteristikami zariadení. Počas tejto periódy urobiť všetky potrebné testy určené programom, ktoré boli odložené v záujme bezpečnosti pri prvom zvyšovaní výkonu.

- Krátkodobo zvýšiť výkon na parametre II. etapy, na overenie principiálnej možnosti práce pri týchto parametroch a zistiť základné technické charakteristiky potrebné pre prípravu programu II. etapy energetického spúšťania.

V priebehu I. etapy ES sa pozornosť venovala najmä:

- kontrole prietoku chladiaceho plynu cez všetky technologické kanály a meraniu teplôt CO_2 na výstupe z palivových článkov,
- overeniu zaistenia cirkulácie plynu v primárnom okruhu pri strate vonkajších zdrojov napájania a pri ďalších menších poruchách v systéme elektrického napájania vlastnej spotreby elektrárne,
- kontrole systémov dozimetrickej kontroly,
- komplexnej previerke systému ochrany a regulácie.

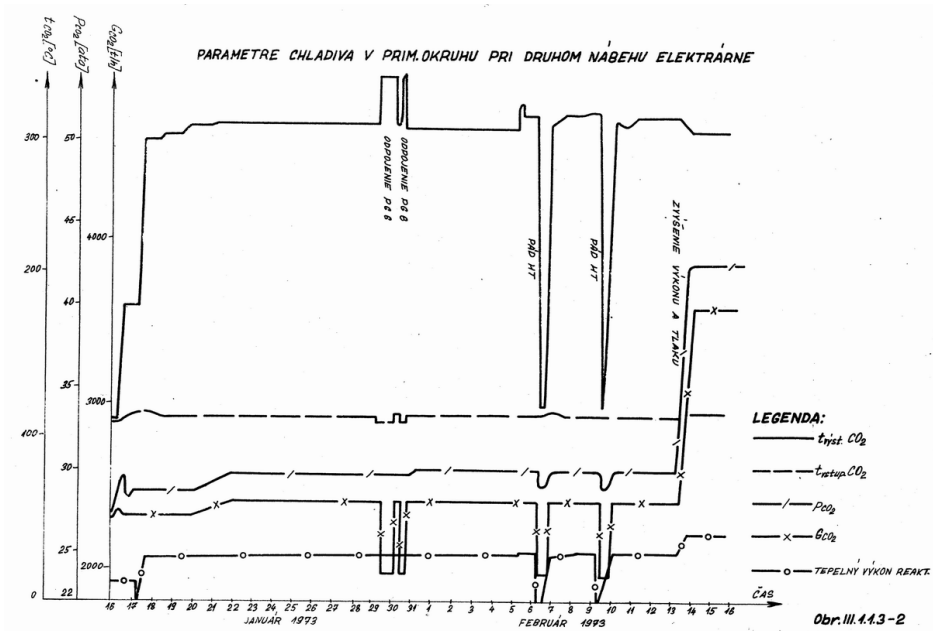
Chronológia najvýznamnejších udalostí v I. etape energetického spúšťania		
Etapa	**Dátum**	
Zvýšenie výkonu na MKV	22.12. 1972	04.38 hod. až 06.42 hod.
Zvýšenie výkonu na 3 %		12.53 hod.
Zvýšenie výkonu na 100 kW_{tep}		21.45 hod.
Zvýšenie výkonu na 3 %	23. 12. 1972	01.35 hod.
Zvýšenie výkonu z 3 % na 10 %		04.33 hod.
Zvýšenie výkonu na 17,5 %	24. 12. 1972	02.25 hod. až 06.30 hod.
Zvýšenie výkonu na 25,5 %	25. 12. 1972	13.22 hod. až 15.55 hod.
Prifázovanie TG1	25. 12. 1972	15.00 hod.
Prifázovanie TG3		15.12 hod.

Od 26.12.1972 do 7.1.1973 pracovali všetky zariadenia elektrárne pri ustálených parametroch I. etapy. Tento čas sa využil na hľadanie optimálneho rozloženia kompenzačných tyčí v aktívnej zóne na dosiahnutie požadovaného rozloženia neutrónového toku po polomere i pozdĺž výšky aktívnej zóny reaktora.

7. januára 1973 bol reaktor odstavený tlačidlom havarijnej ochrany. Odstávka trvala od 7.1.1973 do 16. 1.1973. Havarijné odstavenie sa využilo na získanie celého radu nových informácií:

- zmeral sa tepelný šok,
- zaznamenali sa krivky xenónovej otravy počas 48 hodín,
- vyskúšali sa systémy ochrany reaktora a základné zariadenie v podmienkach pôsobenia havarijnej ochrany a ďalšie systémy automatík a regulácie.

Po skončení všetkých prác plánovaných pri odstavení a po previerke zariadenia a ochrán sa začal 16. januára 1973 výkon reaktora znovu zvyšovať.



Parametre CO_2 v primárnom okruhu a výkon reaktora pri druhom spustení

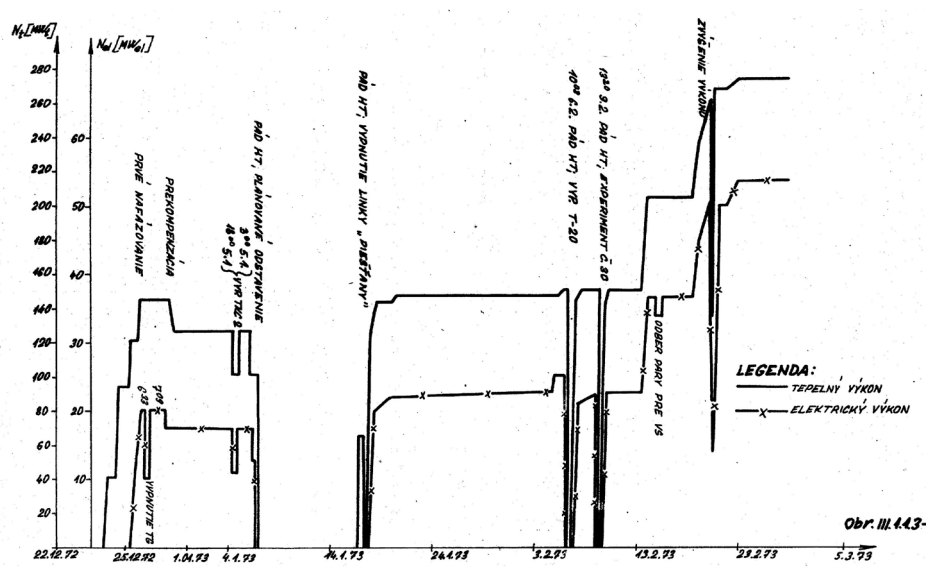
Zvyšovanie výkonu a prevádzka elektrárne na parametroch I. etapy energetického spúšťania

Regulácia prietoku plynu jednotlivými kanálmi na začiatku tejto podetapy bola úspešná. Po dosiahnutí stabilných parametrov na reaktore bolo treba doregulovať prietok plynu iba v niekoľkých kanáloch a nepatrne zmeniť polohu kompenzačných tyčí. Na reaktore sa dosiahlo rovnomerné rozloženie výstupných teplôt CO_2 z technologických kanálov a následne aj najvýhodnejšie parametre na výstupe z reaktora. Pri nezmenenom tepelnom výkone reaktora bol elektrický výkon väčší o 10 %.

V zhode s vypracovanou koncepciou energetického spúšťania sa táto časť I. etapy energetického spúšťania maximálne využila na získanie informácií potrebných pre ďalšie zvyšovanie výkonu, hlavne v týchto oblastiach:

- preverenie práce automatického regulátora,
- zmeranie teploty kesónovej rúry pri vyťahovaní kazety do dochladzovacej zóny,
- zmeranie rozdelenia neutrónového toku pozdĺž výšky reaktora metódou vyťahovania kazety do dochladzovacej zóny,
- prerušenie chladenia D_2O a následné zmeranie odozvy,
- prerušenie cirkulácie D_2O,
- vyskúšanie prirodzenej cirkulácie na parogenerátore č. 6,
- odstavenie jednej slučky CO_2 počas práce reaktora
  a) plánovité – postupné,
  b) havarijné – skokové,
- previerka práce zariadení a činnosti prevádzkového personálu po zapôsobení havarijnej ochrany pri výkone 25 %,
- určenie vplyvu otvorenia by-passov na turbokompresoroch na prietok chladiaceho plynu cez reaktor,
- zmeranie strát v izoláciách základných potrubí primárneho okruhu a parogenerátorov,
- určenie vplyvu izotopického zloženia D_2O na zásobu reaktivity.

Väčšina testov bola úspešná; poskytli dobrú informáciu o práci zariadení a boli veľmi užitočné aj pre zdokonalenie znalostí a návykov



Histogram činností a výkonu od začiatku spúšťania do konca I. etapy energetického spúšťania

personálu. Vychádzajúc zo získaných charakteristík práce základných zariadení elektrárne, z nahromadených skúseností personálu a z výsledkov testov sa vytvorili predpoklady na prechod do ďalšej etapy energetického spúšťania.

Dňa 12. februára 1973 začala záverečná časť I. etapy energetického spúšťania, počas ktorej sa preverila prevádzka elektrárne pri parametroch II. etapy energetického spúšťania a prevádzka elektrárne bola ustálená na týchto parametroch. Po zvýšení tlaku na satí turbokompresorov na 4,5 MPa sa zvýšil výkon reaktora tak, že maximálna meraná teplota uránových prútikov dosiahla 420°C.

Výsledky l. etapy energetického spúšťania

V I. etape energetického spúšťania od 15. decembra 1972 do 2. apríla 1973 bol koeficient využitia výkonu 0,75 a koeficient využitia času 0,83. Za celé obdobie I. etapy boli dve neplánované odstávky pôsobením automatickej ochrany reaktora (pádom havarijných tyčí) a to jedna v súvislosti so stratou napätia na linke 110 kV (Piešťany) a druhá v súvislosti s odpojením transformátora č. 20 pri falošnom signále.

Teplota uránových prútikov v palivových článkoch bola do 400°C, pri krátkodobom zvýšení do 425°C. Pretože maximálna teplota palivového článku nebola v mieste termočlánku, skutočné maximálne teploty boli asi 450°C, s krátkodobým prevýšením do 475°C . Počas tejto prevádzky sa neobjavila ani jedna porucha na palivovom článku.

Izotopická čistota ťažkej vody bola na konci I. etapy 99,50 % mol. Izotopické zloženie D_2O sa zhoršovalo s rýchlosťou 0,002 % za deň.

II. etapa energetického spúšťania

Odstávka pred začatím II. etapy sa využila na odstránenie porúch a nedostatkov zistených počas I. etapy a na prípravu II. etapy. Urobili sa tieto hlavné práce:

1. Tlaková skúška reaktora pri tlaku 6,36 MPa. Spolu s reaktorom sa skúšali okruhy cirkulácie ťažkej vody slučiek č.2. a č.3 systému spaľovania traskavej zmesi ako aj porolitové filtre.

2. Po 5 000 prevádzkových hodinách sa revidovali vrchné ložiská cirkulačného čerpadla D_2O CENTV-134 na ťažkovodnej slučke č.1.

3. Na zlepšenie priestorového rozdelenia neutrónového toku v reaktore sa premiestnili štyri tyče systému ochrany a riadenia reaktora. Na vybraných miestach v aktívnej zóne sa nahradili pôvodné kompenzačné tyče za nové so skrátenou absorpčnou časťou na dolnej polovici tyče (t. zv. tvarovacie tyče).

4. Z kanálov reaktora D06 a N09 sa vybrali palivové články so stredným vyhorením 827 MWd/tU a 590 MWd/tU. Tieto palivové články boli skontrolované v horúcej komore.

5. Do technologických kanálov reaktora D06 a N09 sa zaviezli dva experimentálne články (typu E1 a E4) s kalorimetrami a s meraním teplôt paliva pozdĺž výšky, na kontrolu rozdelenia neutrónového toku pozdĺž výšky a teplotného poľa v palivovom článku.

6. Od 30.4.1973 do 12.5.1973 sa preverovala činnosť zavážacieho stroja pri výmene palivových článkov, funkcia rekonštruovaných zátok technologických kanálov a spoľahlivosť určenia polohy uzatváracej rúrky váhovou a hydraulickou metódou. Rozhodlo sa, že palivové články sa budú vymieňať pri odstavenom reaktore (do 3 % nominálneho výkonu), t.j. pri malých teplotných spádoch plynu na aktívnej zóne.

7. Odstránili sa netesnosti parogenerátorov č. 1 a č. 5. Pred koncom l. etapy fyzikálneho spúšťania (koncom marca 1973) sa zistil veľký obsah železa vo vode sekundárneho okruhu, pri stálom poklese hodnoty pH. Stav „U-elementu“ v parogenerátore č. 1, na ktorom sa zistila netesnosť, bol taký, že sa rozhodlo vyrezať ho a nahradiť potrubným prepojením.

Základné úlohy II. etapy energetického spúšťania, program prác a priebeh prevádzky

Cieľom II. etapy bolo preveriť vlastnosti jadrového paliva pri teplotách blízkych projektovaným a dosiahnuť projektované vyhorenie. Zámery II. etapy energetického spúšťania boli určené takto:

1. Postupne zvýšiť výkon na 10 % N_{nom} a krátkodobo prevádzkovať s určenými parametrami. Urobiť experimenty na určenie vplyvu konfigurácie kompenzačných tyčí systému ochrany a riadenia reaktora na priestorové rozloženie neutrónového toku a spresnenie metodiky určenia tepelných a hydraulických charakteristík palivových článkov.

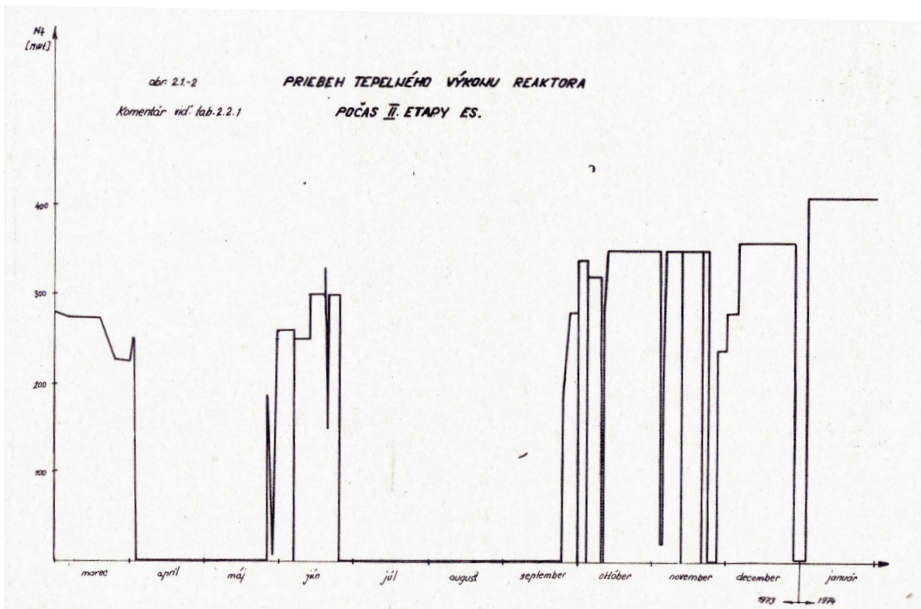
2. Zvýšiť výkon na úroveň parametrov II. etapy energetického spúšťania, pokračovať v testoch a prácach na zlepšenie teplotechnických parametrov reaktora.

3. Udržiavať prevádzku s parametrami II. etapy energetického spúšťania s výkonom reaktora 400 MW_{tep} a dosiahnuť projektované vyhorenie paliva. S odstávkami sa uvažovalo iba pri porušení tesnosti pokrytia v niektorom palivovom článku indikovanom systémom kontroly pokrytia, pri plánovanej výmene palivových článkov a pri plánovaných opravách alebo revíziách základného zariadenia. Toto obdobie malo trvať do konca roka 1973.

Po ukončení opráv bol reaktor dňa 15.5.1973 uvedený do kritického stavu a plánované testy sa robili pri nízkych výkonových hladinách. Dňa 22.5.1973 po preverení funkcie zaradenia a po dokončení experimentov boli pri tepelnom výkone 150 MW prifázované turbogenerátory. Elektráreň bola v prevádzke prakticky nepretržite do 22.6.1973. K tomuto dátumu sa dosiahol maximálny tepelný výkon 350 MW a maximálny elektrický výkon 69 MW. V tejto fáze prevádzky sa objavila závažná netesnosť na chladiči D_2O slučky č. 1 – netesnosť na rúrkovom zväzku. Chybný chladič sa demontoval a nahradil potrubným prepojením.

Pre netesností, ktoré vznikli na všetkých parogenerátoroch, sa rozhodlo elektráreň na asi dva mesiace odstaviť. Ukázalo sa, že opravy parogenerátorov boli veľmi náročné a zložité. Ich opravy trvali až do 2.10.1973. Nábeh elektrárne začal 15.9. 1973 ohrevom reaktora a 26.9.1973 boli prifázované turbogenerátory na sieť. Výkon sa zvýšil na úroveň parametrov pri práci troch slučiek hlavného primárneho okruhu reaktora.

V období opráv parogenerátorov sa vymenilo aj cirkulačné čerpadlo D_2O CENTV-134 na slučke č. 1, pretože sa objavila chyba materiálu plášťa čerpadla a D_2O vnikla do priestoru statora motora. Porušený motor sa spolu s rotorom čerpadla demontoval a nahradil sa rezervným. Elektráreň potom bola prakticky v nepretržitej prevádzke až do 31.1.1974. V priebehu tohto obdobia sa dosiahol maximálny tepelný výkon reaktora 440 MW a maximálny elektrický výkon 91 MW.

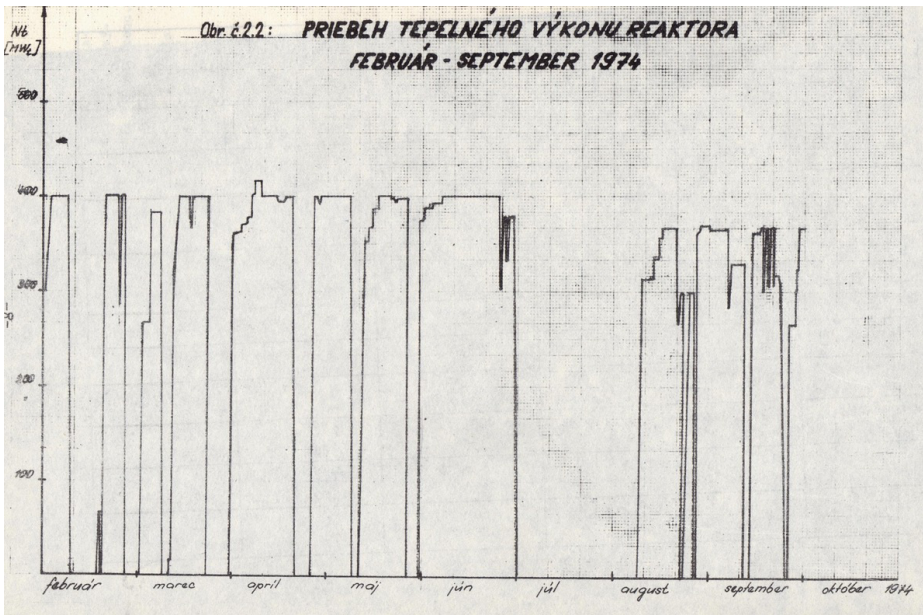


Histogram tepelného výkonu reaktora v II. etape energetického spúšťania

Prehľad parametrov a bilancií

V priebehu prevádzky v II. etape energetického spúšťania sa parametre elektrárne postupne zvyšovali vďaka zlepšovaniu priestorového rozdelenia neutrónového toku, regulácii prietoku plynu cez palivové články, spresneniu metodiky stanovenia teplôt chladiva, pokrytia a uránu v palivovom článku pokrytia, zvyšovaniu tlaku chladiva a celého radu ďalších opatrení.

Hoci práce súvisiace s procesmi zvyšovania parametrov prebiehali kontinuálne, celé obdobie tejto prevádzky sa dá rozdeliť do niekoľkých výkonových stupňov.



Histogram tepelného výkonu reaktora v období február – september 1974

Prehľad výkonových stupňov v II. etape energetického spúšťania		
Obdobie	**Tepelný výkon [MW_{tep}]**	**Poznámka**
23.02.1973 – 02.04.1973	260-280	Na koniec I. etapy naplánované zvýšenie výkonu pri tlaku v satí turbokompresorov 4,5 MPa, teplota palivových prútikov do 400°C
22.05.1973 – 06.06.1973	260	Prevádzka na parametroch dosiahnutých v závere I. etapy
06.06.1973 – 13.06.1973	300	Zvýšenie výkonu sa dosiahlo zvýšením teplôt palivových prútikov zo 400°C na 450°C
13.06.1973 – 10.11.1973	350	Zvýšenie výkonu sa dosiahlo zvýšením tlaku v satí turbokompresorov zo 4,6 na 5,2 MPa.
10.11.1973 – 08.12.1973	390	Zvýšenie výkonu sa dosiahlo zvýšením teplôt palivových prútikov zo 450°C na 480°C
18.12.1974.– 14.01.1974	410	Zvýšenie výkonu sa dosiahlo doladením prietoku CO_2 cez technologické kanály a vyrovnaním priestorového rozdelenia neutrónového toku pomocou systému kompenzácie
14.01.1974.– 31.01.1974	440	Zvýšenie výkonu sa dosiahlo zvýšením tlaku v satí turbokompresorov z 5,2 na 5,5 MPa.

V období II. etapy energetického spúšťania bola elektráreň jedenásťkrát odstavená pre poruchy zariadenia, z toho desaťkrát pôsobením automatickej ochrany reaktora pri prevádzke s výkonom väčšom ako 3 % N_{nom}.

Najčastejšou príčinou odstavenia boli poruchy činnosti systému elektrického zariadenia a ochrán. Ďalšími príčinami boli nesprávna činnosť obsluhy, poruchy turbokompresorov a slučiek chladenia D_2O. Najčastejšou príčinou zníženia výkonu boli poruchy zariadenia turbokompresorov, turbogenerátorov, chyby obsluhy a poruchy parogenerátorov. Pre porušenie pokrytia palivových článkov indikovaným systémom kontroly porušenia bolo v reaktore vymenených deväť palivových článkov.

Výsledky II. etapy energetického spúšťania

1. Počas I. a II. etapy ES od 15. decembra 1972 do 31.januára 1974 bola elektráreň v prevádzke na energetickom výkone 5 819 hodín. Za celé obdobie energetického spúšťania bola elektráreň neplánovane odstavená pre poruchy dvanásťkrát, z toho štyrikrát boli príčinou poruchy v systéme vonkajšieho napájania.

2. Počas II. etapy energetického spúšťania bola teplota uránových prútikov okolo 480°C, niektorých až 500°C.

3. Radiálne rozloženie toku, odpovedajúce uvoľňovanie energie v režime práce reaktora pri optimálnom postavení kompenzačných tyčí pri tepelnom výkone reaktora od 142 do 410 MW_{tep} umožnilo v centrálnej i periférnej zóne dosiahnuť rozptyl výstupných teplôt plynu z technologických kanálov v rozmedzí 10°C.

4. Rozloženie neutrónového toku pozdĺž výšky aktívnej zóny sa v priebehu spúšťania menilo v rozsahu K_Z (0,56 až 0,625) a veľmi záviselo od spôsobu kompenzácie prebytku reaktivity. Pri prevádzke reaktora s pôvodným projektovým systémom kompenzačných tyčí bolo výkonové pole v reaktore axiálne deformované a hodnota K_Z bola 0,58. Po zavezení „tvarovacích“ absorpčných tyčí do aktívnej zóny sa axiálne pole podstatne zlepšilo a pohybovalo sa okolo hodnoty 0,620.

5. Systém kontroly porušenia pokrytia palivových článkov zaznamenal deväť porúch pokrytia palivových článkov.

6. Izotopická čistota D_2O bola na konci II. etapy energetického spúšťania 99,30 % mol. Charakter zmeny izotopického zloženia D_2O počas energetického spúšťania nasvedčoval, že v okruhu nie sú nijaké neznáme alebo nekontrolované zdroje ľahkého vodíka. Pri tlaku 5,4 MPa, teplote CO_2 na výstupe z reaktora do 350°C, únikoch CO_2 okolo 280 kg/h a danom režime bola rýchlosť zmeny izotopického zloženia ťažkej vody 0,0007 % mol za deň. Priemerné nenávratné straty D_2O za celé energetické spúšťanie v priebehu roka boli 4,74 kg/deň pri množstve D_2O v okruhu asi 90 t. Projektom predpokladané straty D_2O boli 5 kg/deň.

7. Chemický režim okruhu D_2O charakterizovali tieto parametre:

Parameter	Hodnota	Rozmer
pH (po odplynení)	4,6	-
elektrická vodivosť	122,5	Si/cm^2
Al	107,0	g/l
Fe	5,6	g/l
Mn	0,1	g/l
Ni	1,0	g/l
suchý zvyšok	1 500	mg/l
organické nečistoty	119	mgO_2/ l

8. Celková zásoba reaktivity výkonového reaktora bola 1,18 %.

9. Celková rádioaktivita D_2O vo vzorke meranej dve hodiny po odbere pri tepelnom výkone 421 MW bola $3{,}07.10^9$ Bq/l a určovali ju najmä izotopy ^{56}Mn, ^{24}Na, ^{51}Co. V okruhu sa hromadili produkty vzájomného pôsobenia D_2O a CO_2 pod vplyvom žiarenia. Pozornosť sa sústredila na tento jav a až prevádzkou destilačnej stanice sa hromadenie podarilo znižovať. Vznik organických látok a ich znižovanie sa podarilo vyriešiť.

10. Systémy plynového hospodárstva počas energetického spúšťania pracovali normálne, umožnili dodržiavať určené zloženie plynu v okruhu, vlhkosť v potrebných medziach, obsah oleja a ostatných určených parametrov.

11. Úroveň rádioaktivity plynového okruhu určoval rádioizotop ^{41}Ar. Obsah izotopov Xe a Kr v plyne počas energetického spúšťania závisel iba od veľkosti povrchovej kontaminácie častí aktívnej zóny uránom. Maximálny expozičný príkon v slučkách CO_2 bol 0,73 mSv/h pri 410 MW_{tep}.

12. Turbokompresory a ich pomocné okruhy fungovali normálne a funkcia „prevádzkovej“ a „kľudovej“ upchávky sa po úpravách zlepšila. V priebehu II. etapy energetického spúšťania už vznikli netesnosti na parogenerátoroch. Analyzovali sa príčiny porúch a dodávateľ spracoval návrh viacerých spôsobov úprav a rekonštrukcie rúrkovníc. Uvažovalo sa aj o zdvojení rúrkovníc a odsávaní medzipriestoru na zamedzenie vstupu CO_2 do vody, prípadne do pary.

13. V II. etape energetického spúšťania sa zavážacím strojom vymenilo dvadsať palivových článkov. Články sa vymieňali podľa osobitného predpisu, lebo v pôvodných horných dieloch palivových článkov sa urobila úprava na zamedzenie deformácie tesnenia. Deformácia spôsobila, že články sa mohli meniť pri výkone reaktora v rozmedzí 0 až 3 % N_{nom}. Funkcia zavážacieho stroja bola až na časté poruchy zachytávacích klieští dobrá. Porucha však mimoriadne sťažovala operácie pri výmene paliva a tieto činnosti boli veľmi rizikové.

14. Celková schéma elektrického napájania vlastnej spotreby a elektrické zariadenia počas energetického spúšťania pracovali vyhovujúco a zabezpečovali vcelku dostatočne vysokú spoľahlivosť elektrického napájania. V normálnom režime to bolo troma zdrojmi – linky 110 kV, linky 220 kV a hydrocentrálou Madunice, v havarijnom režime havarijného dochladzovania dvoma nezávislými zdrojmi – hydrocentrálou Madunice a dieselgenerátormi. Schéma elektrického napájania vlastnej spotreby dostatočne zabezpečila potreby dochladzovania reaktora, ale mala aj rad nedostatkov.

15. Dispečerské opatrenia zabezpečovali rýchle obnovenie napätia vonkajších zdrojov napájania.

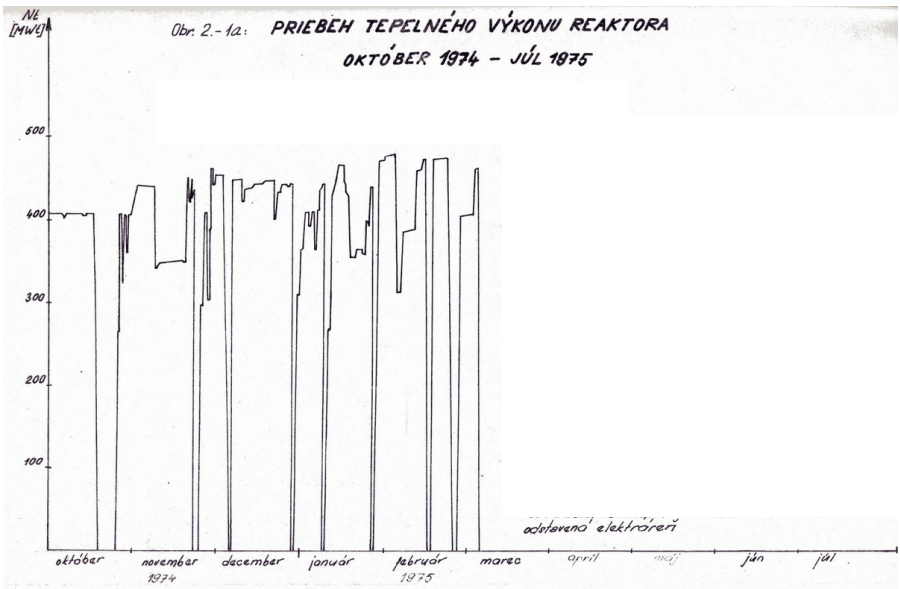
16. Systém napájania spotrebičov I. kategórie po úpravách v regulátoroch napätia motorgenerátorov pracoval spoľahlivo.

17. Systém superhavarijného dochladzovania a dieselgenerátorová stanica pracovali spoľahlivo.

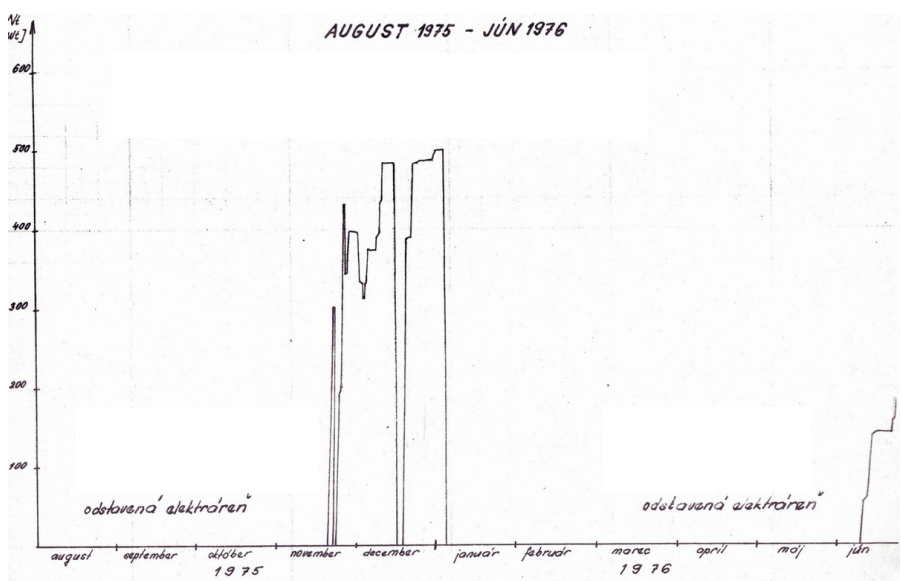
18. Systémy dozimetrickej a špeciálnej technologickej kontroly zabezpečili kontrolu radiačnej situácie. Účinnosť ochrán zariadení a biologickej ochrany zabezpečili v celej elektrárni vyhovujúcu radiačnú situáciu.

19. Radiačná situácia bola počas I. a II. etapy energetického spúšťania uspokojivá. Aktivita exhalátov vypúšťaných komínom bola podstatne menšia ako povolené hodnoty.

20. Pri parametroch I. a II. etapy energetického spúšťania sa na reaktore ani raz nevyskytlo nekontrolované prevýšenie výkonu



Histogram tepelného výkonu reaktora v období október 1974 – júl 1975



Histogram tepelného výkonu reaktora v období august 1975 – jún 1976

III. etapa energetického spúšťania

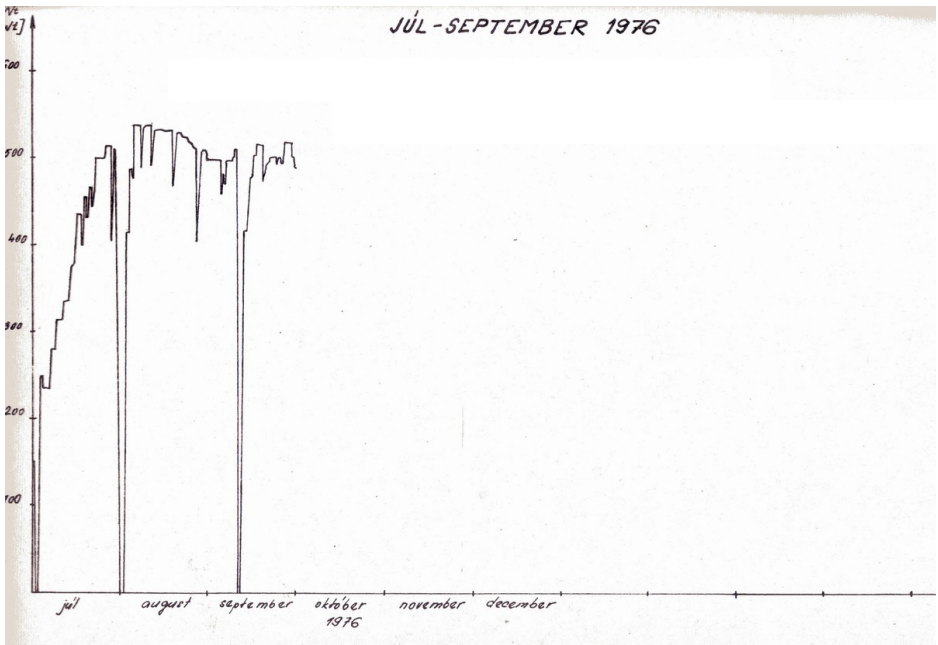
III. etapa energetického spúšťania sa plánovala s prevádzkou všetkých šiestich cirkulačných slučiek. Na to boli potrebné zásadné úpravy v systéme napájania vlastnej spotreby elektrárne. Od marca do polovice novembra 1975 bola elektráreň odstavená na generálne a bežné opravy technologického zariadenia. Vypracovala a aktualizovala sa prevádzková dokumentácia na nové podmienky. Po úspešných komplexných skúškach zariadenia bola dňa 20.11.1975 obnovená prevádzka.

Na začiatku III. etapy energetického spúšťania sa udržoval tlakový spád na aktívnej zóne do 0,8 MPa, pretože neboli celkom jasné príčiny korózie avialových ťažkovodných kesónových rúrok. Neskôr bol postupne povolený tlakový spád 0,85 MPa, 0,9 MPa až 1,0 MPa. Najvyšší výkon 114 MW_e na svorkách generátora pri tlakovom spáde 0,9 MPa sa dosiahol dňa 26.12.1975.

Dňa 5. januára 1976 vznikla v elektrárni havária typu LOCA po vystrelení novozavážaného palivového kompletu z reaktora. V nasledujúcich dňoch sa likvidovali následky havárie a urobili sa úpravy technologických zariadení, ktorých cieľom bolo vylúčiť opakovanie podobnej situácie. Okrem toho sa urobili aj ďalšie opatrenia v havarijných ochranách a blokádach ovplyvňujúcich prevádzku turbokompresorov.

Po likvidácii následkov havárie a úpravách zariadení bola 20.6.1976 obnovená prevádzka s parametrami zodpovedajúcimi I. etape energetického spúšťania. Obmedzením tlakového spádu na aktívnej zóne sa výrazne obmedzila možnosť optimálne regulovať prietok chladiaceho plynu cez jednotlivé technologické kanály reaktora.

Zistilo sa nerovnomerné chladenie dna ťažkovodnej avialovej nádoby, kde sa z organických kyselín, ktoré boli produktom korózie, vytvorila izolačná vrstva. Na zvýšenie teploty dna prispela aj zhoršená chladiaca schopnosť chladičov D_2O. Usadeniny na dne ťažkovodnej nádoby sa podarilo vymyť pri paralelnej spolupráci všetkých troch cirkulačných čerpadiel D_2O. Teplovýmenné plochy chladičov sa vyčistili roztokom kyseliny citrónovej. Na začiatku augusta 1976 sa dosiahol elektrický výkon 120 MW pri tlakovom spáde na aktívnej zóne do 0,9 MPa a prevádzke piatich slučiek primárneho okruhu. Tento režim bol z hľadiska čistého výkonu elektrárne určený ako najefektívnejší.



Histogram tepelného výkonu reaktora v období júl – september 1976

V druhej polovici augusta bola zaregistrovaná výrazne zvýšená poruchovosť pokrytia väčšieho počtu palivových článkov v perifernej zóne a preto sa výkon reaktora znížil. Príčinu porušovania sa nepodarilo jednoznačne zistiť, ale predpokladalo sa, že to bol dôsledok latentného porušenia pokrytia ešte z havárie 5. januára 1976. Po analýze sa postupne zvýšili prevádzkové parametre. V priebehu októbra 1976 boli povolené maximálne teploty pokrytia 500°C v centrálnej a 480°C, resp. 490°C v perifernej zóne. Od 28.10.1976 sa zvýšila teplota na 510°C v centrálnej zóne a na 490°C a 500°C v perifernej zóne. Na svorkách generátora sa dosahoval výkon 110 MW.

V období december 1976 až január 1977 sa veľmi zvýšil počet netesností parogenerátorov. Charakter porúch nasvedčoval, že vznikol nový typ poruchy, ktorý nebol dovtedy pozorovaný. Prienik CO_2 do sekundárneho okruhu bol taký veľký, že spôsobil pokles vákua v kondenzátoroch turbogenerátorov a elektráreň bola odstavená.

Po odstránení netesnosti bola elektráreň znovu uvedená do prevádzky 29. januára 1977 a prevádzka pokračovala až do večerných hodín 22. februára 1977, kedy vznikla havária palivového článku spojená s porušením kesónovej rúrky ťažkovodnej avialovej nádoby a prienikom ťažkej

vody do plynového okruhu. Tepelný šok a vysoká vlhkosť v primárnom okruhu spôsobili porušenie pokrytia veľkého počtu palivových článkov a masívnu kontamináciu vnútorných povrchov primárneho i sekundárneho okruhu. Boli významne kontaminované priestory elektrárne.

Podrobne sú obe havárie v JE A1, ich príčiny, priebeh a následky uvedené v časti „Vážne havárie v elektrárni A1“.

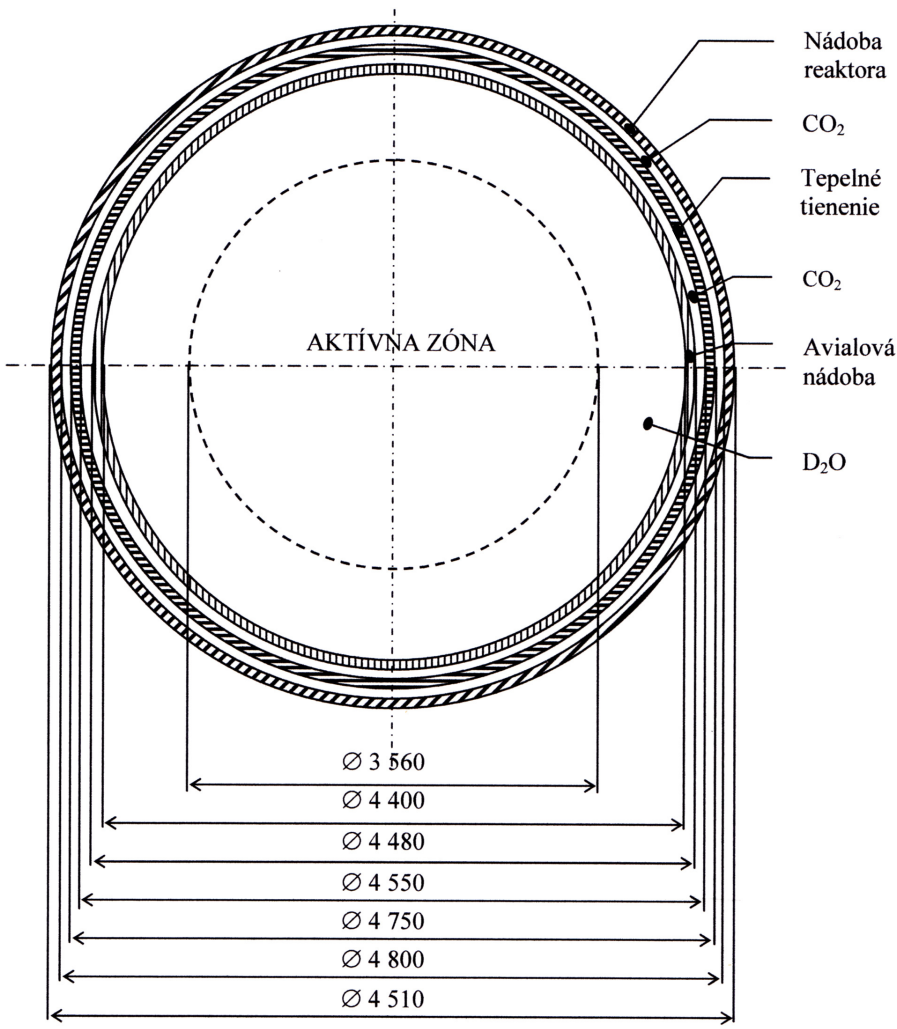
Počas prevádzky s parametrami III. etapy energetického spúšťania bola elektráreň desaťkrát odstavená z rôznych dôvodov, vrátane nedostatku čistého CO_2.

V ďalšej časti knihy sú podrobne popísané hlavné komponenty a systémy elektrárne a ich prevádzkové chrakteristiky zistené v jednotlivých etapách spúšťania. Na pripomenutie súvislostí sa niektoré údaje opakujú.

7. AKTÍVNA ZONA

Aktívnu zónu reaktora KS150 tvorila cylindrická avialová nádoba (materiálové zloženie: Al 97 %, zostávajúce 3 % tvoria prímesi z C, Si, Cu, Fe, Cr Ni, Ti, Mg, Mn), zaplnená ťažkou vodou. Rovnobežne s osou avialovej nádoby prechádzali aktívnou zónou technologické kanály, osi ktorých boli v rohoch pravidelnej štvorcovej mriežky s krokom 29,95 cm.

Technologické kanály rozmiestené v centrálnej časti aktívnej zóny mali väčší priemer ako technologické kanály v periférnej časti zóny.



Priečny rez reaktorom KS150

V aktivnej zóne boli dva typy palivových článkov, ktoré sa navzájom odlišovali priemerom vonkajšej obalovej rúry a počtom palivových prútikov. Z celkového počtu 148 palivových článkov bolo štyridsaťštyri tzv. centrálnych článkov rozmiestnených v centrálnej časti aktívnej zóny, ostatných 104 tzv. periférnych článkov bolo rozmiestnených v medzikruží medzi centrálnou zónou a reflektorom, ktorý bol na vonkajšej hranici aktívnej zóny.

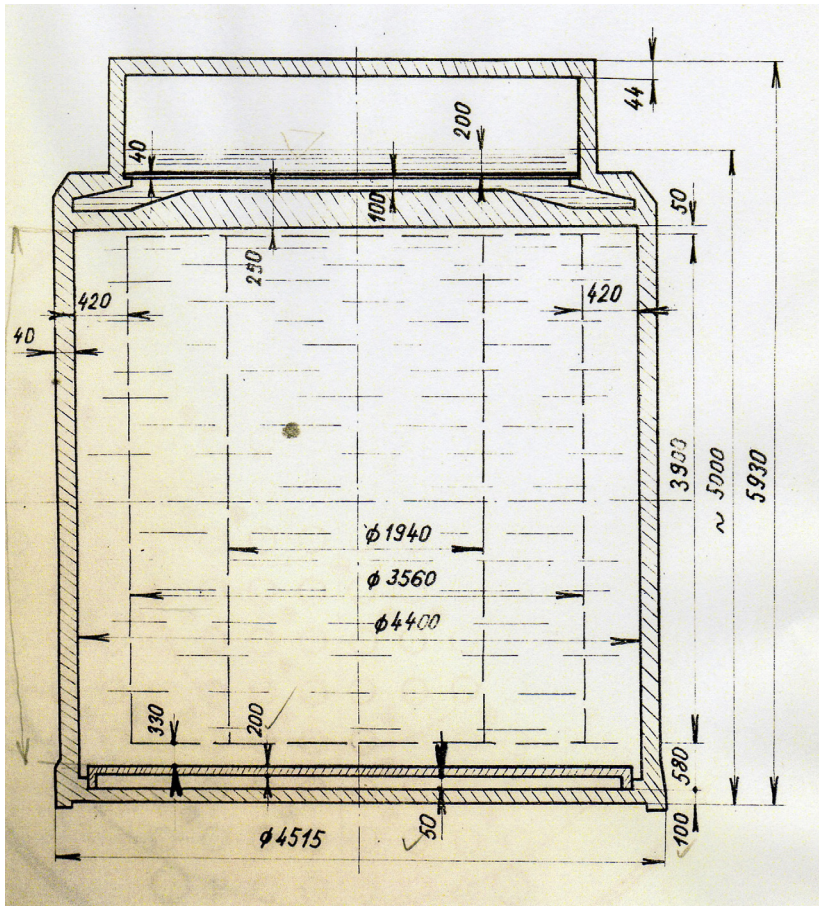
Základné parametre aktívnej zóny	
Priemer avialovej nádoby	4 400 mm
Priemer AZ	3 560 mm
Priemer centrálnej zóny	1 940 mm
Hrúbka reflektora (stredná)	420 mm
Výška avialovej nádoby	4 940 mm
Priemer technologického kanálu centrálnej zóny	128 mm
Priemer technologického kanálu perifernej zóny	115 mm

Palivové prútiky z kovového prírodného uránu boli rovnaké v centrálnych a v periférnych palivových článkoch. Konštrukčná výška obidvoch typov palivových článkov bola 4 765 mm.

Hmotnosť častí palivového článku		
Palivový článok	**centrálny**	**periférny**
Celková hmotnosť	219 kg	179 kg
Hmotnosť U	175,1 kg	147 kg
Hmotnosť pokrytia	8 kg	6,8 kg
Hmotnosť Zr (obalová rúra + centrálna rúrka + protektory)	10,5 kg	8,7 kg
Hlavica + lapač + Ti koncovky palivových prútikov	25,4 kg	16,5 kg

Moderátorom v reaktore KS150 bola ťažká voda s hmotnosťou 59 t umiestnená v avialovej nádobe. Projektové izotopické zloženie bolo 99,6 % D_2O a 0,4 % H_2O. Ťažká voda sa chladila v chladiči v ťažkovodnom chladiacom okruhu. Počas výkonovej prevádzky reaktora stredná teplota ťažkej vody bola udržiavaná na úrovni okolo 70°C.

Teplo z paliva a z reaktora odvádzal cirkulujúci CO_2 pod tlakom asi 6,5 MPa. Chladiaci systém reaktora mal šesť cirkulačných slučiek, z ktorých každá bola vybavená turbokompresorom a parným generátorom,



Konštrukcia avialovej nádoby

v ktorom sa teplo z primárneho chladiva odovzdávalo do sekundárneho okruhu na výrobu pary pre turbíny.

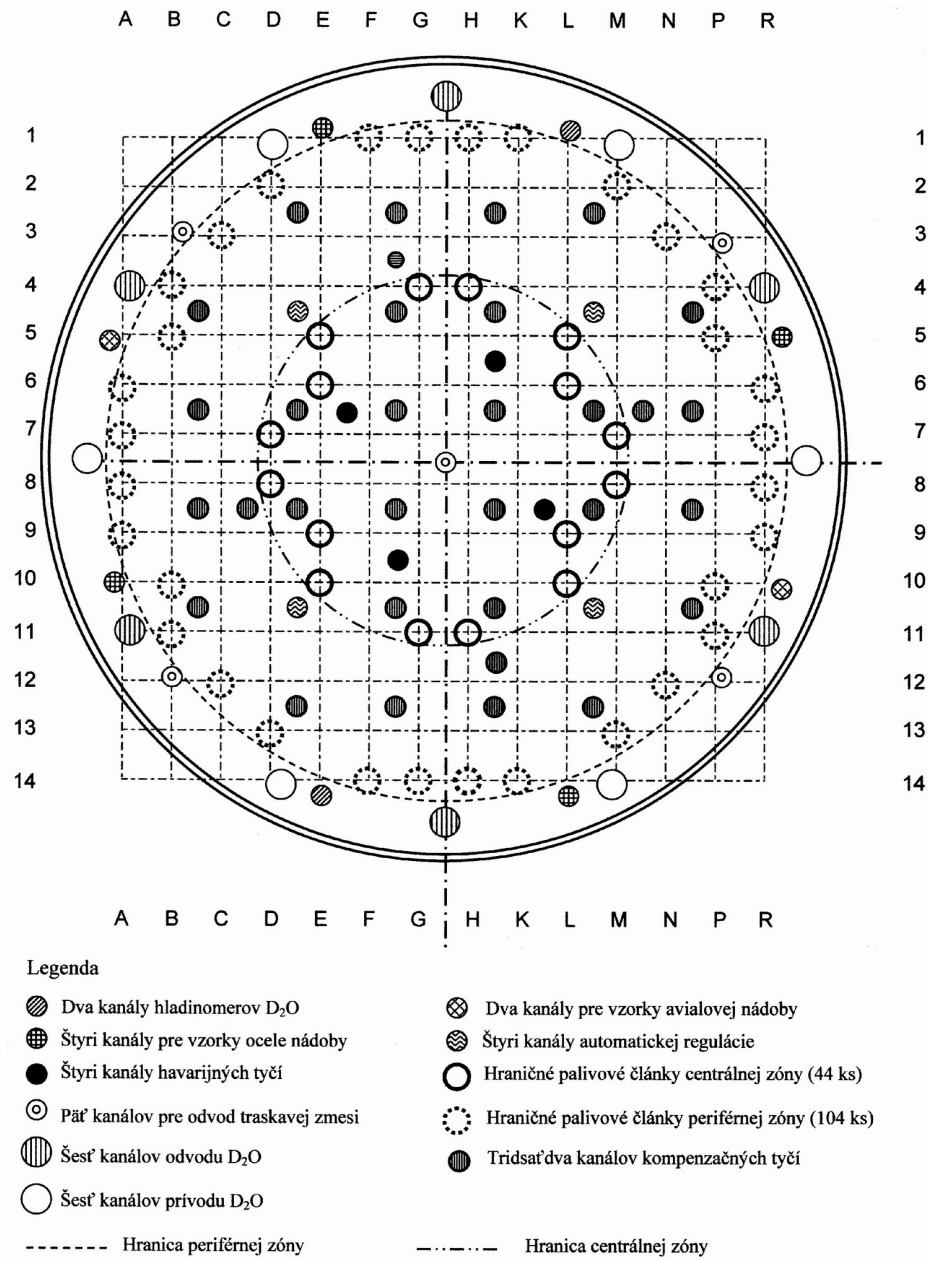
Na výstupe z každého palivového článku bol inštalovaný termočlánok na meranie výstupnej teploty plynu. Do reaktora sa zavážali aj tzv. termometrické experimentálne palivové články, ktoré mali termočlánky na meranie teploty uránu v osi palivového prútika a meracie miesto sa nachádzalo v mieste projektovej maximálnej teploty uránového jadra prútika.

Z každého technologického kanála sa odoberala vzorka plynu na meranie aktivity štiepnych produktov. Systém odberov slúžil na kontinuálnu kontrolu tesnosti pokrytia paliva počas prevádzky.

Reaktivita v reaktore sa riadila pomocou štyridsiatich riadiacich absorpčných tyčí, ktoré sa zasúvali do príslušných vodiacich kanálov

v avialovej nádobe na pozíciách medzi palivovými kazetami.

Na plnenie rôznych funkcií z hľadiska riadenia reaktivity v reaktore bolo štyridsať absorpčných tyčí reaktora KS150 rozdelených podľa spôsobu ovládania.

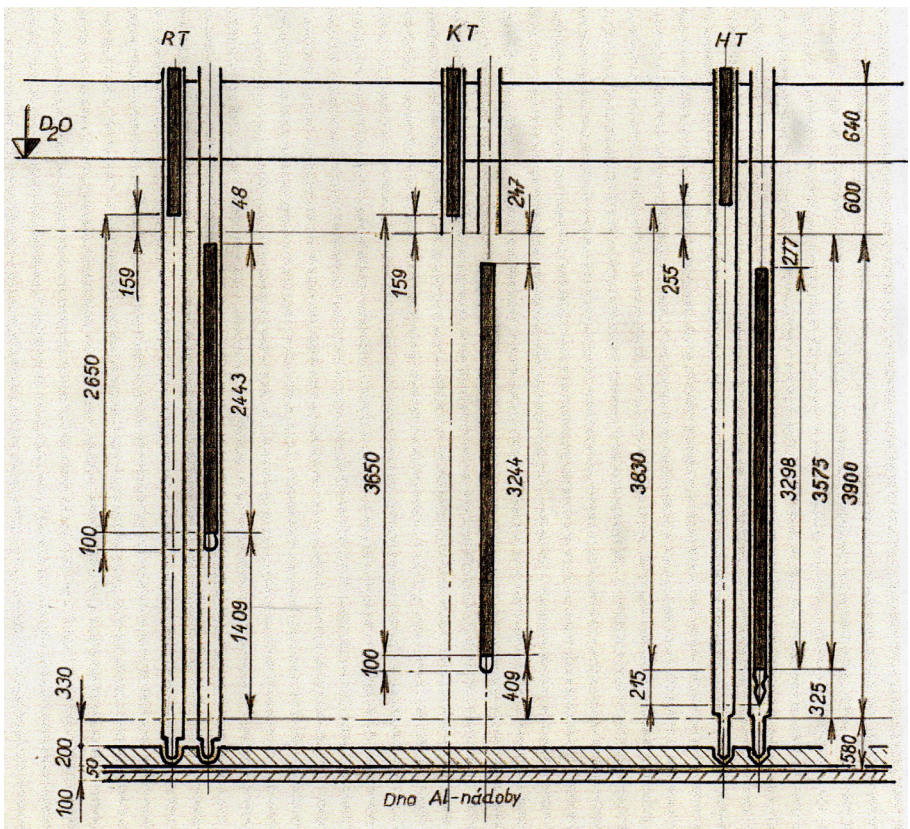


Rozloženie technologických kanálov a absorpčných tyčí pozdĺž priemeru aktívnej zóny

Rozdelenie regulačných tyčí podľa funkcie	
Funkcia	**Počet**
Automatická regulácia výkonu reaktora	4
Rýchle odstavenie reaktora (tzv. havarijné tyče)	4
Tvarovanie výkonu reaktora pozdĺž výšky aktívnej zóny. (Zmena oproti pôvodnému projektu, realizovaná počas experimentálnej prevádzky A1)	4
Kompenzácia dlhodobých efektov reaktivity reaktora – na vyhorievanie paliva, na otravu reaktora, na teplotné efekty	28

Havarijné tyče po iniciácii príslušného signálu automatickej ochrany reaktora padali do reaktora vlastnou váhou a do hornej koncovej polohy ich postupne vyťahovali operátori reaktora ručne.

Regulačné tyče v skupinovom ovládaní riadil automatický regulátor výkonu reaktora.



Krajné polohy a zdvihy absorpčných tyčí podľa pôvodného projektu

Ostatné kompenzačné tyče ovládal ručne operátor reaktora. Kompenzačné tyče pri prevádzke reaktora mali dve polohy. Boli úplne zasunuté do aktívnej zóny, alebo boli zo zóny úplne vysunuté.

Riadenie reaktora podľa pôvodného projektu malo za následok vytláčanie výkonu do dolnej polovice aktívnej zóny. Z hľadiska odvodu tepelného výkonu reaktora to bol nepriaznivý stav. Tento efekt sa pri úrovni dostupnej výpočtovej metodiky a techniky pri projektovaní aktívnej zóny nedal dostatočne presne predvídať.

Skúsenosti z počiatočnej prevádzky reaktora KS150 preukázali, že prítomnosť lokálnych absorbentov v mreži aktívnej zóny veľmi ovplyvňovala radiálne a axiálne rozloženie výkonu v reaktore. Na kompenzáciu deformácií axiálneho rozloženia výkonu v reaktore, spôsobeného najmä čiastočne zasunutými regulačnými tyčami sa navrhla projektová zmena a vyrobili sa tzv. tvarovacie tyče.

Tvarovacie tyče vznikli úpravou kompenzačných tyčí tak, že absorpčný materiál sa odstránil z dvoch tretín celkovej dĺžky tyče od horného konca kompenzačnej a zostal iba v dolnej tretine. Tieto tyče ovládal operátor reaktora tak, aby absorpčné časti regulačných tyčí zasúvaných

Avialová nádoba – predmontážna kontrola v hale

do aktívnej zóny zhora a absorpčné časti tvarovacích tyčí boli navzájom po výške rozmiestnené symetricky voči stredu aktívnej zóny.

Takýto spôsob riadenia reaktivity reaktora umožňoval lepšie riadiť rozloženie výkonu pozdĺž výšky aktívnej zóny.

Neutrónovo – fyzikálne parametre reaktora

Neutrónovo – fyzikálne charakteristiky ťažkovodného plynom chladeného reaktora sú všeobecne závislé od:

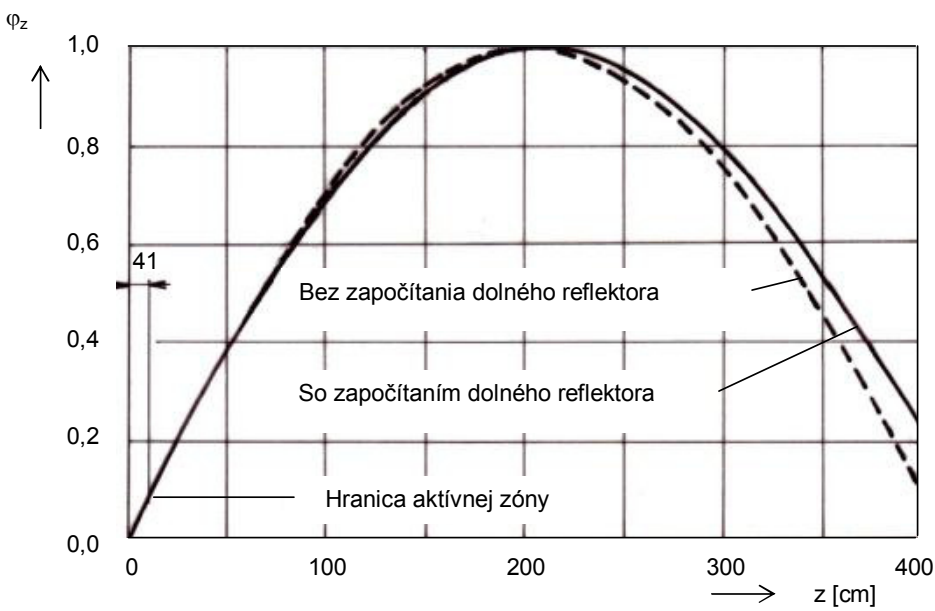
- teploty moderátora a paliva,
- xenónovej otravy stacionárnej i nestacionárnej,
- samáriovej otravy,
- vyhorenia paliva,
- koncentrácie D_2O,
- inhibítora v moderátori, ktorý sa pridával na zníženie rýchlosti korózie avialovej nádoby (v reaktore KS150).

Neutrónovo – fyzikálne parametre reaktora sa počítali riešením difúznych rovníc v dvojgrupovom priblížení, pre dvojzónový reaktor s radiálnym reflektorom. Axiálne reflektory sa zohľadnili cez extrapolované dĺžky, ktoré zahrnovali úsporu reflektora. Takéto priblíženie umožnilo vypočítať rozloženie výkonu, zásoby reaktivity, koeficienty reaktivity, ale dostatočne presne iba pre reaktor s čerstvým palivom alebo s palivom, ktoré bolo charakterizované stredným vyhorením v centrálnej časti, respektíve v periférnej časti aktívnej zóny a naviac bez prítomnosti absorbentov v aktívnej zóne. Obrázky ilustrujú parametre rozloženia výkonu v reaktore uvedené v pôvodnom projekte. Rozloženie výkonu pozdĺž objemu aktívnej zóny sa stanovilo výpočtom iba pre stav bez prítomnosti lokálnych absorbátorov v aktívnej zóne.

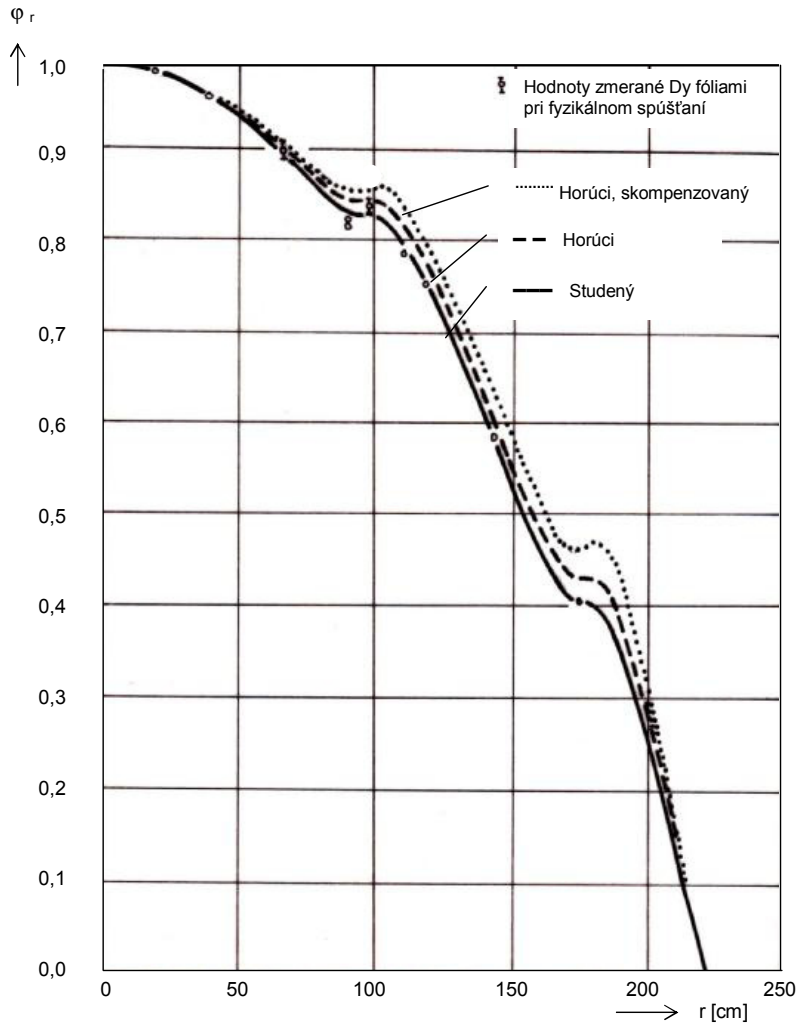
Bilancia reaktivity reaktora

Pri výpočte koeficientov reaktivity, xenónovej otravy a zmeny reaktivity pri výmene palivových článkov (v projekte sa uvažovalo s kontinuálnou výmenou pri výkone reaktora) sa využívala poruchová metóda.

Bilancia reaktivity (údaje podľa [1])	
Parameter	**%**
Zásoba reaktivity studeného neotráveného reaktora (bez xenónovej a samáriovej otravy, teplota paliva a moderátora je 20°C) s čerstvým palivom	8,22
Úbytok reaktivity v dôsledku absorpcie neutrónov v konštrukčných materiáloch (hlavice palivových článkov, kanály absorpčných tyčí atď.), ktoré neboli zahrnuté do výpočtov aktívnej zóny)	0,299
Úbytok reaktivity pri zmene teploty paliva z 20°C na 425°C	0,485
Úbytok reaktivity pri zohriatí moderátora z 20°C na 70°C	0,672
Úbytok reaktivity pri zmene parametrov chladiaceho média (CO_2)	0,003
Úbytok reaktivity na stacionárnu xenónovú otravu	2,684
Úbytok reaktivity pre samáriovú stacionárnu otravu	0,575
Úbytok reaktivity v dôsledku absorpcie neutrónov inhibítorom	0,077
Úbytok reaktivity na dosiahnutie stredného vyhorenia paliva 2 800 MWd/t_U	1,6
Zásoba reaktivity pre prekonanie jódovej jamy	1,6
Zásoba pre riadenie reaktora	0,29



Rozloženie neutrónového toku pozdĺž výšky aktívnej zóny podľa pôvodného projektu



Rozloženie neutrónového toku pozdĺž polomeru aktívnej zóny podľa pôvodného projektu

Úbytky reaktivity uvedené v tabuľke na teplotné efekty a otravy sa počítali pre rozdiel parametrov studeného reaktora pri nulovom výkone oproti parametrom reaktora pri ustálenom nominálnom tepelnom výkone podľa projektu 560 MW.

V roku 1972 vznikla technická možnosť riešiť zložitejšie výpočtové úlohy na dostupnej výpočtovej technike ako bol počítač CDC 3300 s použitím numerických výpočtových metód. V tom čase bol v EBO

vyvinutý dvojgrupový difúzny výpočtový program riešenia bilančných rovníc neutrónov v dvojrozmernej sieti (DVADIQT), ktorý bol schopný simulovať aj individuálne parametre palivových článkov (najmä typ a stredné vyhorenie) a v porovnaní s pôvodným projektom vypočítať reálnejšie neutrónovo fyzikálne parametre o rozložení výkonu v reaktore počas výkonovej prevádzky. Neskoršie vznikla aj trojrozmerná verzia programu TRIDQT. Trojrozmerný program reálnejšie predpovedal aj axiálne rozloženie výkonu (so zahrnutím čiastočne zasunutých absorbátorov v aktívnej zóne) a uvažoval sa aj účinok obidvoch axiálnych reflektorov.

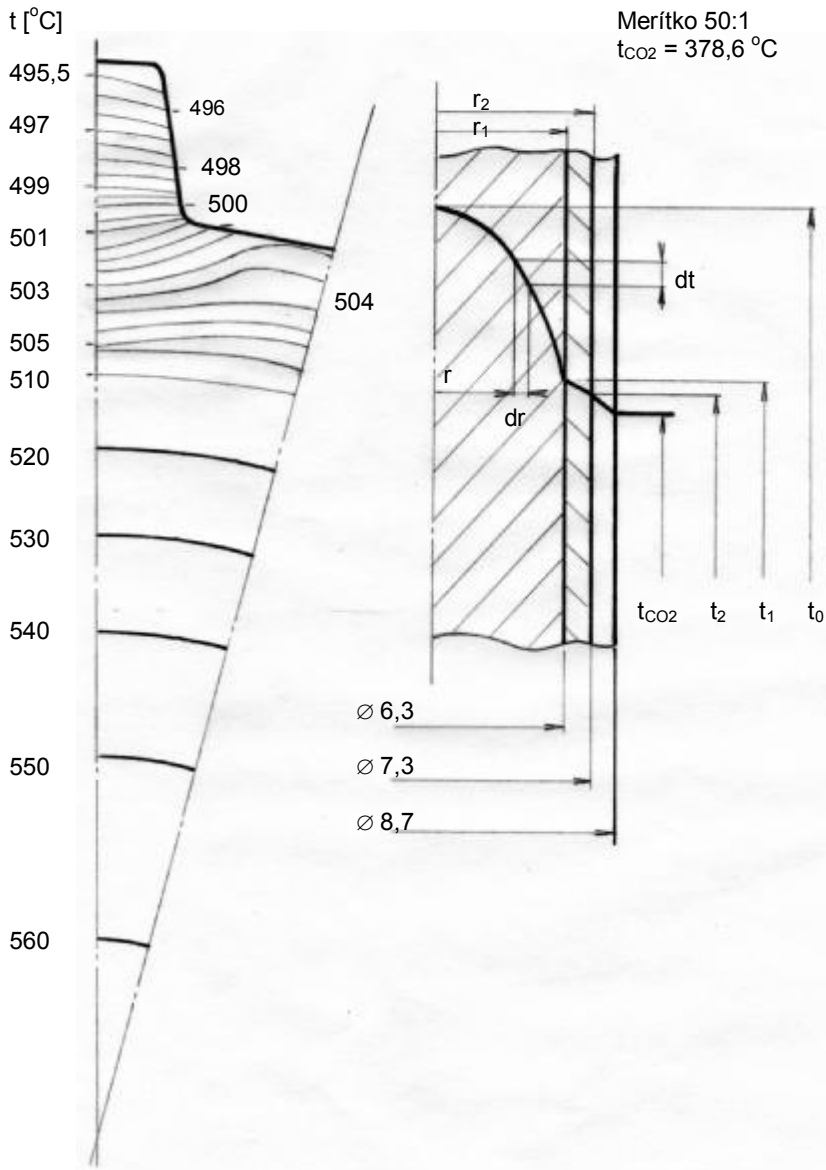
Teplotechnické parametre reaktora KS150 pri výkonovej prevádzke

Projektový tepelný výkon reaktora KS150 bol 560 MW; hrubý elektrický výkon elektrárne meraný na svorkách generátorov 143 MW, výkon do elektrickej siete 108 MW. Pre chladenie aktívnej zóny reaktora bol použitý plyn CO_2.

Základné teplotechnické parametre reaktora	
Parameter	Hodnota
Tlak CO_2 v primárnom okruhu (v studenej komore	~ 6,5 MPa
Tlak plynu na výstupe z aktívnej zóny	~ 5,5 MPa
Celkový prietok chladiva cez reaktor pri práci šiestich slučiek	5 940 t/h
Stredné špecifické teplo CO_2 v aktívnej zóne	0,264 kcal/(kg,deg)
Teplota chladiva na vstupe	112°C
Teplota chladiva na výstupe	427°C
Výkon odvádzaný chladiacim systémom D_2O	53 MW
Stredný špecifický výkon palivového prútika	12 360 kcal/m.h^{-1}
Maximálna dovolená teplota pokrytia PČ	559,5°C
Maximálna dovolená prevádzková teplota pokrytia PČ	(500 + 20)°C
Krátkodobé (počas 50 hod.) povolené zvýšenie teploty	550°C
Teplota tavenia pokrytia	~ 650°C
Maximálna hustota toku tepelných neutrónov	asi 2,6.10^{14} n/cm^2/s

Výstupná teplota z palivových článkov sa regulovala pomocou vstupných clôn na technologických kanáloch tak, aby bola približne 420°C na výstupe z každého technologického kanála. Pri tejto teplote chladiva bolo zabezpečené, že počas dlhodobej prevádzky teplota pokrytia nepresiahla 500°C a teplota uránu v centre palivového prútika pri ktorej sa menia pevnostné vlastnosti kovového uránu (prechádza z fázy α

do fázy β) nedosiahla 653°C. Tieto podmienky mali zabezpečiť tepelnú bezpečnosť aktívnej zóny a integritu paliva počas plánovaného pobytu palivových článkov v aktívnej zóne reaktora.



Teplotné pomery na palivovom prútiku podľa pôvodného projektu v kovovom uráne a v pokrytí v mieste dosiahnutej maximálnej teploty pokrytia

Počas experimentálnej prevádzky sa projektový výkon JE A1 nedosiahol, pretože počas postupného zvyšovania výkonu, po dosiahnutí tepelného výkonu reaktora okolo 500 MW (v roku 1976) sa nadmerne porušovalo pokrytie paliva s relatívne nízkym vyhorením ~1 500 MWd/tU. Preto sa reaktor prevádzkoval iba na tepelnom výkone pod úrovňou 500 MW.

Výmena paliva na reaktore KS150 mala podľa projektu prebiehať kontinuálne, t.j. mala byť pri prevádzke reaktora na plnom výkone. V prvej fáze prevádzky, t.j. v období rokov 1972 – 1973 prebiehala semikampaňovitá prevádzka reaktora s dĺžkou kampane asi jeden mesiac, po ktorej bola vymenená časť paliva pri odstavenom reaktore. Po získaní dostatočných skúseností sa začala kontinuálna výmena paliva pri výkonových stavoch reaktora .

Stratégia výmeny palivových článkov sa zvolila tak, aby sa výkon reaktora vyrovnával pozdĺž prierezu aktívnej zóny a aby neboli relatívne veľké skoky výkonu na susediacich palivových článkoch. Popritom sa uvažovalo, že novo zavezený palivový článok by mal na danom mieste dosiahnuť približne plánované vyhorenie. Program výmeny paliva zohľadňoval aj palivové články, na ktorých bolo porušené pokrytie podľa údajov systému kontroly tesnosti pokrytia a ktoré boli vymenené pred dosiahnutím plánovaného vyhorenia.

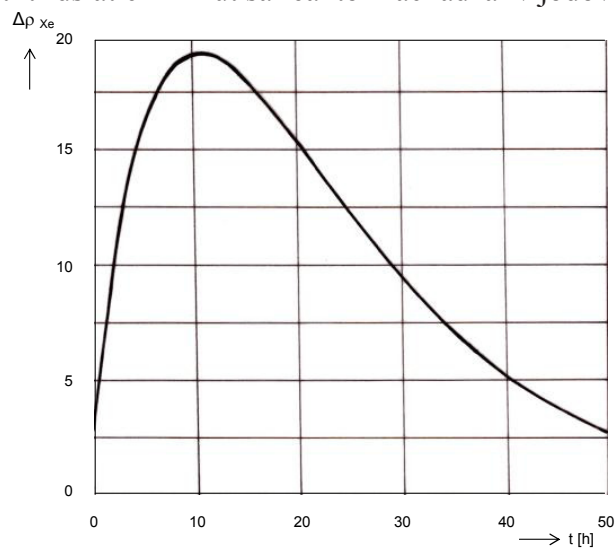
Pri kontinuálnej výmene paliva počas zasúvania čerstvého palivového článku do aktívnej zóny bolo potrebné znížiť výkon reaktora tak, aby výstupná teplota chladiva zo zasúvaného článku neprekročila úroveň, pri ktorej by mohlo vznikať neprijateľná deformácia technologických kanálov vplyvom teplotného namáhania. Pre takéto operácie operátor reaktora mal k dispozícii podklady v tabuľkovej a grafickej forme. Pomocou nich určil dobu, za ktorú má zvýšiť výkon reaktora na východiskový výkon pri zohľadnení povolenej rýchlosti zvyšovania výkonu, aby prevádzka nebola nepriaznivo ovplyvnená xenónovou otravou.

Plánované stredné vyhorenie uránu v palivových článkoch podľa pôvodného projektu bolo 2 800 MWd/t_U. V rámci experimentálnej prevádzky reaktora sa realizoval aj projekt zameraný na určenie maximálneho vyhorenia, pri ktorom si palivové články zachovávajú svoju funkčnosť, t.j. že nebude porušené pokrytie. V rámci tohto experimentálneho programu sa zistilo, že pre prvú generáciu palivových článkov sa zachovala tesnosť pokrytia paliva do stredného vyhorenia asi 4 000 MWd/tU a v druhej vylepšenej generácii palivových článkov sa tesnosť pokrytia paliva zachovala až do stredného vyhorenia asi 4 500 MWd/tU.

Reaktor pracoval pri vysokej hustote toku tepelných neutrónov. Stredná hustota toku tepelných neutrónov pri projektovom výkone reaktora mala byť 1,255.10^{14} n/cm2/s pri teplote neutrónového plynu 425°K, maximálna hustota toku tepelných neutrónov bola 2,6.1014 n/cm2/s.

Pri takýchto vysokých hodnotách hustoty toku neutrónov pri znižovaní výkonu reaktora respektíve po skokovom znížení výkonu reaktora nastal veľký pokles reaktivity.

Pri skokovej zmene výkonu zo 100 % na 0 % v maxime prevyšoval 15 %. Takýto úbytok prevyšoval aj celkovú zásobu reaktivity reaktora a v dôsledku toho reaktor nemohol byť uvedený do kritického stavu ani na nízkom výkone dovtedy, kým sa rádioaktívnou premenou nerozpadol nahromadený ^{135}Xe. Reaktor sa nachádzal v tzv. „jódovej jame“. Podľa priebehu zápornej reaktivity ^{135}Xe pri rýchlom odstavení reaktora z 100 %-ného výkonu na 0 % sa asi po pätnástich minútach vyčerpala zásoba reaktivity udržiavaná v reaktore na nestacionárnu xenónovú otravu a asi po uplynutí tridsiatich minút sa reaktor nachádzal v jódovej jame.



Zmeny reaktivity reaktora po skokovej zmene výkonu zo 100 % N_{nom} na nulový výkon

Charakteristiky zmerané pri fyzikálnom spúšťaní

Fyzikálne spúšťanie reaktora KS150 prebiehalo v dňoch 4.10.1972 až 21.11.1972. V programe fyzikálneho spúšťania zostalo po niekoľkonásobnej korekcii zaradených celkom dvanásť testov, z toho desať bolo pri tzv. nízkej hladine ťažkej vody v aktívnej zóne reaktora. Testy pri nízkej

hladine moderátora boli zaradené na overenie skutočných vlastností fyzikálnej kompozície aktívnej zóny prototypového reaktora KS150 a mali za cieľ overiť kritické rozmery aktívnej zóny, váhu (kompenzovanú reaktivitu) regulačných orgánov, rozloženie výkonu v aktívnej zóne, koeficient produkcie plutónia a účinnosť biologických ochrán umiestnených vo vnútornom priestore tlakovej nádoby. Teória bola založená na analytických matematických metódach. Čistá aktívna zóna bez prítomnosti absorbátorov sa najviac podobala modelom použitým v projektových výpočtoch. Vzhľadom na veľmi intenzívnu teoretickú a praktickú prípravu poskytli tieto experimenty veľmi kvalitné výsledky.

Testami sa preukázala dobrá zhoda výpočtových a experimentálnych hodnôt fyzikálnych parametrov, dostatočná zásoba reaktivity studeného, neotráveného reaktora s čerstvým palivom na dosiahnutie projektovaného vyhorenia paliva 2 800 ÷ 3 000 MW/tU, vyhovujúca zásoba podkritičnosti reaktora so všetkými absorbátormi v aktívnej zóne a účinnosť biologickej a ochrany reaktora v zhode s projektom.

Okrem toho sa pri testoch s nominálnou hladinou D_2O zistilo, že zasunutie absorpčných tyčí do aktívnej zóny má veľký vplyv na rozloženie neutrónového toku v ich bezprostrednom okolí a tiež na rozloženie neutrónového toku v aktívnej zóne. Na obmedzenie takéhoto nepriaznivého stavu sa odporučilo upraviť absorpčnú časť vybraných kompenzačných tyčí tak, aby sa dalo riadiť rozloženie neutrónového toku pozdĺž výšky aktívnej zóny.*

Hľadanie optimálneho spôsobu kompenzácie prebytku reaktivity bolo súčasťou programu energetického spúšťania. Možnosť kalorimetricky merať výkony jednotlivých palivových kaziet v reaktore, ktorou bol reaktor KS150 vybavený, významne uľahčila túto úlohu.

Fyzikálne charakteristiky aktívnej zóny reaktora KS150 sa testovali a riešili aj v etape energetického spúšťania – pri energetických parametroch reaktora. Okrem už spomínaného rozloženia neutrónového toku a výkonu v aktívnej zóne sa overovali teplotný koeficient reaktivity moderátora a absorpčných tyčí, otrava reaktora xenónom a samáriom, kalibrácia absorpčných tyčí, vplyv prázdnych technologických kanálov na reaktivitu a napokon aj zmeny reaktivity v dôsledku zhoršovania izotopického zloženia D_2O.

---

* Tvarovacie tyče s absorbátorom iba v dolnej časti nevyhovujú súčasným požiadavkám na jadrovú bezpečnosť, pretože takáto konštrukcia umožňuje pri zasúvaní do reaktora dosiahnuť parciálny kladný prínos reaktivity do reaktora.

8. PALIVOVÉ ČLÁNKY

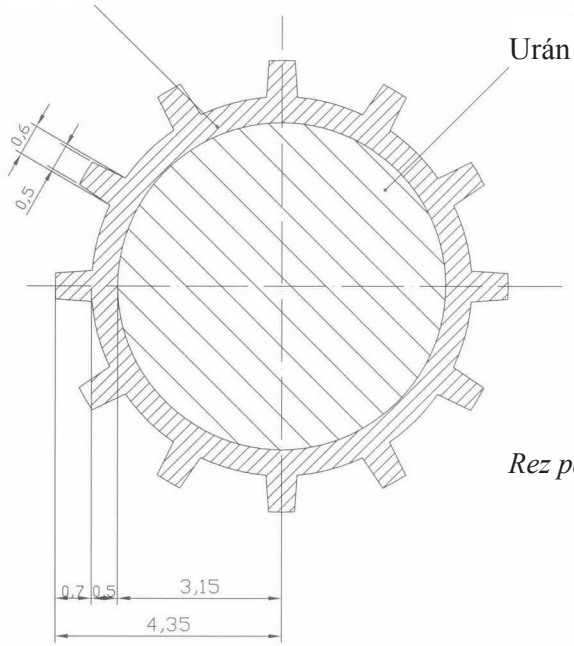
Konštrukcia palivových článkov

V elektrárni A1 sa používali dva typy palivových článkov. V centrálnych článkoch bolo sedemdesiatpäť uránových prútikov a mali ∅112 mm, periférne články mali šesťdesiattri uránových prútikov a ∅100 mm. Konštrukčná výška obidvoch typov palivových článkov bola 4 765 mm. Uránové prútiky z kovového prírodného uránu boli rovnaké v centrálnych aj v periférnych palivových článkoch.

Uránové prútiky mali priemer 6,3 mm, dĺžku 390 cm a rebrované pokrytie, pre lepší odvod tepla. Pokrytie palivových prútikov bolo zo pseudozliatiny Mg+Be (zloženie Mg 98 %, 2 % Be). Na obidvoch koncoch palivového prútika boli privarené titánové koncovky. Na každom prútiku bolo šesť rámových puzdier – protektorov – vyrobených zo zirkóniového plechu, ktoré zabezpečovali vzájomnú polohu jednotlivých prútov upevnených v hlavici palivového článku. Celý zväzok palivových prútov bol umiestnený v zirkóniovej obalovej rúre, na spodku ktorej bola mriežka na zachytenie prípadne vypadávajúcich palivových prútikov. Prostredníctvom spojky bol celý tento komplet spojený so závesnou tyčou ∅20 mm, na ktorej bola umiestnená biologická uzatváracia zátka. Pomocou tejto tyče sa článok spúšťal do dochladzovacej zóny reaktora, alebo vyťahoval z nej zavážacím strojom spojeným tesne s technologickým kanálom. Pripojením ďalšej tyče ∅36 mm sa článok mohol žeriavom spustiť do aktívnej zóny, alebo vytiahnuť z nej do dochladzovacej zóny.

Vo vnútornej osi palivového článku sa nachádzala rúrka s termočlánkom, ktorým sa merala teplota vystupujúceho chladiaceho plynu. V niektorých kazetách bol termočlánok aj v jednotlivých palivových prútikoch. Merala sa ním teplota uránu. Na každom polomere mreže reaktora boli umiestnené dva palivové články, v ktorých sa merala teplota uránového jadra dvoch palivových prútikov. Palivový článok bol umiestnený v reaktore v technologickom kanáli, cez ktorý prúdil chladiaci plyn. Čerstvé palivové články spojené závesnými systémami sa skladovali vo zvislých puzdrách, prístupných z reaktorovej sály.

Pokrytie



Rez palivovým prútikom

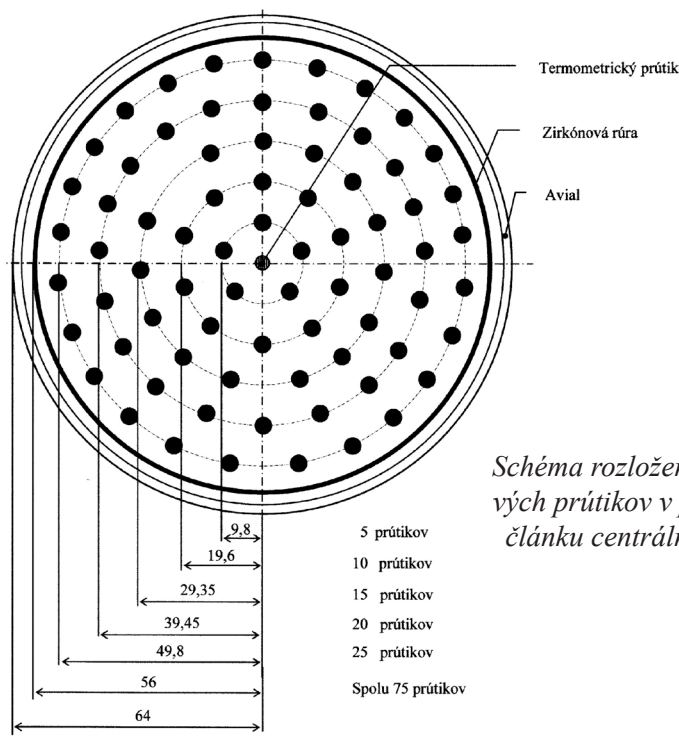


Schéma rozloženia palivových prútikov v palivovom článku centrálneho typu

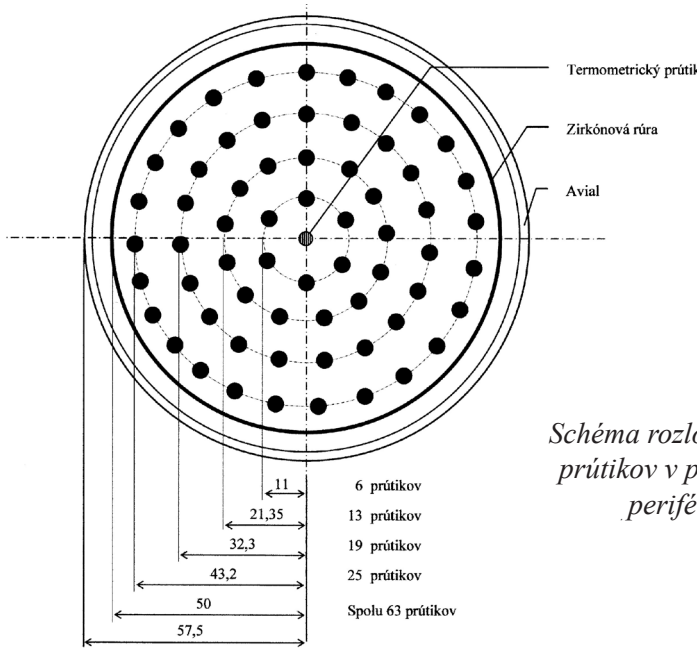


Schéma rozloženia palivových prútikov v palivovom článku periférneho typu

Dielňa montáže palivových článkov – kompletovanie zväzku prútov

Horná časť kompletného palivového článku

Palivové články sa montovali v elektrárni z dovezených palivových prútov a z konštrukčných prvkov vyrobených v Československu. Prúty boli rozdelené podľa indexu radiačného rastu do troch skupín a pri montáži sa do jedného článku dávali prúty s rovnakým indexom. Index sa určoval podľa elektrického odporu prúta.

Základné parametre paliva	
Parameter	**Hodnota**
Maximálna teplota pokrytia	500°C. Pre I. etapu spúšťania 450°C
Maximálne vyhorenie	3 600 MWdní/tU, stredné 2 800 MWdní/tU
Maximálne tepelné zaťaženie	53 kW/kgU. Pre I. etapu spúšťania 44 kW/kgU
Celkový výkon článku	5,75 MW v centrálnej zóne 4,2 MW v perifernej zóne
Doba pobytu v reaktore	100 dní pre články v centrálnej zóne 200 dní pre články v perifernej zóne

Dielňa montáže palivových článkov – kontrola palivových prútikov

V počiatočnom období prevádzky bolo potrebné predovšetkým presvedčiť sa, že v reaktore je možné zabezpečiť spoľahlivé chladenie palivových článkov a že existuje také rozloženie výkonu, pri ktorom sa palivové články nadmerne neprehrejú ani v najviac zaťažených miestach.

Overoval sa prietok plynu jednotlivými technologickými kanálmi, nastavovali sa vstupné škrtiace okná tak, aby prietoky jednotlivými kanálmi zodpovedali vývinu energie a dosiahla sa približne rovnaká teplota na výstupe z palivového článku. Za optimálne rozloženie polohy tyčí v aktívnej zóne bolo považované také rozloženie, ktoré by nemalo silný vplyv na deformáciu polí vývinu tepla a nevyvolávalo silné skoky neutró-

nového poľa, ktoré by mohli viesť k prehriatiu jednotlivých palivových prútikov počas prevádzky na stabilnom výkone. Prípustnou teplotou pre povrch palivových článkov v I. etape energetického spúšťania bola hodnota 400°C v najteplejšom mieste.

Do činnosti sa museli uviesť systémy na kontrolu prevádzkových parametrov palivových prútikov.

Prvým bol systém individuálnych meraní teplôt jednotlivých palivových prútikov. K tomu slúžili termočlánky merajúce teplotu CO_2 na výstupe z technologických kanálov vo všetkých kanáloch a termočlánky merajúce teplotu uránových prútikov v tridsiatich šiestich palivových súboroch. Pri strate informácie o teplote plynu na výstupe z palivového článku, čo i len z jediného termočlánku, nebolo povolené reaktor spustiť.

Dielňa montáže palivových článkov – montáž termočlánkov

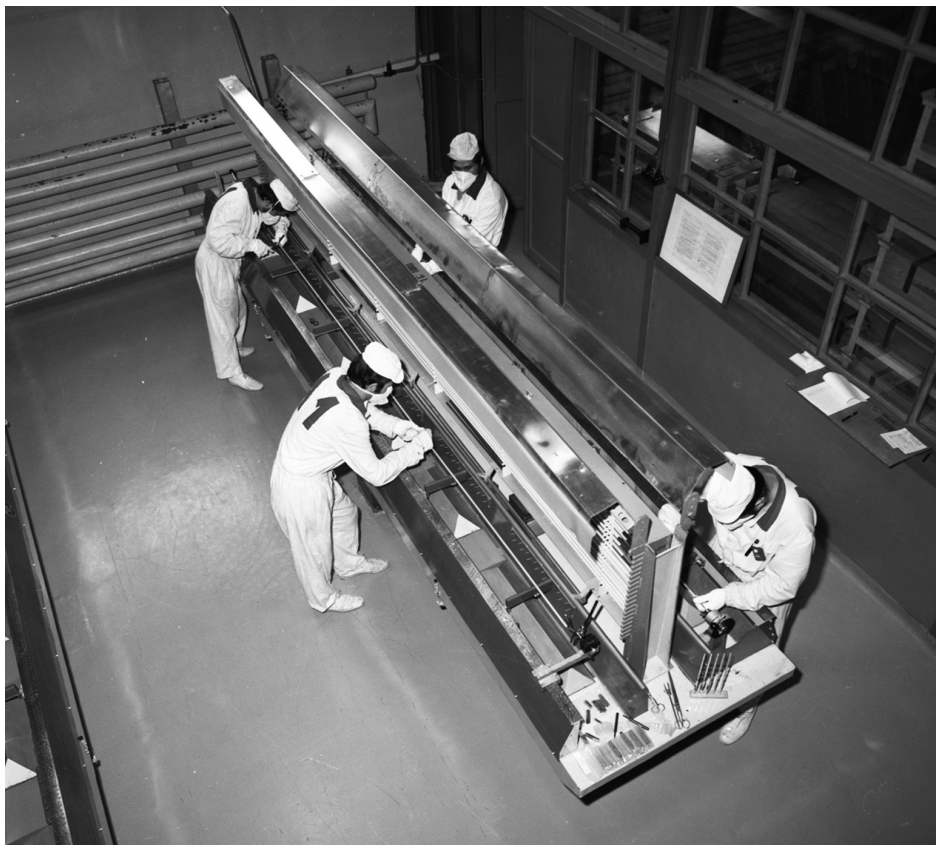
Druhým systémom individuálnej kontroly palivových článkov bol systém kontroly tesnosti pokrytia. Tento systém bol počas prevádzky naladený tak, aby sa netesnosť pokrytia palivového prútika okamžite zaregistrovala. Následne článok s porušeným pokrytím mal byť vyvezený z reaktora. Súčasťou spúšťacích prác bolo spoznanie funkcie systému kontroly tesnosti pokrytia v reálnych podmienkach a určenie kritérií, podľa ktorých bolo pokrytie hodnotené ako porušené.

Hlavnou úlohou etapy energetického spúšťania, bolo presvedčiť sa o prevádzkyschopnosti palivových článkov pri teplotách na povrchu v rozmedzí 400°C ÷ 480°C až do dosiahnutia stredného projektového vyhorenia 3 200 MWdní/tU. Ukázalo sa, že v palivových článkoch v prevádzkových režimoch až do tlaku CO_2 v reaktore 6,0 MPa pri teplote plynu do 370°C na výstupe a pri teplotách povrchu do 480°C, sa dala dosiahnuť hĺbka vyhorenia viac ako 6 000 MWdní/tU v miestach maximálneho vyhorenia.

Pole vývinu tepla sa v počiatočnom období prejavilo ako veľmi nesymetrické pozdĺž výšky aktívnej zóny, maximum bolo mierne posunuté pod stred aktívnej zóny, čo nebolo optimálne z teplotechnického hľadiska. Rozloženie výkonu sa upravilo po zavedení špeciálnych skrátených korektívnych absorpčných tyčí, ktoré umožnili priblížiť rozloženie vývinu tepla pozdĺž výšky aktívnej zóny ku kosínusovému tvaru. Ladenie prietokov a voľba optimálneho umiestnenia regulačných a skrátených tyčí v aktívnej zóne ukázali, že existuje možnosť nájsť spôsob, ktorý bol prijateľný z hľadiska teplotechniky aktívnej zóny.

O viacerých vlastnostiach paliva, o reálnych parametroch aktívnej zóny a palivových článkov nebolo dosť informácií. Preto sa rozhodlo na ich overenie zaradiť do spúšťania rozsiahly program hromadného sledovania charakteristík palivových článkov, nazvaný HREX.

Do prvej náplne boli v rámci tzv. hromadného experimentu umiestnené špeciálne články, ktoré umožňovali zistiť mnoho údajov o chovaní sa palivových článkov počas prevádzky.



Dielňa montáže palivových článkov

Prehľad typov špeciálnych palivových článkov pre hromadný experiment			
Označenie testu	**Názov testu**	**Typ článku**	**Počet**
HREX – 1	F – Úpravy a prehliadka palivových článkov po fyzikálnom spúšťaní	∅112 – N – A/F ∅100 – N – A/F	2 2
HREX – 2	G – Meranie teplotných gradientov	∅112 – T – A/G ∅100 – T – A/G	6 4
HREX – 3	S – Skúšky sovietskych termočlánkov	∅112 – T – S/A ∅112 – T – SM ∅112 – T – SM ∅100 – T – S/A ∅100 – T – SM ∅100 – T – SM	1 1 1 1 1 1
HREX – 4	P – Poradiačné hodnotenie palivových článkov	∅112 – N – A/P ∅100 – T – A/P	4 1
HREX – 5	E2 – Profil teploty plynu na výstupe z palivového článku	∅112 – E2	1

Teplota palivových článkov bola počas fyzikálneho spúšťania najviac 85°C , priemerná 20 ÷ 35°C, vlhkosť CO_2 bola menšia ako 3 000 ppm a obsah oleja menší ako 10 ppm.

Už 16. 10. 1972 bol z reaktora vytiahnutý palivový článok typu F, na ktorom sa urobila podrobná prehliadka. Nezistili sa žiadne deformácie, ale medzi rebrami sa našli drobné kovové častice, čo upozornilo na nutnosť kontrolovať čistotu chladiva primárneho okruhu. Zistila sa výrazná závislosť teploty článkov na polohe kompenzačných tyčí.

Pre energetické spúšťanie sa použili vo väčšine prípadov palivové články zavezené pred fyzikálnym spúšťaním. Vymenené boli iba palivové články použité na fyzikálne testy. Na začiatku energetického spúšťania bol tepelný výkon reaktora 14,83 MW, v prvej časti I. etapy 151,77 MW a druhej časti I. etapy 165,4 MW. Teplota dosiahla 279°C ÷ 378°C. Pre II. etapu energetického spúšťania boli vymenené niektoré palivové články na poradiačné hodnotenie, alebo boli nahradené experimentálnymi palivovými článkami. Hromadný experiment sa rozšíril o ďalšie merania. Pokračovali testy HREX - 2 až 5, ale s iným počtom kaziet.

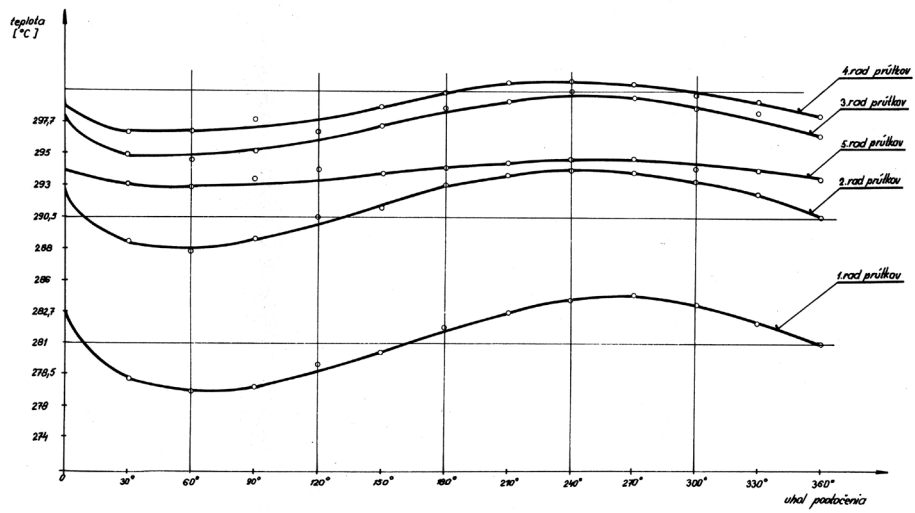
Prehľad typov špeciálnych palivových článkov pre hromadný experiment v II. etape

Označenie testu	Názov testu	Typ palivových článkov	Počet
HREX – 6	Vývin tepla pozdĺž výšky palivových kaziet pomocou kalorimetrov	∅112 – N – A/E1 ∅100 – N – A/E1	1 1
HREX – 7	Meranie teplotných gradientov pozdĺž polomeru prútika – pokrytie a jadro	∅112 – T – A/E3 ∅100 – T – A/E3	1 1
	Meranie neutrónového toku samonapájacími detektormi	∅112 – N – A/ND	3
HREX – 8	Meranie teploty pozdĺž polomeru prútika	∅100 – N – A/E4	1

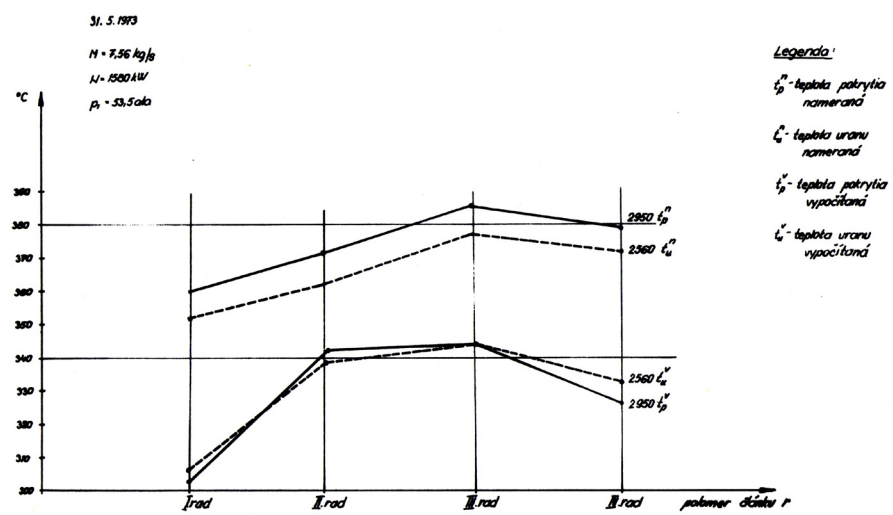
Stredný tepelný výkon bol maximálne 403 MW, teplota pokrytia bola do 480°C, tlak v komore studeného plynu 5,1 až 6,4 MPa. Stredné projektové vyhorenie 2 800 MWdní/tU dosiahlo alebo prekročilo sedemdesiattri článkov, u štyroch bolo viac ako 4 100 MWdní/tU. Maximálne vyhorenie prútika v týchto článkoch bolo viac ako 7 477 MWdní/tU. Na prevažnej časti palivových prútikov bola maximálna teplota pokrytia 480°C. Podľa údajov termometrických kaziet mohla byť teplota pokrytia až 510°C. Predpokladalo sa, že je to spôsobené dotykom prútikov tretej skupiny indexu radiačného rastu a vysunutím protektorov zo vzájomného záberu. Konzervatívne bola teplota takýchto kaziet znížená zväčšením prietoku chladiaceho plynu cez kazetu.

Na meranie teplotných gradientov pozdĺž prierezu sa využila konštrukcia palivových kaziet a možnosti ich otáčania v aktívnej zóne.

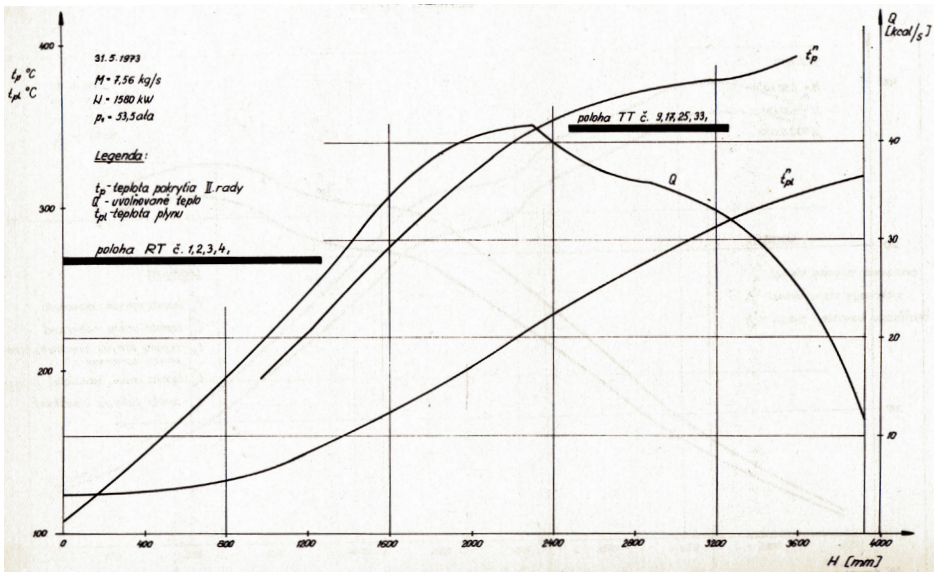
Zmeny v teplotnom profile plynu boli skokovité, vždy po zmene výkonu, prietoku a polohy kompenzačných tyčí.



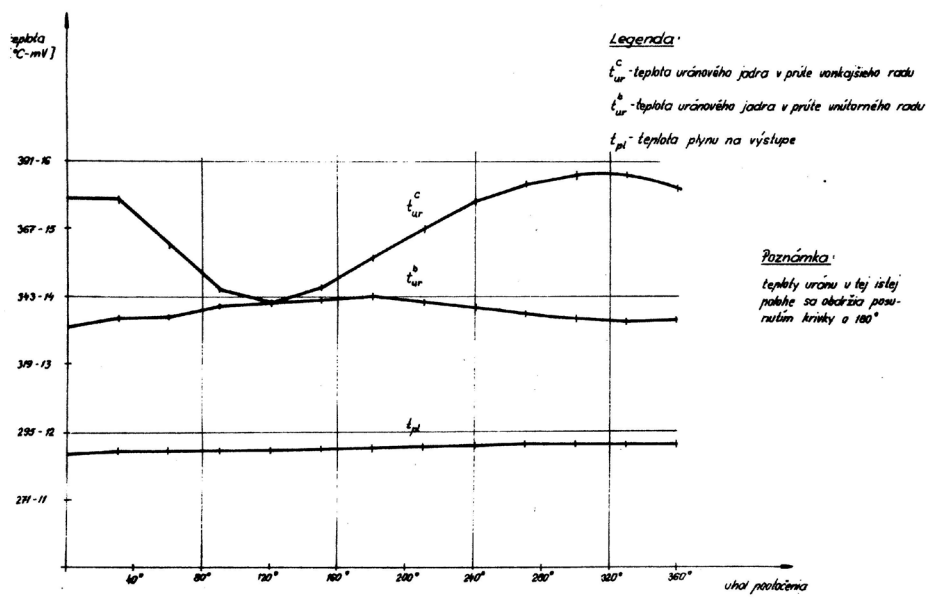
Charakteristický profil teploty plynu na výstupe z palivového článku pri jeho otáčaní



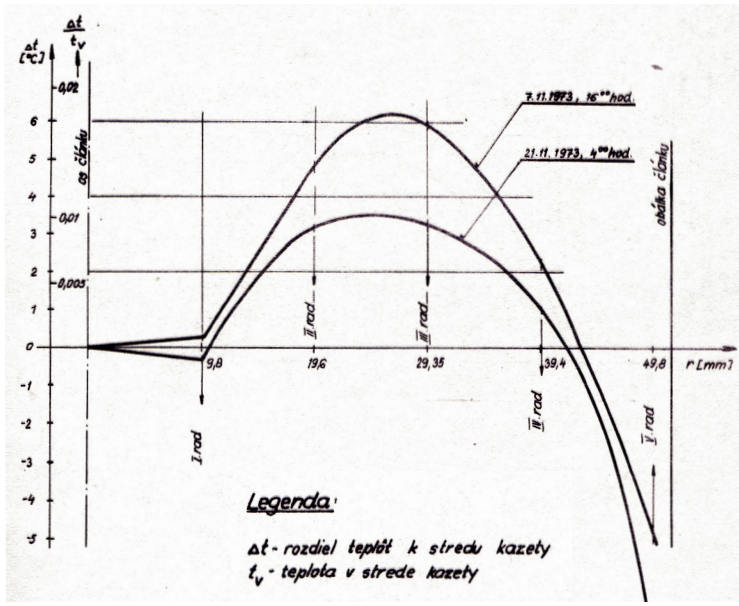
Graf teploty palivového prútika pozdĺž prierezu palivového článku



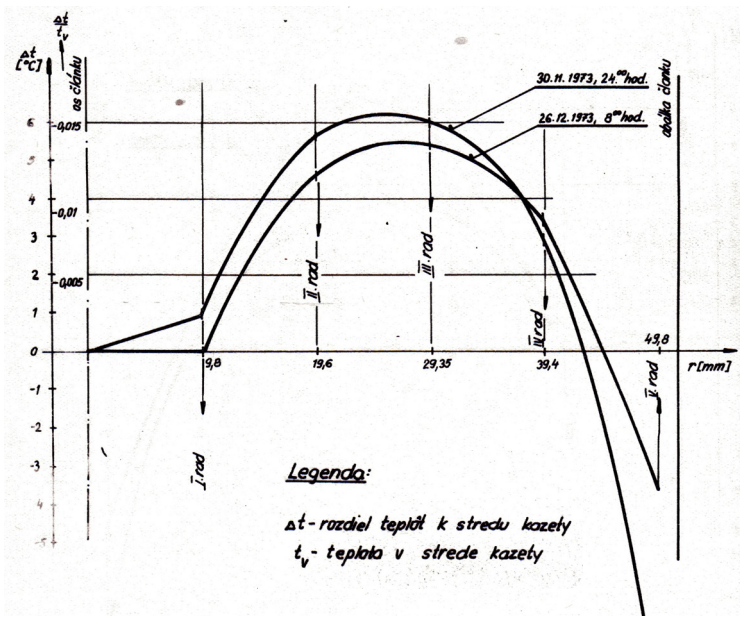
Rozloženie vývinu tepla, teploty pokrytia a teploty plynu v aktívnej zóne pozdĺž výšky



Závislosť teploty od uhla otočenia palivového článku E08. Horná krivka znázorňuje rozdiel medzi maximálnou a minimálnou teplotou vonkajšieho termometrického prútika a dolná krivka znázorňuje rovnaký rozdiel pre vnútorný termometrický prútik pri otáčaní článku.



Charakteristický profil teploty plynu na výstupe z palivového článku – E2 - Ø112 mm - krivka 1. Tvar je charakteristický pre obdobie, keď výkon a prietok sa nemenili. Profil sa postupne zmenil z krivky 1 na krivku 2 vplyvom zmeny polohy kompenzačných a regulačných tyčí.



Charakteristický profil teploty plynu na výstupe z palivového článku – E2 - Ø112 mm - krivka 2. Tvar je charakteristický pre obdobie s ustáleným výkonom. Zmenu profilu spôsobila zmena polohy kompenzačných tyčí.

Hodnotenie stavu palivových článkov a hromadné experimenty HREX – 2 až HREX – 8 pokračovali i v roku 1974. Spresňovali sa výsledky z predchádzajúcej etapy energetického spúšťania. Prevádzka sa riadila tak, aby teplota pokrytia neprevýšila 480°C. Zmenili sa termometrické palivové prútiky na typ G, predĺžili sa protektory a tak sa zmenšila deformácia palivových prútikov. Významne sa zdokonalil výpočet maximálnej teploty pokrytia paliva, čo umožnilo povoliť zvýšenie teploty pokrytia na 500°C.

Poškodzovanie pokrytia sa osobitne sledovalo so snahou určiť príčiny. Poškodené pokrytie okrem ekonomických škôd – bolo treba predčasne meniť nevyhorené palivo – spôsobovalo zhoršovanie radiačnej situácie a najmä uvoľňovanie štiepnych produktov, vrátane uránu a plutónia do primárneho okruhu a pri netesnostiach aj do prevádzkových priestorov. Preto sa robila podrobná analýza možných príčin porušovania pokrytia.

Ako možné príčiny boli posudzované:

- vplyv umiestnenia v reaktore,
- vplyv technologického kanála,
- vplyv odstávok a náhlych zmien prevádzkových parametrov reaktora,
- vplyv skosu neutrónového toku,
- vplyv typu článku – termometrické, rôzne indexy rastu,
- vplyv montáže, manipulácie a termínu dodávky,
- vplyv doby skladovania a dĺžky zavezenia v reaktore,
- vplyv vyhorenia.

Napriek rozsiahlej analýze sa príčiny porušovania pokrytia nepodarilo jednoznačne zistiť. Zdalo sa, že pri teplotách pokrytia v rozsahu 480°C až 490°C sa zmenšovali zmeny geometrie. Pri porovnateľnom vyhorení boli defekty pokrytia podstatne menšie v druhej náplni paliva. Zmena dĺžky prútikov sa merala iba v kazetách s malým porušením pokrytia. Zistilo sa, že v skupinách s indexom rastu 1 a 2 bolo skrátenie malé, predĺženie v skupine 1 a 2 nebolo väčšie ako 2 %. V skupine prútikov s indexom rastu 3 bolo skrátenie menšie ako 1 % pri strednom vyhorení 3 000 až 5 000 MWdní/tU. So zväčšovaním vyhorenia sa prútiky predlžovali a pri strednom vyhorení asi 4 000 MWdní/tU dosiahli pôvodnú dĺžku.

Z celkového počtu 148 palivových článkov prvej náplne bolo podľa údajov systému kontroly tesnosti pokrytia porušených tridsaťšesť článkov. Z nich podstatná časť mala porušené pokrytie pri vyhorení v intervale 4 000 až 5 500 MWdní/tU. Toto boli hodnoty prekračujúce projektovanú medzu životnosti a predpokladalo sa, že sa pri ich dosiahnutí podstatne zhoršujú mechanické vlastnosti pokrytia a spolu s radiačným rastom spôsobujú porušovanie pokrytia.

Pre ďalšiu prevádzku boli rozpracované dve konštrukcie zdokonalených palivových kaziet. Variant označený R-R bol bez dištančných protektorov a palivové prútiky boli vzájomne dištancované buď vysokými rebrami z pokrytia alebo vysokými rebrami usporiadanými do zväzku, na ktorý bola navlečená obalová rúra. Tento variant sa skúšal v neaktívnych podmienkach.

Druhý variant palivových kaziet označený R-M mal dištancovanie pomocou dovtedy používaných zirkóniových elementov, alebo z upravených dištančných objímok. Variant bol rozpracovaný do troch typov:

- Typ R-1U mal zosilnené pokrytie z 0,5 mm na 0,8 mm. Bol zavezený do reaktora a osvedčil sa.
- Typ R-4P mal konštrukciu zosilnenú zirkóniovým stredovým prútikom s priemerom 1,6 mm. Dva palivové články tohoto typu boli pripravené na zavezenie.
- Typ R-3 mal zväčšený priemer uránového jadra o 1,6 mm, pokrytie bolo zosilnené na 0,95 mm a použili sa nové dištančné objímky. Palivom bol legovaný urán. Na zavezenie boli pripravované štyri palivové články.

V období od 1. 10. 1974 až do havárie 5. januára 1976 bola teplota pokrytia v intervale 480°C ÷ 500°C. Po opätovnom uvedení elektrárne do prevádzky 19. júna 1976 sa rozhodlo zvýšiť teplotu pokrytia na 520°C. Bezprostredne po zvýšení teploty sa zväčšil počet porušenia tesností pokrytia paliva zisteného systémom kontroly tesnosti. Od 1. 10. 1974 do 1. 10. 1976 sa vymenilo 203 palivových článkov, z nich malo šesťdesiatsedem porušené pokrytie podľa údajov systému kontroly tesnosti pokrytia. Počas normálnej prevádzky to bolo dvadsaťšesť kaziet, ostatné boli poškodené pri havárii 5.1.1976 alebo po zvýšení teploty na 520°C.

Poradiačné hodnotenie v horúcej komore

Palivové články sa skúmali v horúcej komore podľa programu alebo vtedy, keď systém kontroly tesnosti pokrytia signalizoval jeho porušenie.

Po zavezení do horúcej komory bola najskôr odrezaná a stiahnutá obalová rúra. Potom sa urobila fotodokumentácia stavu palivového zväzku, merala sa vzdialenosť medzi jednotlivými radami protektorov, hodnotil sa stav pokrytia, deformácie a iné nepravidelnosti v tvare.

Ďalej bolo merané predĺženie prútov spôsobené radiačným rastom. Priemerné predĺženie bolo 15 až 25 mm, najväčšie bolo 110 mm. Hodnoty predĺženia v závislosti od indexu rastu mali veľký rozptyl. Usudzovalo sa, že dôvodom je nerovnomerné vyhorenie a nerovnaké teplotné pomery v reaktore.

Poradiačné hodnotenie palivových článkov v II. etape energetického spúšťania v horúcich komorách v A1 a v ÚJV Řež bolo zamerané najmä na získanie podkladov o celkovom stave palivových článkov v závislosti od veľkosti vyhorenia, o tvarových a rozmerových zmenách prútikov, vrátane vplyvu radiačného rastu a o miestach a príčinách porušenia pokrytia.

Do 31.1.1974 sa v horúcej komore prehliadlo osem palivových kaziet, z toho štyri mali porušené pokrytie podľa údajov systému kontroly tesnosti pokrytia. Na konštrukčných častiach sa nezistili defekty, rozmery obalovej rúry boli rovnaké ako pred zavezením do reaktora. Defekty pokrytia boli na rôznych miestach, bol pozorovateľný skorodovaný urán a niektoré palivové prútiky boli pretrhnuté.

Pokrytie jedného z prezeraných palivových článkov, dochladzovaného dvadsaťjeden dní v chrompiku, bolo veľmi poškodené, popraskané a odlúpnuté od prútika. Na zistenie príčiny bol prezeraný aj iný palivový článok, ktorý sa dochladzoval v chrompiku štyridsaťšesť dní, ale pokrytie nebolo poškodené.

Plné prútiky okolo termometrického prútika boli skrivené, na jednom z nich protektor vyšiel zo záberu. Skrivenie spôsobila nedostatočná veľkosť vzájomného záberu protektorov na termometrických a plných prútikoch a skracovanie vplyvom vyhorenia. V palivových článkoch bez termometrických prútikov bolo skrivenie malé. Potvrdilo sa, že zmena rozmerov prútikov závisí od skupiny indexu radiačného rastu.

Prehliadky v horúcej komore v ÚJV Řež potvrdili niektoré výsledky získané v horúcej komore A1. Naviac bola urobená metalografická ana-

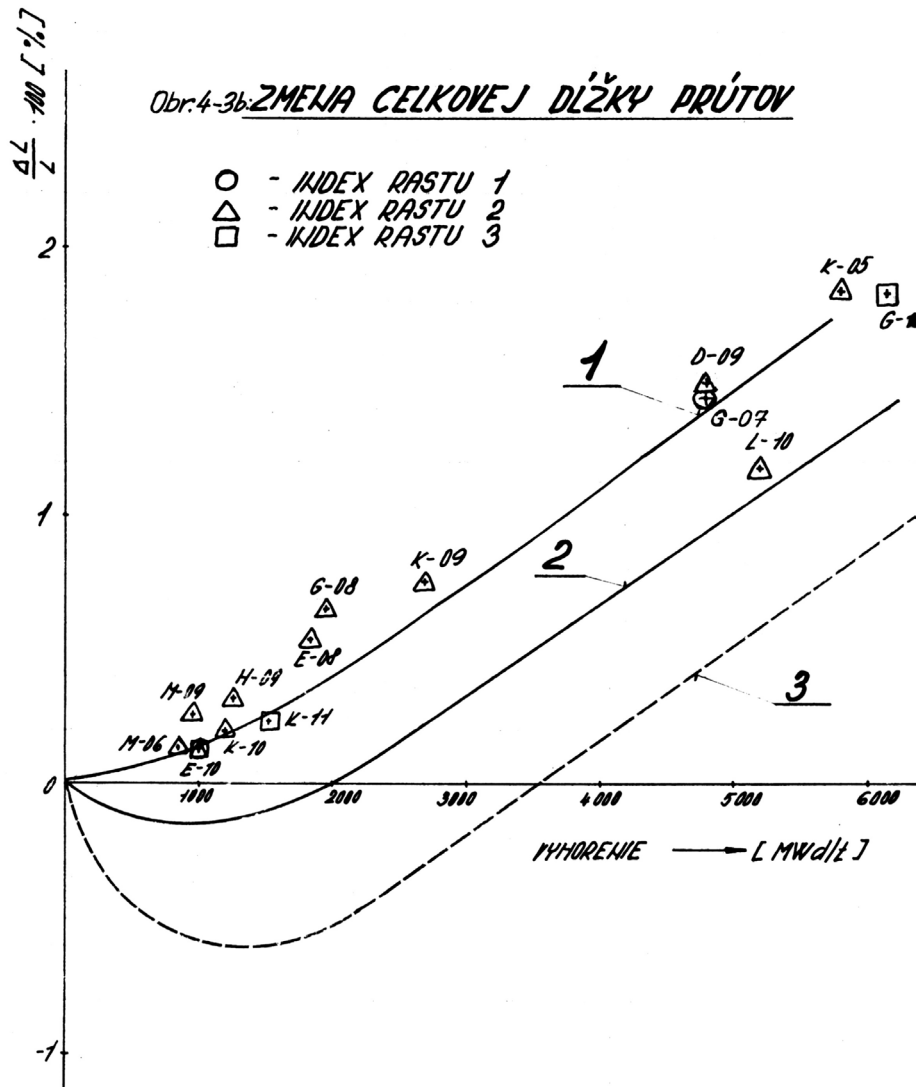
lýza, zmerané mechanické vlastnosti a merná hmotnosť v závislosti od teploty a vyhorenia. Rádioachemickou analýzou bolo určené maximálne vyhorenie a bol zmeraný obsah plutónia v uránovom jadre a v pokrytí.

Poradiačné hodnotenie palivových článkov pokračovalo aj v roku 1974, kedy do 30. 9. 1974 bolo v horúcej komore prehliadnutých dvadsaťtri palivových kaziet. Hodnotili sa zmeny geometrie, stav defektov pokrytia, stav konštrukčných častí a vizuálne sa hodnotilo znečistenie koróznymi produktami. Hodnotenie bolo zložitejšie, pretože vo viacerých článkoch bolo veľmi poškodené pokrytie a nebolo možné stiahnuť obalovú rúru. Stav pokrytia a veľkosť defektov sa dali dobre hodnotiť na kazetách, ktoré boli pred zavezením do horúcej komory dochladzované v CO_2 a nie v chrompiku. Väčšie poškodenie pokrytia bolo na kazetách s vysokým vyhorením.

Od 1. 10. 1974 do 30. 5. 1976 bolo v horúcej komore hodnotených dvadsaťjedna kaziet v rámci programu hromadného experimentu. Hodnotil a vonkajší vzhľad kaziet, konštrukčných častí a stav palivových prútikov. Obalové rúry mali pôvodné rozmery a neboli deformované. Protektory neboli poškodené, pevne sedeli v drážkach a neboli posunuté na prútikoch. Aj ostatné konštrukčné časti boli nepoškodené. Na prútikoch sa hodnotilo ich zakrivenie, prekrytie protektorov, defekty a stav pokrytia. Boli zistené dva typy zakrivenia – zakrivenie spôsobené malým prekrytím protektorov najmä u termometrických prútikov a zakrivenie prútikov, ktoré mali dostatočne dlhé vedenie. Tento typ zakrivenia bol najčastejšie na prútikoch z tretej skupiny indexu rastu.

Zmenšenie vzájomného prekrytia protektorov alebo úplné vysunutie zo záberu spôsobilo porušenie pôvodnej geometrie a nekontrolované odchýlky od predpokladaných teplôt.

Defekty pokrytia boli väčšinou na vonkajšom rade prútikov v oblasti maxima teploty na palivovom prútiku a neutrónového toku. Pri defektoch bol spravidla obnažený urán.



Zmena celkovej dĺžky palivových prútikov

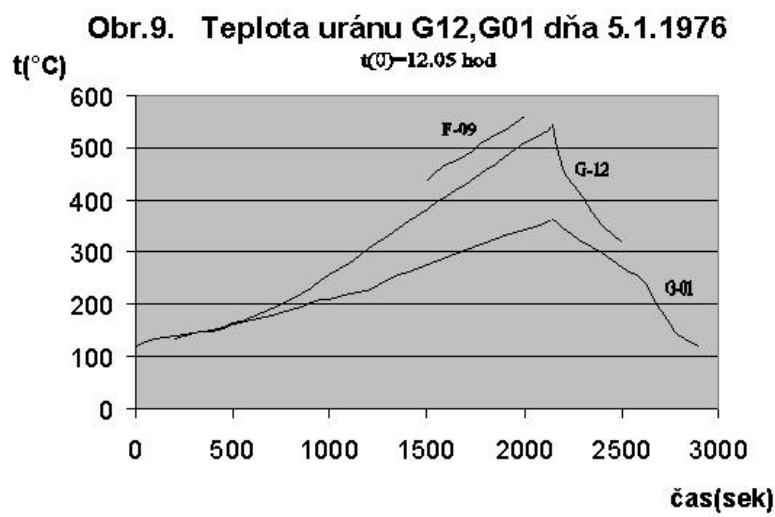
V rokoch 1975 – 1976 sa podľa programu pokračovalo v hodnotení palivových článkov v horúcej komore ÚJV Řež. Postupom času sa pozornosť presúvala na javy, ktoré súviseli s prevádzkyschopnosťou palivových článkov a ich životnosťou. Viac pozornosti sa venovalo difúzii alfa žiaričov do pokrytia palivových prútikov.

Poradiačný výskum a hodnotenie sa robil v týchto oblastiach:

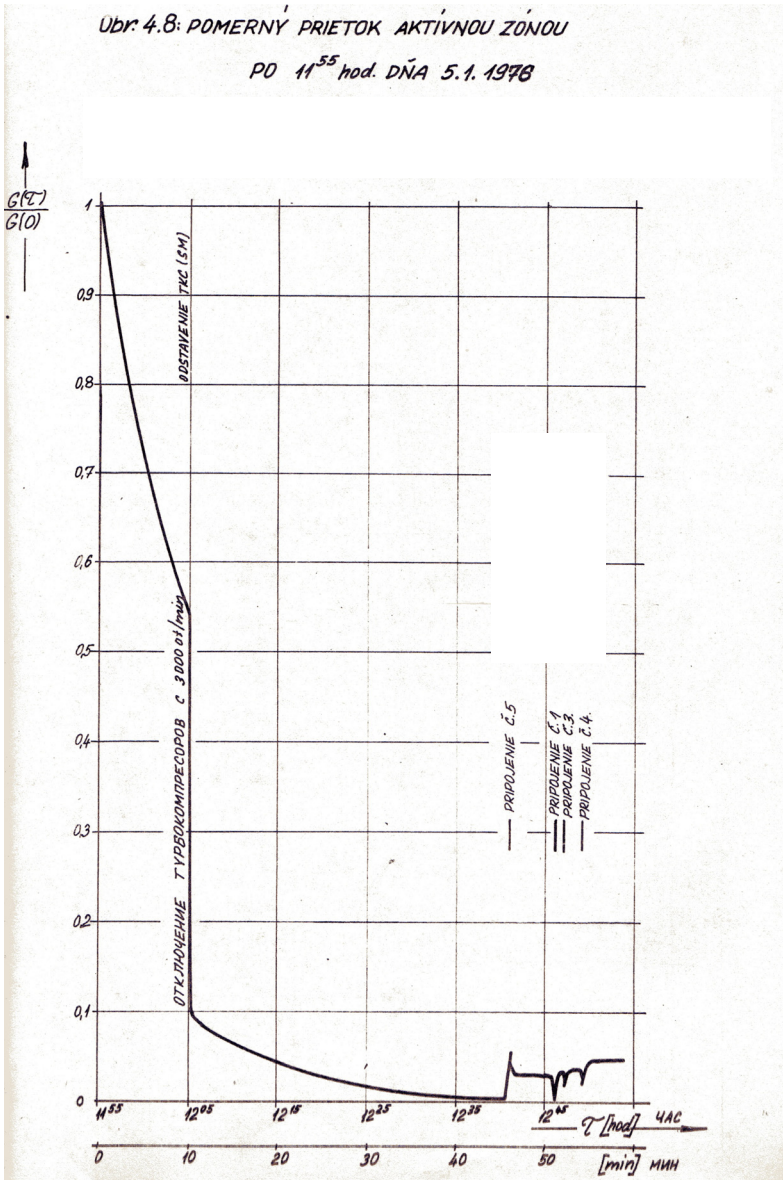
- demontáž protektorov a prehliadka povrchu pokrytia paliva,
- metalografické hodnotenie stavu uránového jadra, spoja urán – pokrytie a materiálu pokrytia,
- skúška pevnosti spoja urán – pokrytie,
- meranie mernej hmotnosti a priemeru uránového jadra v oblasti maximálneho vyhorenia a maximálnej teploty,
- určenie vyhorenia gama spektrometrickou a rádiochemickou metódou,
- určenie koncentrácie plutónia v uráne,
- určenie hĺbky difúzie štiepnych produktov v pokrytí.

Prehliadka palivových článkov poškodených pri havárii 5. januára 1976

Pri havárii klesol tlak plynu v primárnom okruhu zo 4,2 MPa o dvadsať minút od vzniku havárie na 1 MPa a o ďalších dvadsať minút na 0,2 ÷ 0,3 MPa. Na začiatku havárie bola teplota paliva 110°C. Prietok plynu cez aktívnu zónu klesol za desať minút na 55 % pôvodnej hodnoty a potom skokom na 10 % a do tridsiatejšiestej minúty na 1 % pôvodnej hodnoty.



Teplota uránu v článkoch G12 a G01 pri havárii



Pomerný prietok plynu cez aktívnu zónu pri havárii 5.1.1976

Teplota paliva bola do 10.-tej minúty 110°C, potom teplota rástla podľa údajov termočlánkov v palivových článkoch o 0,19°C /s až 0,292°C /s. Teplota paliva na najvýkonnejších článkoch prevýšila teplotu tavenia pokrytia a bola dosiahnutá do tridsiatich šiestich minút po vzniku havárie.

Pre každý článok v aktívnej zóne sa vypočítal zostatkový výkon v okamihu havárie. Podľa typu rozloženia neutrónového toku pozdĺž výšky sa vypočítal maximálny zostatkový výkon vzťahujúci sa na kg uránu. Podľa veľkosti maximálneho merného zostatkového výkonu od najväčšieho po najmenší boli články zaradené do troch skupín. Na hodnotenie v horúcej komore sa vybrali články s najväčším maximálnym merným zvyškovým výkonom s prihliadnutím na vyhorenie. Takto bol vybraný z prvej skupiny článok z kanála G07 a z druhej skupiny článok z kanála K05. Spolu sa určilo na prehliadku jedenásť palivových článkov.

Pri prehliadke článku G07 sa potvrdilo, že pokrytie bolo natavené. Pre výber ďalších článkov na prehliadku sa použilo pôvodné kritérium veľkosti maximálneho merného zvyškového výkonu s uvážením veľkosti teploty plynu na výstupe z palivového článku.

Niektoré články mali pokrytie natavené tak, že čiastočne stieklo do komory horúceho plynu. Na konštrukčných častiach sa nezistili defekty a rozmerové zmeny, ani zmena dĺžky palivových prútikov nebola rozdielna od bežných zmien.

Dosiahnutie teploty 650°C, pri ktorej sa materiál pokrytia taví, sa prejavilo rôznym stupňom natavenia. Pokrytie sa roztavilo predovšetkým na prútikoch vnútorných radov medzi tretím a piatym radom protektorov. Natavenie bolo v rôznych stupňoch: boli oblasti, kde zostala tenká vrstvička pokrytia, oblasti so stečeným a nahromadeným materiálom a oblasti s čiastočnou deformáciou rebier a zvrásnením povrchu pokrytia bez roztavenia pokrytia.

Na niektorých prútikoch sa v pokrytí zistili miestne defekty vo forme otvorených dutín, čiastočne otvorených alebo uzatvorených pľuzgierov. Tieto defekty mali väčšinou plochu od 1 do 8 mm^2 a prevažne nebolo porušené pokrytie až po uránové jadro. Najviac defektov bolo v mieste najvyšších teplôt.

Roztavený povlak nielen stekal, ale sa aj rozstrekoval vo forme drobných častíc. Tieto častice s priemerom do 0,1 mm boli strhnuté a unášané chladiacim plynom mimo zóny roztavenia pokrytia. Podľa výsledkov metalografického hodnotenia vzoriek z oblasti tavenia pokrytia sa usudzovalo, že teplota nedosiahla hodnotu transformačnej premeny fázy $\alpha \rightarrow \beta$ urán.

Výsledkom hodnotenia stavu palivových článkov bol program výmeny 41 článkov pred znovu uvedením do prevádzky. Predpokladalo sa, že na týchto článkoch môže byť pokrytie poškodené.

Požiar v horúcej komore

Pri hodnotení stavu palivového článku G07 v horúcej komore sa stala jedna vážna udalosť. Článok G07 bol zavezený prvý raz do horúcej komory 1.11.1974 na meranie vyhorenia a po zmeraní bol v ten istý deň vyvezený do komory strihu. V komore strihu bol päť dní a pri zisťovaní príčin požiaru sa usúdilo, že zrejme nebol dostatočne chladený. Znovu bol zavezený na prehliadku dňa 6.11.1974.

Pri prvej vizuálnej prehliadke sa zistilo, že obalová rúra bola na dvoch miestach vydutá, hoci pri meraní vyhorenia neboli zistené žiadne zmeny geometrie. Na povrchu obalovej rúry v dolnej polovici bolo veľa usadenín, ktoré po dvadsiatich štyroch hodinách v horúcej komore odpadli. Článok zostal v horúcej komore zasunutý do puzdra v karuseli.

Pri vyťahovaní článku z puzdra 8.11.1974 sa zistilo, že obalová rúra je prasknutá asi v polovici výšky. Dĺžka praskliny bola asi 450 mm, maximálna šírka asi 35 mm. Pokrytie prútov úplne opadalo a zaplnilo priestor medzi prútikmi. Z trhliny šľahal plameň.

Prvou reakciou bol ochladzovanie obalovej rúry dezaktivačnou vodou a do priestoru horúcej komory bol vypúšťaný kvapalný dusík na vytvorenie inertnej atmosféry. Pri styku pokrytia s vodou sa plameň zväčšoval. Preto sa chladenie vodou zastavilo a priamo do trhliny bol privádzaný plynný dusík. Oheň sa podarilo po asi troch hodinách zahasiť, ale plynný dusík sa privádzal ešte ďalšie štyri dni.

Pri napúšťaní dusíka cez veko z reaktorovej sály sa v horúcej komore vytvoril pretlak a cez priechodky manipulátorov sa zvírený rádioaktívny prach dostal do operátorovne horúcej komory a významne kontaminoval zariadenie i personál.

Po zahasení požiaru bol článok znovu zasunutý do puzdra v karuseli a bol chladený dusíkom. Článok sa neskôr postupne demontoval a rezal na menšie časti.

9. REAKTOR

Reaktorová nádoba mala tvar valca s polguľovitým dnom a polguľovitým demontovateľným vekom. Veko sa na nádobu pripájalo prírubovým spojom a istili ho bezpečnostné zvary. Demontáž veka sa predpokladala pri vyberaní vnútorných častí reaktora, prípadne pri výmene avialovej nádoby. Vonkajší priemer valcovitej časti bol 5,1 m, výška 20,1 m a hrúbka steny 150 mm. Nádoba bola z ocele typu 13 030 legovanej hliníkom a titánom.

Vnútorný priestor nádoby zo zliatiny Al-Mg-Si bol rozdelený na dve časti nosnou doskou uloženou na nosnom prstenci. V hornej časti bolo na nádobu pripojených dvanásť nátrubkov na pripojenie prívodných potrubí CO_2 od turbokompresorov. V dolnej časti je podobne pripojených dvanásť nátrubkov pre potrubie odvádzajúce CO_2 do parogenerátorov.

Avialová nádoba bola v strednej časti reaktora uložená na opornom valci z austenitickej ocele a na nosnej doske pomocou valcových opier. Cez nádobu prechádzalo 148 avialových rúrok (štyridsaťštyri centrálnych a 104 periférnych), ktoré boli rozmiestnené v štvorcovej mreži s krokom 259,5 mm a tvorili časť technologického kanála. Do avialových rúrok boli vložené palivové články. Pôdorys aktívnej zóny bol valcový, priemer bol približne 345 cm a bola vysoká približne 400 cm. Reflexná vrstva, ktorá vracala časť neutrónov unikajúcich z aktívnej zóny bola hrubá 42 cm. Vzhľadom na nízky bod tavenia nádoby sa udržiavala teplota ťažkej vody na 90°C a ťažká voda sa chladila v samostatnom okruhu.

Cez avialovú nádobu prechádzalo štyridsať kanálov absorpbčných tyčí, dva kanály hladinomerov D_2O, dva kanály vnútorných ionizačných komôr. Nádoba mala štyri periférne a jeden centrálny kanál pre odvod traskavej zmesi, dvadsať sifónových prepúšťacích uzáverov na prefukovanie priestoru nad hladinou D_2O, šesť prívodných a šesť odvodných rúrok pre cirkuláciu D_2O.

Nad vekom avialovej nádoby bola umiestnená stredná a horná biologická ochrana. Priestor medzi strednou a hornou biologickou ochranou tvoril komoru studeného plynu, do ktorej prichádzal CO_2 od turbokompresorov. Do jednotlivých technologických kanálov s palivovými článkami vchádzal CO_2 cez ventily, ktorými bolo možné regulovať jeho prietok.

Avialové rúrky ťažkovodnej nádoby pokračovali hore oceľovými rúrami, ktoré prechádzali cez obe biologické ochrany, komoru studeného plynu, veko reaktora a boli upevnené v nosných rúrach privarených k veku.

Pod nosnou doskou bola umiestnená oceľová valcová nádoba – komora horúceho plynu. Vchádzal do nej zohriaty CO_2 z technologických

kanálov bez toho, aby bol v kontakte s ostatnými časťami konštrukcie reaktora. Komora mala vstavanú vložku s vyspádovaným dnom. Na stenách komory bola tepelná izolácia tvorené tenkými kovovými doštičkami. Z komory horúceho plynu vychádzal CO_2 cez dvanásť nátrubkov do potrubí k parogenerátorom.

Cez komoru horúceho plynu a dolnú biologickú ochranu prechádzali odberové rúrky systému kontroly tesnosti pokrytia paliva.

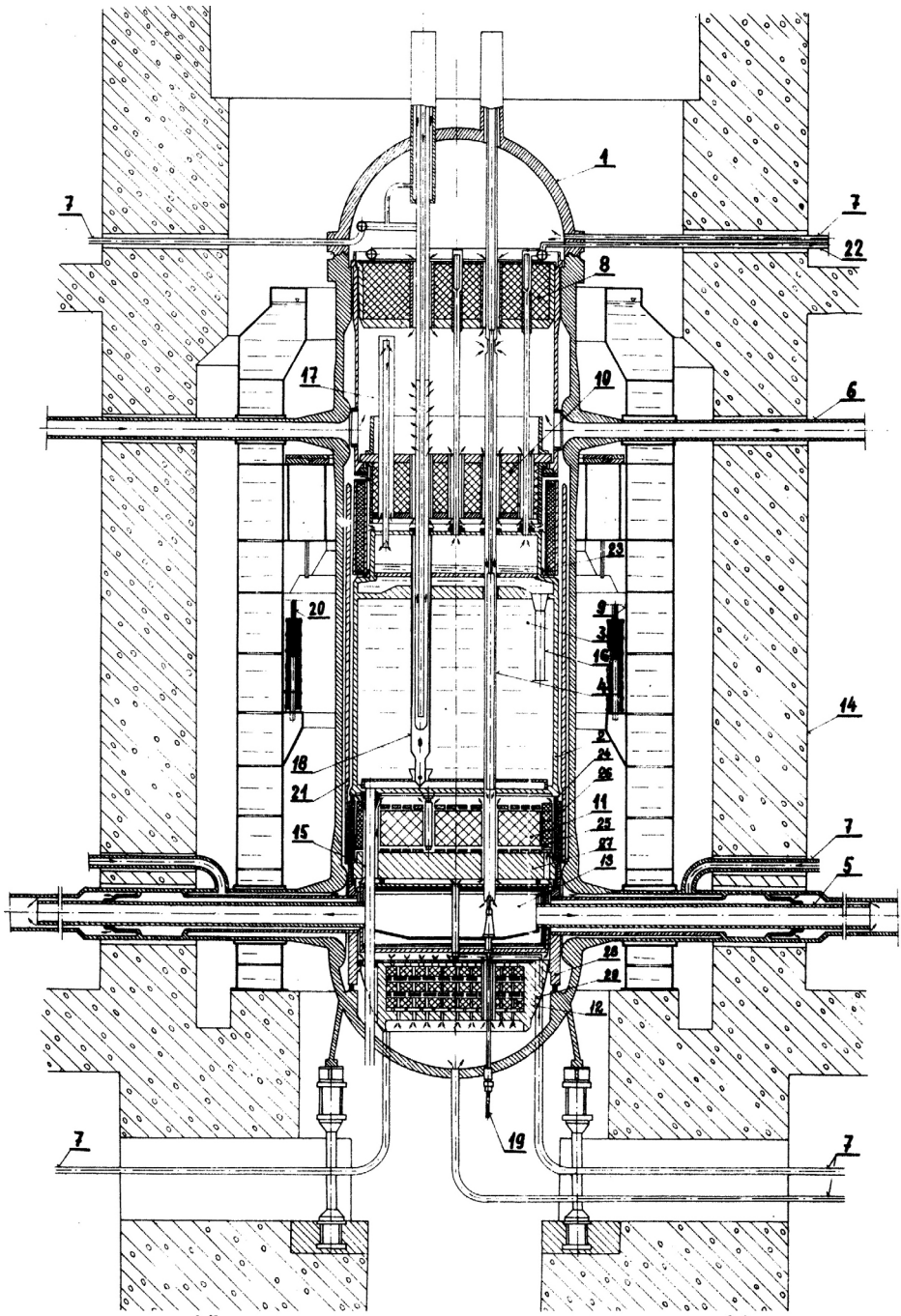
Cez pologuľovité dno reaktora prechádzali rúrky systému kontroly tesnosti pokrytia paliva, na obvode bolo prívodné a odvodné potrubie D_2O, prívodné potrubia CO_2 na chladenie vnútorných častí reaktora nachádzajúcich sa pod avialovou nádobou a drenážne potrubia z dna komory horúceho plynu a dna reaktora a priechodky merania. Reaktorová nádoba sa počas prevádzky chladila oxidom uhličitým. I pri teplote povrchu palivových článkov 500°C a teplote chladiaceho plynu na výstupe z reaktora 426°C, sa teplota nádoby udržiavala medzi 120°C a 150°C.

Medzi tlakovú nádobou reaktora a avialovu nádobou s hornou biologickou ochranou boli vložené oceľové dosky chladené CO_2, ktoré tvorili tepelnú ochranu nádoby reaktora v oblasti aktívnej zóny.

V aktívnej zóne medzi technologickými kanálmi boli tyče systému ochrán a riadenia reaktora uchytené na nosných rúrkach veka reaktora. Reaktor mal štyridsať absorpčných tyčí, ktoré boli umiestnené po jednej v príslušných rúrach. Z toho boli štyri tyče na riadenie tepelného výkonu reaktora, tridsaťdva tyčí na kompenzáciu vyhorenia jadrového paliva a štyri tyče slúžili ako havarijné, pridržiavané v hornej polohe elektromagnetmi. Po príslušnom signále sa prerušilo napájanie elektromagnetov, tyče voľným pádom padli do reaktora a zastavili reťazovú štiepnu reakciu. Ako absorbátor bola použitá bórová oceľ.

V betónovej šachte reaktora bola v oblasti valcovej časti okolo nádoby reaktora vodná biologická ochrana s hrúbkou 1 m.

Celková váha nádoby bola 723 t. Ingoty mali hmotnosť štyridsaťtri ton, pri ich odlievaní sa nepoužívalo vákuum. Pri jej výrobe bolo použité oblúkové zváranie, zväčša v dielni, ktorá bola zriadená priamo na stavenisku. Po zvarení niekoľkých vencov vznikli dielce, ktoré sa do kobky reaktora transportovali po jednom. Tam sa tieto dielce zvarili manuálnym zváraním a potom sa celá reaktorová nádoba ešte raz vyžíhala pomocou mobilnej elektrickej pece.



Vertikálny rez reaktorom

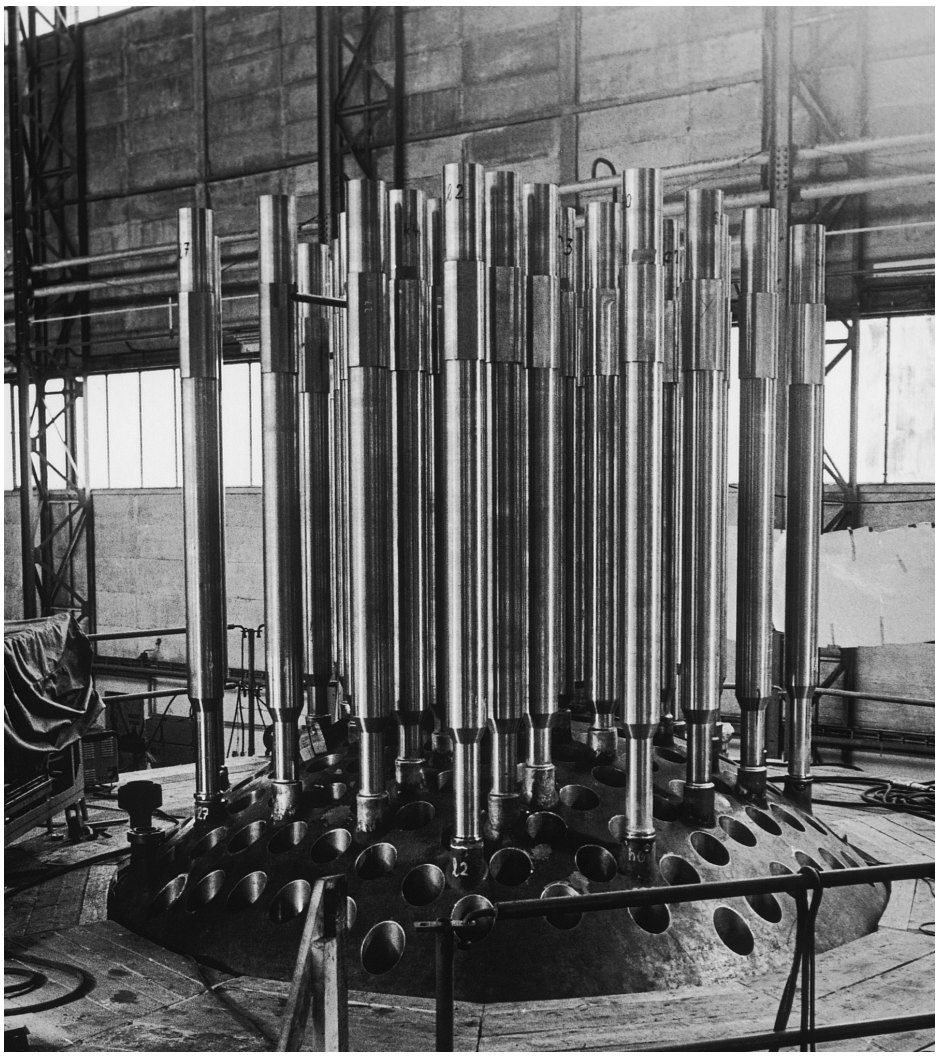
Legenda – *1. veko tlakovej nádoby, 2. avialová nádoba, 3. moderátor, 4. technologický kanál, 5. výstupné potrubie CO_2, 6. vstupné potrubie CO_2, 7. prívod chladiaceho plynu, 8. horná biologická ochrana, 9. vodná nádrž, 10. stredná biologická ochrana, 11. grafitové tienenie, 12. dolná biologická ochrana, 13. komora horúceho plynu, 14. betónová šachta reaktora, 15. prívod D_2O, 16. odvod D_2O, 17. komora studeného plynu, 18. havarijná tyč, 19. odberová rúrka systému kontroly tesnosti pokrytia paliva, 20. kanál ionizačnej komory, 21. tepelné tienenie, 22. odvod traskavej zmesi, 23. valcová grafitová ochrana, 24. tesniaci kruh, 25. grafitový prstenec, 26. oporný austenický valec, 27. nosná doska, 28. nosný prstenec, 29. nosný kôš dolnej biologickej ochrany.*

Technologický kanál reaktora

Technologický kanál bol jedným z najdôležitejších zariadení vnútorných častí reaktora. Jeho konštrukcia umožňovala:

- vložiť a vybrať palivové články do a z reaktora pomocou zavážacieho stroja,
- vložiť a vybrať palivové články do a z dochladzovacej zóny žeriavom,
- regulovať prietok chladiaceho CO_2
- zatvoriť vstupné okná pre CO_2 pri zavážaní palivových článkov do zavážacieho stroja a otvoriť ich pri zavážaní palivových článkov do dochladzovacej zóny,
- zaistiť prietok plynu cez zavážací stroj pri vyberaní palivových článkov z reaktora,
- zatvoriť technologický kanál vekom pri havarijnom zvýšení tlaku nad palivovým kompletom, aby sa zabránilo úniku CO_2 do reaktorovej sály,
- merať teplotu CO_2 na výstupe z palivových článkov a teploty bybraných uránových prútikov,
- odtieniť žiarenie z aktívnej zóny smerom do reaktorovej sály.

Hlavné parametre technologického kanála	
Teplota chladiaceho plynu na vstupe do technologického kanála	112°C
Maximálna teplota v dolnej časti technologického kanála (nad aktívnou zónou)	150°C
Tlak plynu v pracovnom priestore	6,5 MPa
Celková dĺžka technologického kanála	12 200 mm

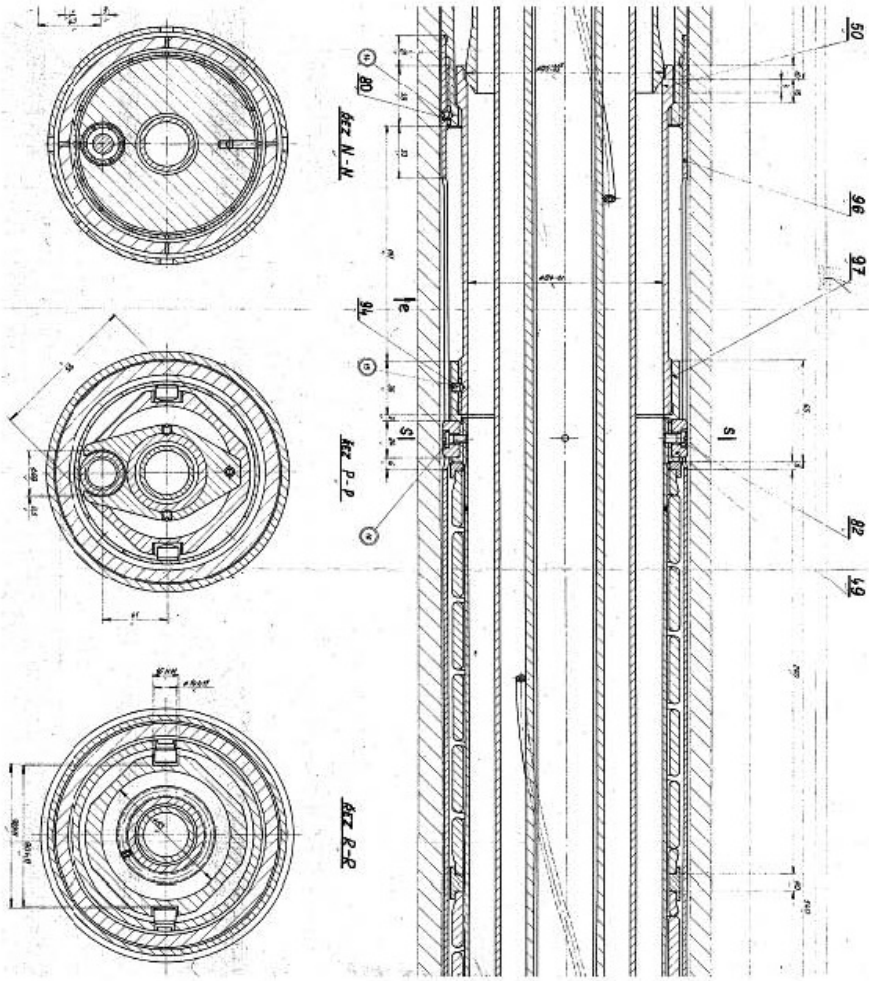


Pohľad na kanály absorpčných tyčí vystupujúce z horného veka reaktora

Technologický kanál bol zabudovaný v nosnej rúrke privarenej k veku tlakovej nádoby reaktora. Spodný koniec technologického kanála, ktorý tvorila hlavná rúrka bol v úrovni nad hornou hranicou aktívnej zóny reaktora a pod úrovňou moderátora.

Technologický kanál mal pevné časti – konštrukčné zostavy a diely zabudované v nosnej rúrke a iba niektoré sa pohybovali pri výmene palivových článkov. Pri výmene zostávali v technologickom kanáli.

Pevné časti technologického kanála uzatvárali funkčný pracovný priestor. Držali palivový článok v aktívnej zóne, slúžili na nútené za-



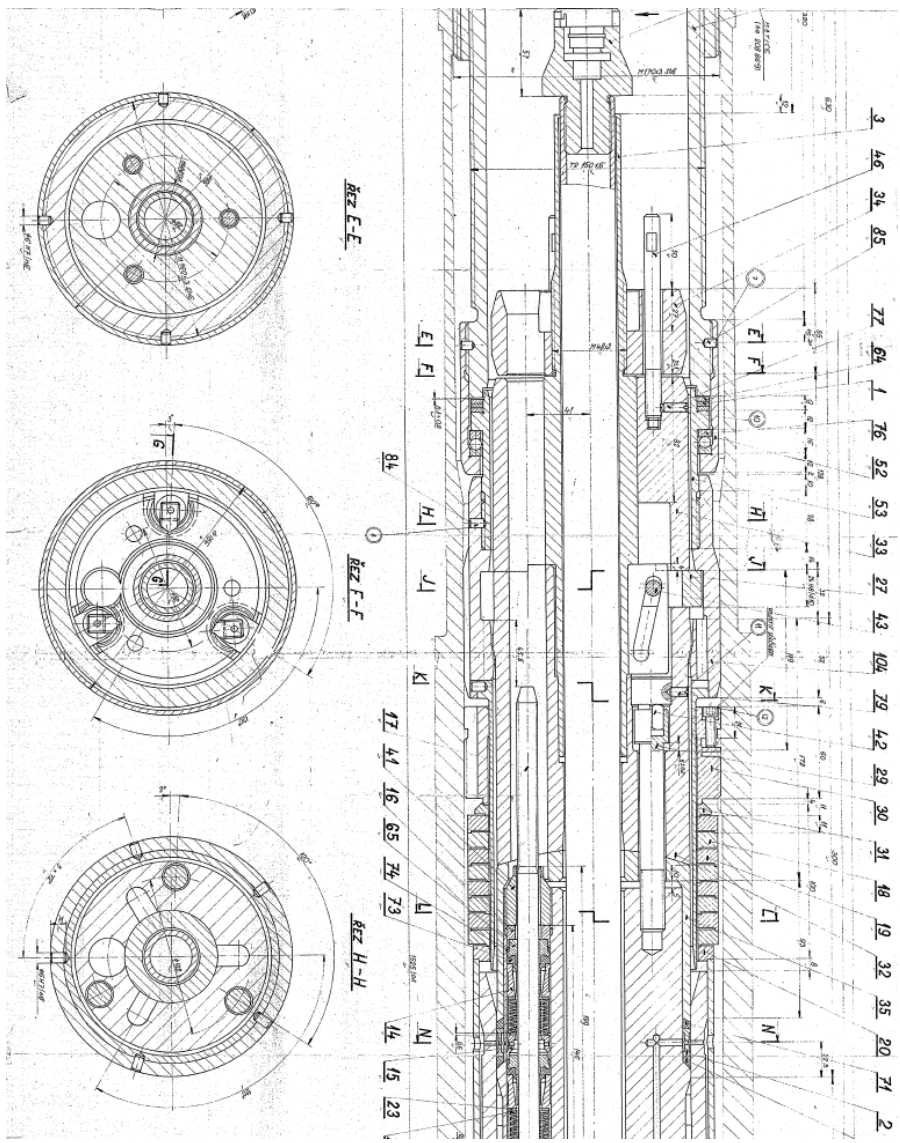
Konštrukcia pevnej časti technologického kanálu

tvorenie vstupu chladiaceho plynu do palivových článkov, utesňovali palivový článok po jeho zavezení do dochladzovacej zóny a roztesňovali ho pred vybratím, utesňovali technologický priestor v mieste napojenia technologického kanála na technologickú rúrku avialovej nádoby reaktora. Tvorili spolu s nosnou rúrkou reaktora vonkajšie medzikružie pre prietok chladiaceho plynu.

Najdôležitejšími pevnými časťami boli hlavná rúrka technologického kanála a uzatváracia rúrka. Hlavná rúrka (pozícia č. 96) utesňovala vnútorný priestor technologického kanála a kesónovej rúrky, viedla uzatváraciu

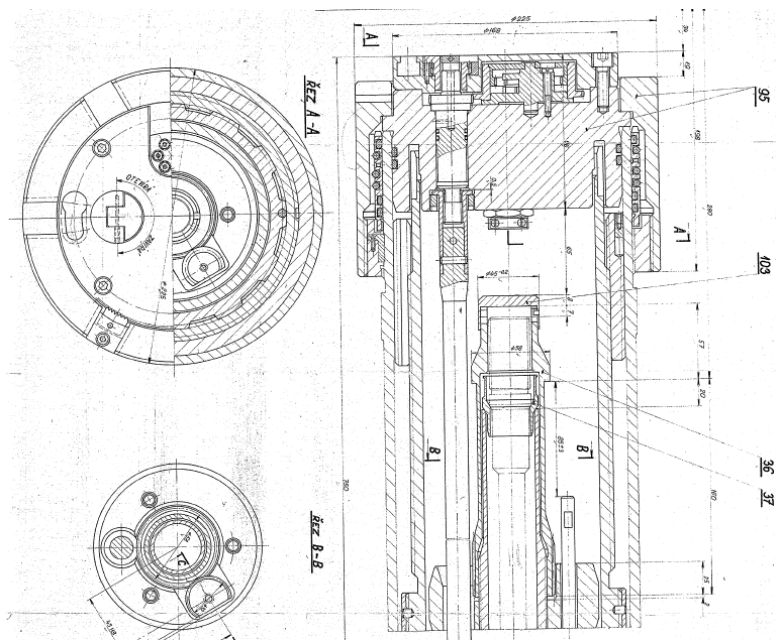
rúrku (97). Mala vstupné okná sa špeciálnym profilom, ktoré slúžili na vstup chladiaceho plynu. Dĺžka hlavnej rúrky bola 10 426 mm.

Uzatváracia rúrka (pozícia č. 97) bola uložená na pružinovom teleskope hlavnej rúrky. Teleskop zabezpečoval jej vertikálny pohyb a tým otváranie a zatváranie toku chladiaceho plynu cez palivový článok. Na povrchu uzatváracej rúrky bolo dvanásť profilovaných otvorov pre vstup plynu – vstupných okien. Stupňované prechody na vnútornej časti slúžili na umiestnenie palivového kompletu.



Konštrukcia hornej časti teesniacej zátky

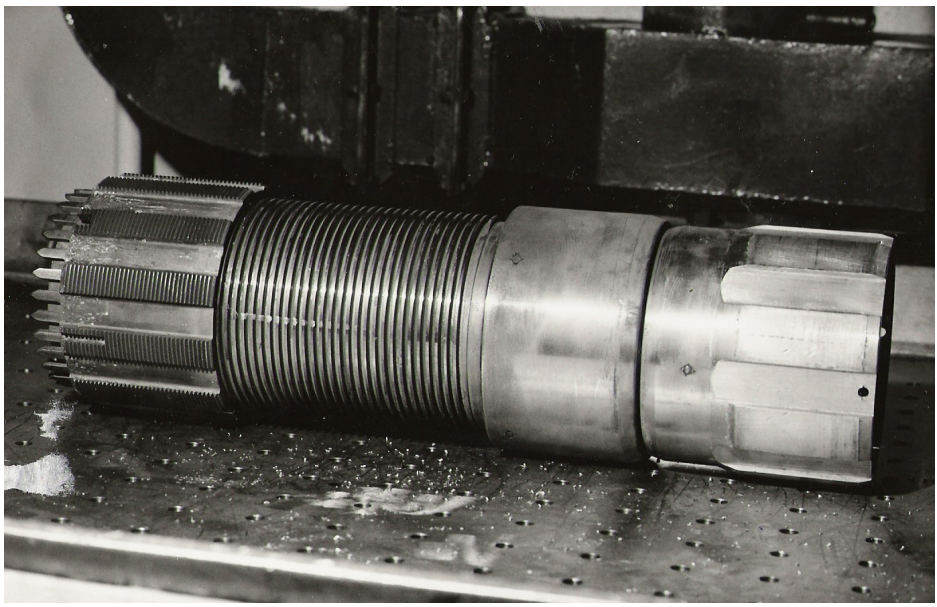
Vyberateľné časti technologického kanála tvorili konštrukčné zostavy a diely, ktoré sa pri výmene palivových článkov vyberali z reaktora spolu s palivovými článkami. Tvorili vnútornú náplň technologického kanála a umožňovali vybrať a zavesiť palivový článok pomocou závesných tyčí s ∅36 mm a ∅20 mm, utesniť vnútorný priestor technologického kanála, zavesiť palivový článok v dochladzovacej zóne pomocou tyče s ∅20 mm, regulovať prietok chladiaceho plynu, odtieniť žiarenie z aktívnej zóny, zamknúť palivový komplet v pevných častiach technologického kanála a zabrániť jeho vytlačeniu tlakom CO_2 z reaktora.



Horná časť technologického kanála - stav s vekom

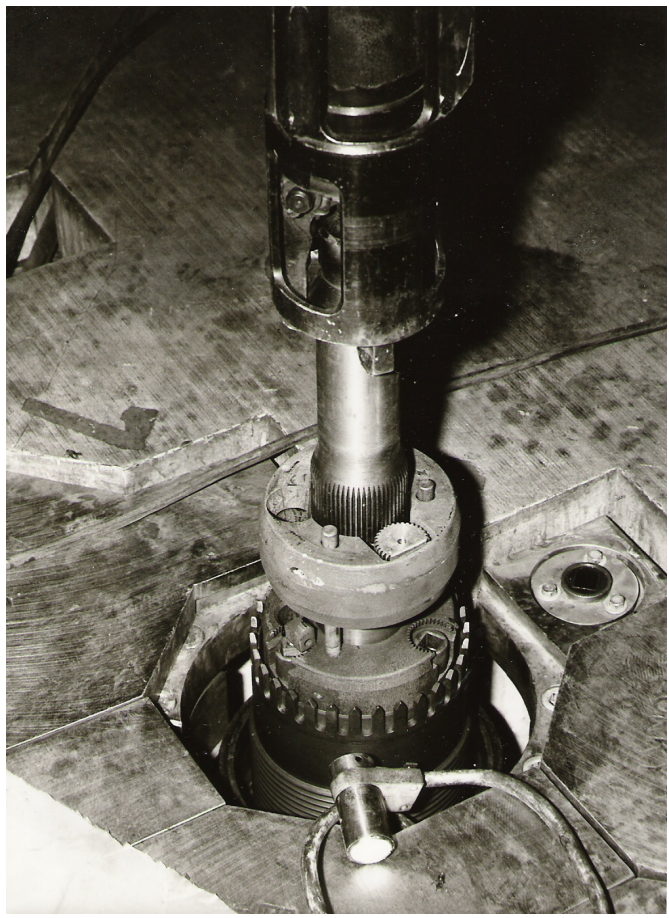
Jadro, telesá zátky, uzatváracie teleso a regulačná rúrka, zátka s usmerňovačom a vnútorná zátka

Jadro (32, 33) nieslo palivový komplet a hlavne zamykalo ho do technologického kanála tak, aby nemohol byť vystrelený pôsobením vnútorného pretlaku z reaktora Uzatváracie teleso (100) nieslo skrutku pre reguláciu prietoku plynu a utesňovalo palivový komplet v technologickom kanáli. Umožňovalo tiež zavesiť palivový článok cez oporný krúžok po jeho vytiahnutí do dochladzovacej zóny.



Zátka technologického kanála

Pohľad na zátky technologických kanálov na veku reaktora



Nastavovanie prietoku plynu cez technologický kanál

V telese zátky (33) boli umiestnené vodiace otvory pre blokovacie (zamykacie) kamene. Teleso zátky (32) malo na vonkajšom povrchu osadenia, ktoré niesli palivový komplet v technologickom kanáli.

Vonkajšia zátka s usmerňovačom (98) zabezpečovala zatváranie vstupných okien plynu pri regulovaní. Mala usmerňovač tvorený jedenástimi rebrami s plynulým nábehom. Vnútornú zátku (99) tvoril plášť, vyplnený jedenástimi grafitovými blokmi biologického tienenia.

Závesná tyč s priemerom 36 mm (107) bol nosným prvkom na vyberanie palivových článkov pomocou žeriavu z aktívnej do dochladzovacej zóny. V tyči bol špeciálny kábel pre meranie teplotných parametrov plynu na výstupe z aktívnej zóny a pokrytí uránových prútov v palivových článkoch.

Veko technologického kanála (95) utesňovalo a zatváralo vnútorný priestor technologického kanála. V telese veka bol mechanizmus ukazovateľa stavu nastavenia regulačných orgánov vstupného plynu do palivových článkov.

Dve konštrukčné zostavy vyberateľných častí – vnútorná a vonkajšia biologická zátka – boli vymeniteľnými časťami technologického kanála. Po vyčistení a repasácii sa dali znovu použiť.

Optimalizácia technológie výroby tlakovej nádoby reaktora A1

Výroba tlakovej nádoby reaktora A1 bola veľmi náročná. Československý hutnícky a strojársky priemysel mal bohaté skúsenosti s výrobou zariadení pre elektrárne a tiež pre chemický a petrochemický priemysel, ale požiadavky na konštrukciu a výrobu tlakovej nádoby reaktora A1 boli náročnejšie. Nielen na kvalitu materiálu, ale najmä na hrúbky a priemery výkovkov, z ktorých sa mali vyrobiť jednotlivé časti plášťa, prírub a viek tlakovej nádoby reaktora. Požiadavky na kvalitu ocele vylučovali použitie ocele zo Siemens-Martinských pecí, ale neboli k dispozícii veľkokapacitné elektrické taviace pece a zariadenia na vákuové odlievanie dostatočne veľkých ingotov. Aj výkon ťažkých kováčskych lisov na vykovanie častí tlakovej nádoby reaktora z jedného ingotu bol nedostatočný. Vtedy kolektív mladých výskumných pracovníkov Výskumného ústavu zváračského – VÚZ – Bratislava pod vedením prof. J. Čabelku prišiel s revolučným návrhom: tieto časti vykovať z menších ingotov ako segmenty prstencov, ktoré by potom boli zvarené. Na zváranie takých segmentov pozdĺžnymi, prípadne obvodovými a meridiánovými spojmi sa navrhlo využiť vtedy najprogresívnejšiu technológiu elektrotroskového zvárania súčastí veľkých hrúbok. Túto technológiu VÚZ prevzal z Patonovho ústavu elektrozvárania v Kyjeve a ďalej rozvinul po stránke technologickej, prídavných materiálov i zváracích strojov a prípravkov. Prínos aplikácie elektrotroskového zvárania s následným normalizačným žíhaním a popustením zváraných častí na výrobu polotovarov prstencov plášťa, prírub, častí veka a dna tlakovej nádoby reaktora spočíval najmä v tom, že vôbec umožnil výrobu tlakovej nádoby reaktora s využitím vtedy existujúcich výkonových kapacít hutníckych zariadení v Československu a súčasne umožnil splniť náročné požiadavky na homogenitu chemického zloženia, mechanických vlastností a štruktúry materiálov veľkých hrúbok. Rozsah, technický i ekonomický význam realizácie

navrhnutého variantu výroby zváranej tlakovej nádoby reaktora ilustruje niekoľko faktov.

Pri vývoji technológie výroby sa celkovo použili tieto postupy zvárania, prídavné materiály a zváracie zariadenia:

- Elektrotroskové zváranie pozdĺžnych spojov prstencových segmentov vo zvislej polohe a to v hrúbkach v rozmedzí 180 mm až 700 mm. Spoje hrubé viac ako 500 mm sa zvárali synchrónne nasadením dvoch zváracích strojov oproti sebe.

- Elektrotroskové zváranie plechových polotovarov hrúbky 300 mm, z ktorých sa vylisovali segmenty guľových viek.

- Elektrotroskové zváranie obvodových spojov medzi prírubovým prstencom a segmentov veka.

- Elektrotroskové zváranie meridiánových spojov pri výrobe segmentov dna a veka.

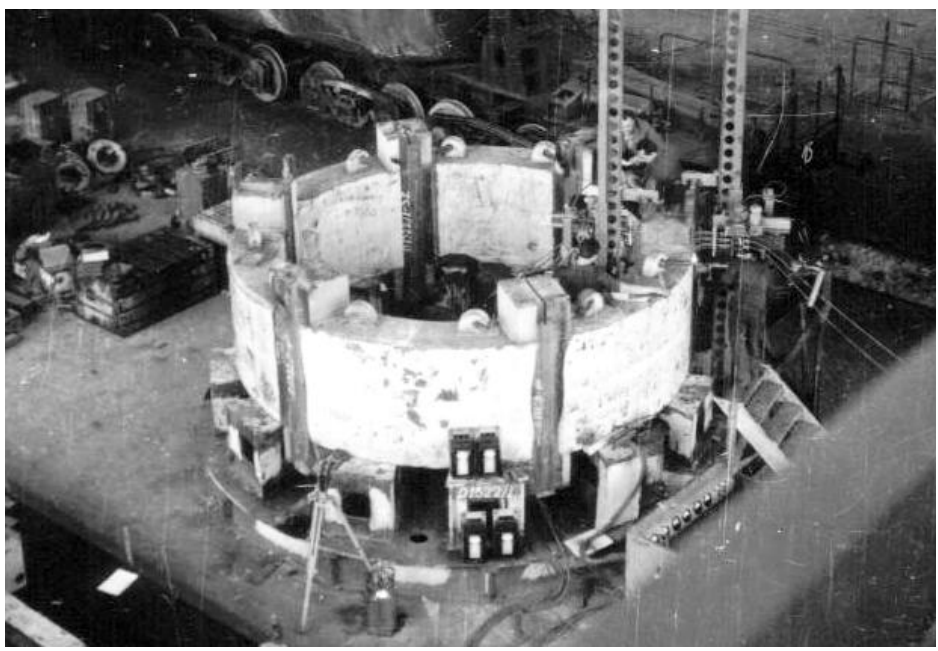
- Prídavný drôt VÚZ - ARV v kombinácii s taveným tavivom VÚZ - 4F na elektrotroskové zváranie reaktorovej ocele 13 030 M.

- Modernizovaný elektrotroskový zvárací stroj s označením VÚZ - ETZ 450 vhodný na zváranie pozdĺžnych a obvodových spojov materiálov s hrúbkou do 450 mm a pri synchrónnom zapojení strojov z protiľahlých strán – s hrúbkou až 900 mm. Elektrotroskové zváranie plechov s hrúbkou do 120 mm VÚZ vyvinul a úspešne priemyselne aplikoval aj zváracie stroje VÚZ - ETZ 100 a VÚZ - ETZ 120UNI.

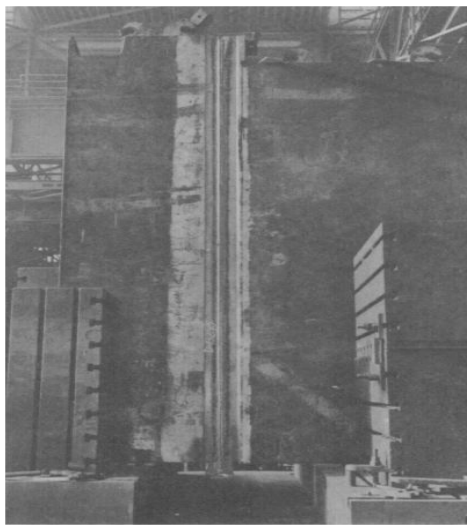
- Ručné oblúkové zváranie obvodových spojov v horizontálnej polohe na zvislej stene pri montáži plášťa tlakovej nádoby reaktora z jednotlivých sekcií, vrátane vývoja elektródy s bázickým obalom značky VÚZ AC 1-52 (táto sa podnes vyrába pod súčasnou značkou ESAB E-B 124 a našla široké uplatnenie na zváranie vysoko náročných priemyselných zariadení).

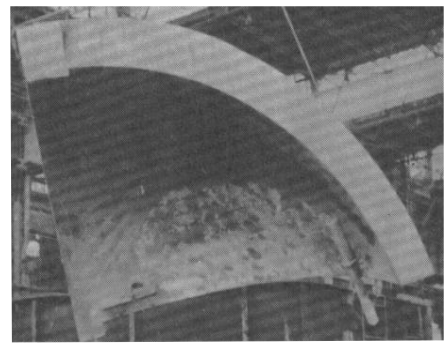
- Poloautomatické zváranie v ochrannej atmosfére oxidu uhličitého – ako alternatívnej technológie montážneho zvárania obvodových spojov plášťa TNR a komponentov hlavného cirkulačného potrubia, vrátane vývoja prídavných drôtov značiek C 42 a C 52.

Všetky výskumné a vývojové práce súvisiace s týmto unikátnym technologickým projektom zhotovenia tlakovej nádoby sa pri koordinácii Československou komisiou pre atómovú energiu (ČSKAE) podrobovali oponentúre sovietskymi expertmi i odborníkmi závodu Škoda – ZJS a ďalších výskumno-vývojových organizácií. Vyvinuté technologické postupy zvárania a tepelného spracovania sa potom overili výrobou modelu tlakovej nádoby v mierke 1:1 v závode Škoda – ZJS. Tak sa potvrdila ich spôsobilosť na použitie pri výrobe skutočnej tlakovej nádoby. Spôsobom elektrotroskového zvárania sa zhotovilo celkom 95 spojov v hrúbkach od 180 mm do 620 mm a s celkovou dĺžkou 260 m, čo bol svetový unikát v aplikácii na výrobu reaktorových tlakových nádob. Proces elektrotroskového zvárania bol predmetom záujmu pri návštevách zahraničných odborníkov vo VÚZ. Vyvinuté zváracie materiály v plnom rozsahu splnili náročné požiadavky na vlastnosti zvarového kovu v spojoch zariadení primárneho okruhu A1 a prešli náročným schvaľovacím procesom projekčnými a dozornými orgánmi.

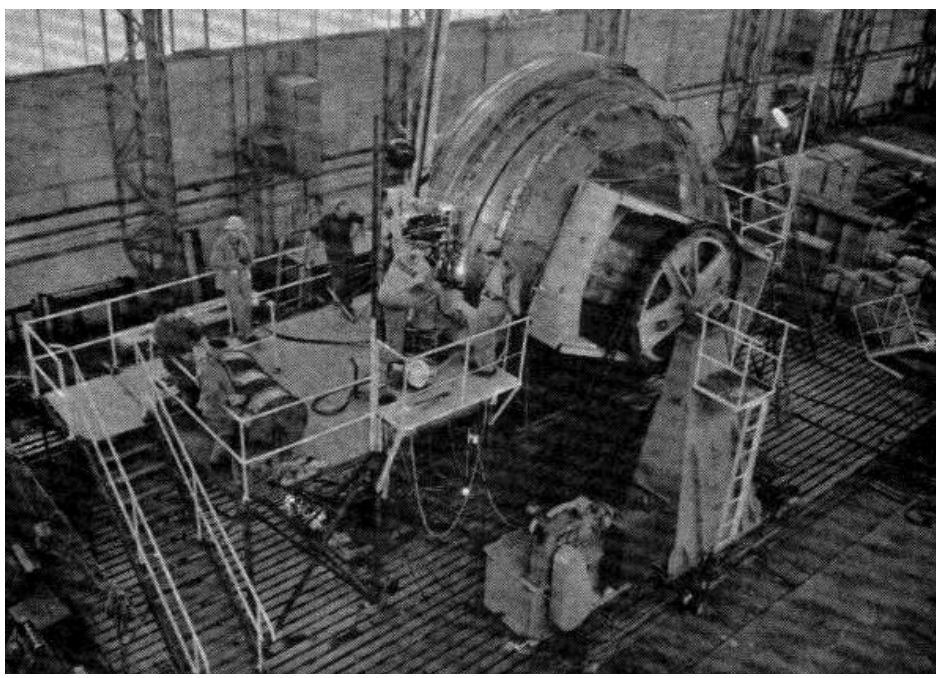


Synchrónne zváranie kovaných segmentov prírubového prstenca tlakovej nádoby dvoma automatmi ETZ 450

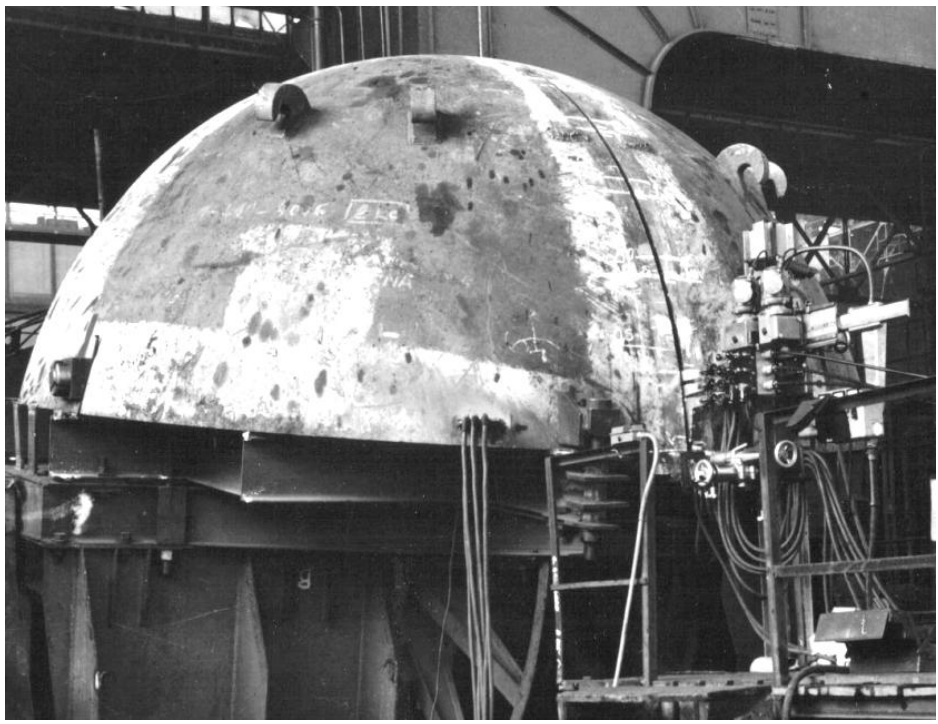




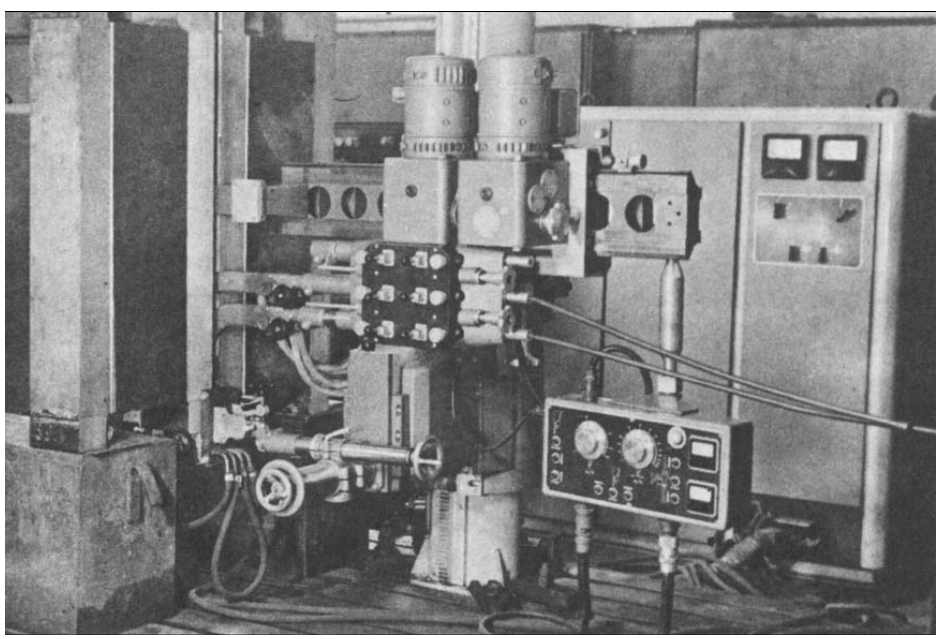
Elektrotroskoým zváraním zvarený plech hrúbky 300 mm (vľavo) ako polotovar na zápustkové lisovanie ¼ segmentu veka tlakovej nádoby (vpravo)



Elektrotroskové zváranie obvodového spoja prírubového prstenca s vekom tlakovej nádoby



Elektrotroskové zváranie segmentov veka tlakovej nádoby



Elektrotroskový zvárací stroj VÚZ- ETZ 450

Predvádzanie elektrotroskového zvárania hrubých plechov vo VÚZ - 1963

Prevádzka

Pri komplexných skúškach sa zistili chyby vo funkcii niektorých častí technologických kanálov. Boli to najmä zvýšené úniky CO_2 cez teflónové tesnenie, zadieranie matíc technologických kanálov, zadieranie a zlámané pružiny uzatváracích rúrok a chybne nastavené regulačné rúrky. Konštrukčnými úpravami boli tieto nedostatky odstránené.

V I. etape energetického spúšťania sa pozorne sledovali parametre, ktoré vplývali na integritu tlakovej nádoby, vnútorných častí reaktora a avialovej nádoby a ich mechanické vlastnosti. Osobitne sa sledoval teplotný ráz na kesónové rúrky v avialovej nádobe pri premiestňovaní palivových článkov z aktívnej do dochladzovacej zóny a späť.

Merala sa symetria ohrevu tlakovej nádoby, priebežne teplota vybraných vnútorných častí reaktora a teplota avialovej nádoby. Merania boli pri ohreve, pri tepelnom výkone 49 MW, resp. 136 MW a pri 200 MW, resp. 235 MW. Všetky namerané hodnoty, či už teploty alebo tepelného rázu boli menšie ako výpočtové, s výnimkou nosnej dosky a jej ochrany,

kde teplota bola o niekoľko stupňov vyššia. Vývin tepla vo vnútorných častiach reaktora bol menší ako projektový, preto sa uvažovalo spresniť meranie, vypočítať potrebné prietoky a tak znížiť zbytočné straty tepla.

V priebehu fyzikálneho a energetického spúšťania bolo treba presvedčiť sa aj o reálnych fyzikálnych charakteristikách reaktora a správaní sa jednotlivých komponentov.

Jedným z dôležitých parametrov, ktoré bolo treba zistiť, bol napríklad aj tok rýchlych neutrónov na stenu tlakovej nádoby reaktora, aby sa dala predvídať jej životnosť. Hodnotila sa účinnosť biologickej ochrany, okalibrovali sa ionizačné komory a ich údaje sa porovnávali s tepelným výkonom reaktora. Uspokojivé bolo, že tok rýchlych neutrónov na teleso tlakovej nádoby bol menší, ako sa predpokladalo v projekte.

Špeciálnou úlohou bolo aj naladenie prietokov pre chladenie jednotlivých konštrukčných častí reaktora, najmä pre chladenie pohonov regulačných tyčí a zaistenie dostatočného prietoku cez sifónové uzávery avialovej nádoby pre jej chladenie. Bola to komplexná práca, ktorá začínala správnym naladením vzdúvacích klapiek nachádzajúcich sa v primárnom potrubí pred vstupom do reaktora, ktoré zabezpečovali nevyhnutný pretlak chladiva v kolektore chladiaceho plynu pred komorou chladného plynu.

Pred začiatkom II. etapy energetického spúšťania bola tlaková skúška reaktora, slučiek chladenia D_2O, slučiek spaľovania traskavej zmesi filtrov a stanice čistenia CO_2 pri tlaku 6,36 MPa. Počas II. etapy energetického spúšťania sa na reaktore overovala predovšetkým výmena palivových článkov. Na technologických kanáloch boli konštrukčné nedostatky a preto sa rozhodlo, že palivové články sa budú vymieňať pri tepelnom výkone $3 \div 5$ % N_{nom} a pri malých tlakových spádoch.

Aj v tejto etape sa potvrdilo, že vývin tepla vo vnútorných častiach reaktora bol menší ako sa predpokladalo v projekte. Zbytočne veľký prietok CO_2 na chladenie vnútorných častí znižoval tepelnú účinnosť, ale jednoduchým spôsobom sa znížiť nedal.

Hodnotila sa tiež aktivácia vymeniteľných častí technologických kanálov, pretože v projekte sa uvažovalo s ich opakovaným použitím. Po $2 \div 3$ mesiacoch vymierania bolo možné pri určitých opatreniach na ochranu pred ionizujúcim žiarením palivový komplet demontovať.

Po prvej havárii 5.1.1976 s vystrelením palivového kompletu z reaktora bola súčasne vymrštená aj prepúšťacia rúrka. Oprava technologického kanála H05 bola najzložitejšou prácou pri odstraňovaní následkov

havárie. Technologický kanál bol vyradený z výkonovej prevádzky zaslepením v dolnej časti, do hornej časti bola zavezená nová oceľová rúrka, zátka biologického tienenia a tesniaca zátka. Po týchto prácach bol reaktor pripravený na obnovenie prevádzky.

Pri druhej havárii 22.2.1977 bol roztavený palivový článok a kesónová rúrka v kanáli C05. Bola pripravená technológia jej výmeny, ale nakoniec sa nepoužila po rozhodnutí definitívne odstaviť elektráreň.

Následky oboch havárií sú popísané v kapitole „Vážne havárie v elektrárni A1“.

10. PRIMÁRNY OKRUH

Primárny okruh reaktora mal šesť identických cirkulačných slučiek, každá z nich mala tzv. horúcu a studenú vetvu. Horúci plyn vychádzal z reaktora cez dolných dvanásť hrdiel do potrubí s dvomi uzatváracími – sekčnými – armatúrami a ďalej do šiestich parogenerátorov. Odtiaľ ochladený plyn postupoval na satie turbokompresorov. Táto časť slučky tvorila horúcu vetvu.

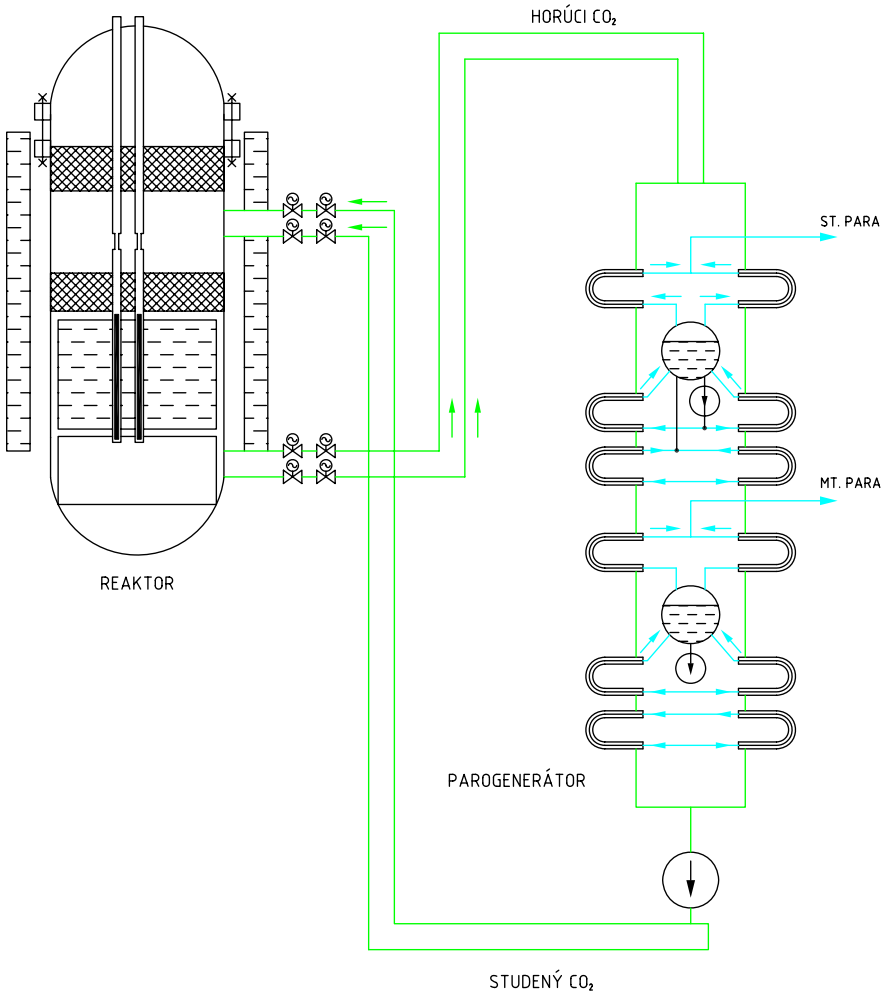
Z výtlaku turbokompresorov prechádzal plyn potrubím cez dve uzatváracie armatúry a horných dvanásť hrdiel späť do reaktora. Táto časť slučky tvorila studenú vetvu.

Potrubie jednotlivých vetiev bolo z dvoch rovnobežných potrubí bez pozdĺžnych zvarov, ktorých menovitý priemer bol 500 mm. Toto konštrukčné riešenie sa zvolilo z toho dôvodu, že vo valcovacom programe v rámci Československa to bol najväčší možný priemer.

Parogenerátory

Parogenerátory slúžili na odvod tepla z aktívnej zóny a na výrobu pary stredného a nízkeho tlaku. Inštalovaných bolo šesť parogenerátorov, ktoré v dvojiciach vyrábali paru pre jednu turbínu.

Pre elektráreň A1 bol vyrobený článkový symetrický unikátny typ parogenerátorov. Veľmi dobre vyhovoval dilatačným požiadavkám a pri poruche niektorého článku bolo ho možné opraviť alebo vymeniť. Na overenie konštrukčného riešenia bola vo výrobnom závode vybudovaná skúšobňa parogenerátorov s okruhom pracujúcim pri parametroch prevádzky A1. Skúšobňa sa používala na výskum a experimenty pre overenie



Principiálna technologická schéma parogenerátorov v primárnom okruhu

funkcie a dosahovaných parametrov nielen parogenerátorov, ale aj iných zariadení elektrárne.

Na zvýšenie celkovej tepelnej účinnosti obehu bol parný okruh dvojtlakový. Strednotlaková para na výstupe z parogenerátorov mala tlak 3,2 MPa a teplotu 400°C. Nízkotlaková para s tlakom 220 kPa a teplotou 185°C sa zmiešavala so strednotlakovou parou za prvým dielom turbíny.

Každý parogenerátor mal tri zvislé paralelné sekcie, ktoré boli obalené tesnými plechovými puzdrami s tepelnou izoláciou a odbermi dozimetrickej kontroly. Každá sekcia mala trinásť paralelných dvojvetví sériovo radených výhrevných plôch, ktoré mali tvar „U“ v usporia-

daní rúrka v rúrke s dištančnými mriežkami na zaistenie vzájomnej polohy. Vonkajšia rúrka mala ∅ 159 mm a bolo v nej devätnásť rúrok s ∅ 22x2,5 mm. Vo vnútorných rúrkach prúdila voda alebo para a v medzirúrkovom priestore prúdil v opačnom smere CO_2. Rúrky tvoriace výhrevnú plochu boli zakotvené do rúrkovnice na koncoch „U“ článku. Jednotlivý „U“ článok tvoril veľmi pružný kompaktný prvok, ktorý sa dal sériovo vyrábať a zostavovať. V ohybe článku bola umožnená dilatácia vnútorného zväzku oproti plášťovej rúre.

Horúci plyn vstupoval do parogenerátorov zhora a smerom dole sa ochladzoval. Voda a para prúdiace zdola sa zohrievali a tak sa dosiahla súhlasná prirodzená i nútená konvekcia.

Teplovýmenné plochy v smere zhora dolu mali tieto teplovýmenné plochy:

- strednotlakový prehrievač,
- strednotlakový bubon,
- strednotlakový odparovač,
- strednotlakový ohrievač,
- nízkotlakový prehrievač,
- nízkotlakový bubon,
- nízkotlakový odparovač,
- spoločný nízkotlakový prehrievač.

Horúci CO_2 prichádzal do každého parogenerátora dvomi vetvami primárneho okruhu. V parogenerátore sa obe vetvy rozdeľovali do šiestich potrubí, z ktorých vždy dve boli pripojené na kolektor horúceho plynu v príslušnej zvislej sekcie parogenerátora. Z kolektoru plyn pretekal jednotlivými „U“ článkami smerom od strednotlakového prehrievača k spoločnému nízkotlakovému ohrievaču a odtiaľ do výstupného kolektora. Kolektory z jednotlivých sekcií sa spájali do spoločného potrubia vedúceho na satie turbokompresorov.

Na kontrolu tesnosti medzi primárnym a sekundárnym okruhom slúžila časť systému technologickej dozimetrickej kontroly, ktorá vyhodnocovala aktivitu odoberaných vzoriek pary a vody z jednotlivých častí parogenerátorov.

Na ochranu sekundárneho okruhu po zvýšení tlaku pri prasknutí

teplovýmennej rúrky boli určené osobitné poistné ventily s automatikou, ktorá vyradila z činnosti normálne poistné ventily a otvorila havarijné ventily. Z nich viedla zmes para – plyn do havarijných kondenzátorov, kde kondenzovala para a CO_2 bol vedený do havarijných plynojemov.

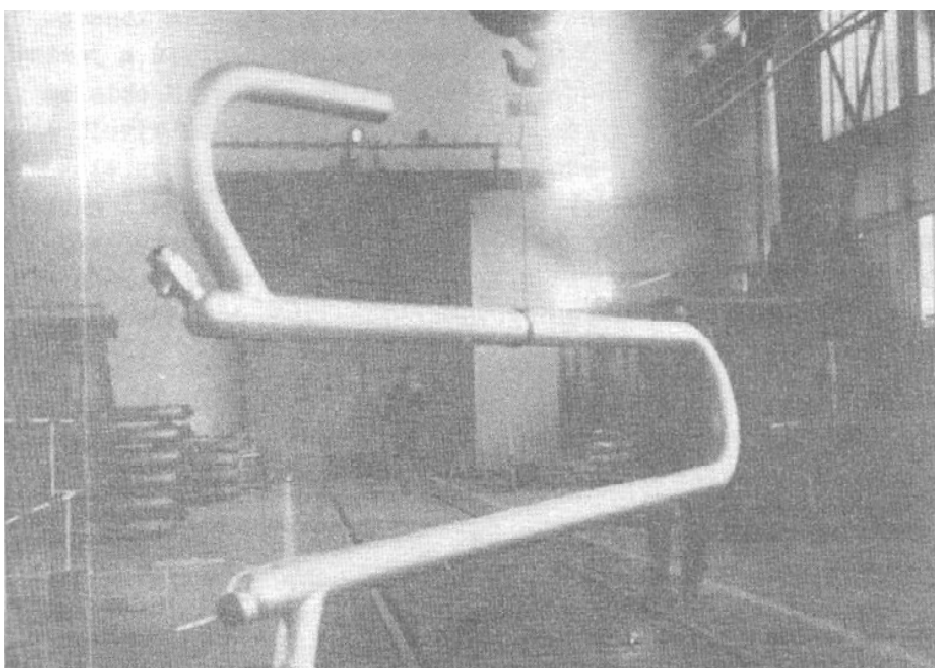
Základné parametre parogenerátora	
Parameter	**Hodnota**
Primárna strana s CO_2	
Teplota CO_2 na vstupe [°C]	425, maximálne 435
Tlak CO_2 na vstupe [MPa]	5,45
Teplota CO_2 na výstupe [°C]	97
Tlak CO_2 na výstupe [MPa]	5,34
Sekundárna strana	
Spoločný ohrievač	
Teplota vody na vstupe[°C]	34
Teplota vody na výstupe [°C]	120
Množstvo vody [t/h]	123,6
Pracovný pretlak v ohrievači [kPa]	200
Nízkotlaková časť	
Teplota napájacej vody [°C]	120
Parný výkon [t/h]	36,7
Tlak nízkotlakovej pary za prehrievačom [kPa]	220
Teplota nízkotlakovej pary za prehrievačom [°C]	185
Strednotlaková časť	
Teplota vody na vstupe [°C]	120
Parný výkon [t/h]	86
Tlak strednotlakovej pary za ohrievačom [MPa]	3,15
Teplota strednotlakovej pary za ohrievačom [°C]	asi 400
Parametre jedného bloku	
Množstvo strednotlakovej pary [t/h]	127
Tlak strednotlakovej pary [MPa]	3,15
Teplota strednotlakovej pary [°C]	400
Množstvo nízkotlakovej pary [t/h]	73,4
Tlak nízkotlakovej pary [kPa]	220
Teplota nízkotlakovej pary [°C]	185

Výroba parogenerátorov

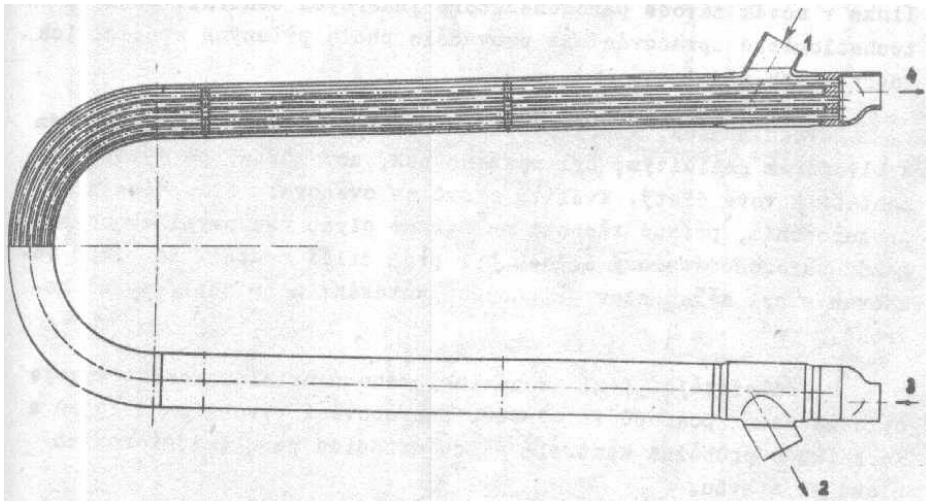
Pred výrobou parogenerátorov bolo treba vypracovať nielen koncepciu, ale tiež veľa technologických prvkov a riešení, napríklad kontrolu tesnosti, pružnosť, rýchle dilatácie, vplyv teplotných rázov. Rozhodujúcou technologickou úlohou bol vývoj spôsobu navliekania vonkajšej rúry na vnútorné rúrky za studena tak, aby vnútorné rúrky neboli zvárané. Pre túto operáciu bol vyvinutý špeciálny ohýbací stroj.

Povrch rúrok, ktoré pri prevádzke boli v styku s plynným CO_2 bol upravený tak, aby zostal po výrobe i montáži kovovo čistý. Kvalita zvarov sa overovala stopercentným prežarovaním a tesnosť vákuovými skúškami s meraním natekania hélia. O náročnosti výroby a skúšok svedčí to, že spolu bolo v šiestich parogenerátoroch 124 488 zvarov rúrka – rúrkovnica a 3 276 zvarov na „U“ článkoch. Ďalších viac ako 2 000 zvarov bolo pri montáži parogenerátorov v elektrárni.

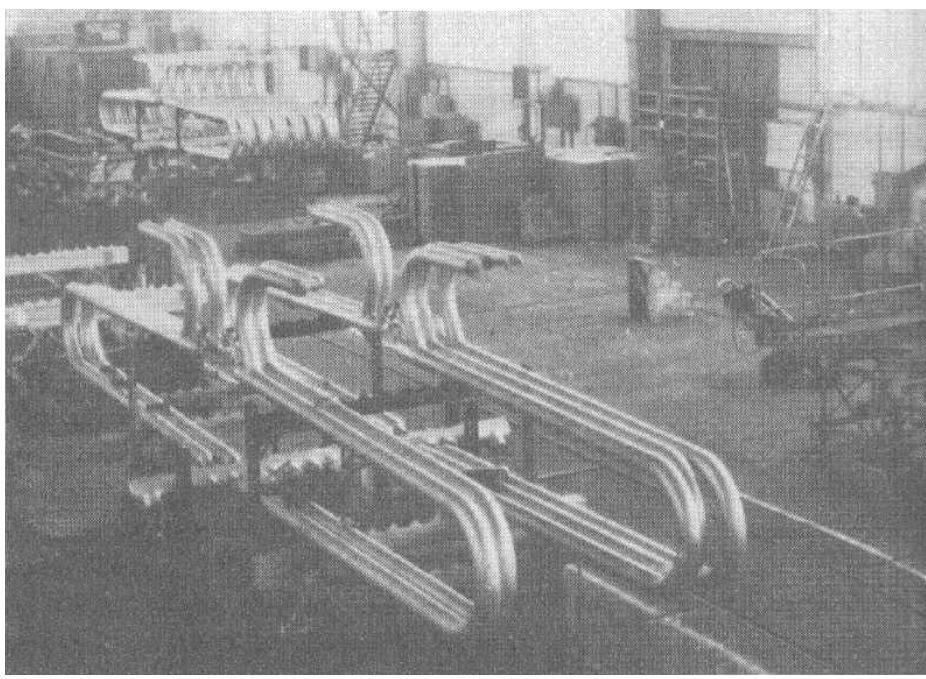
Niektoré fázy výroby sú na nasledujúcich obrázkoch.



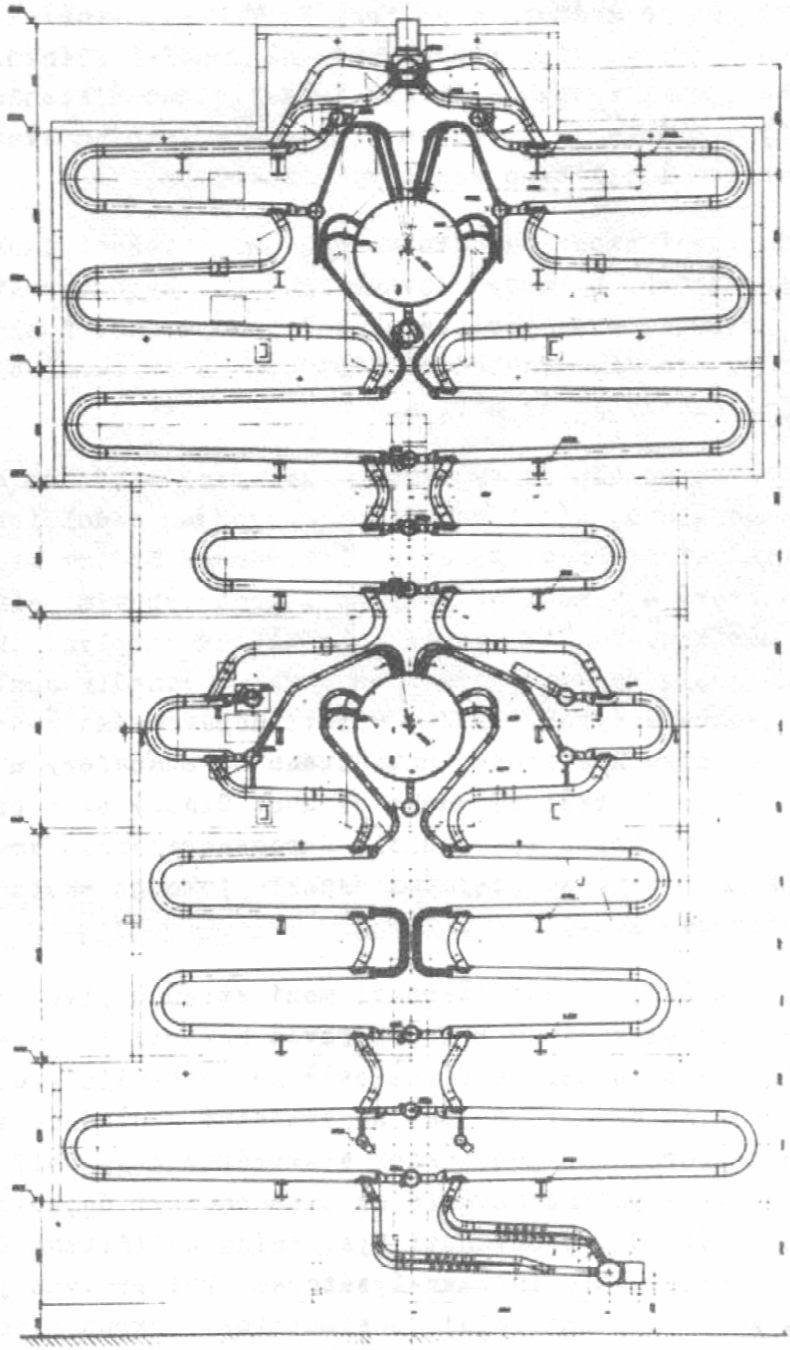
„U“ článok parogenerátora – modul



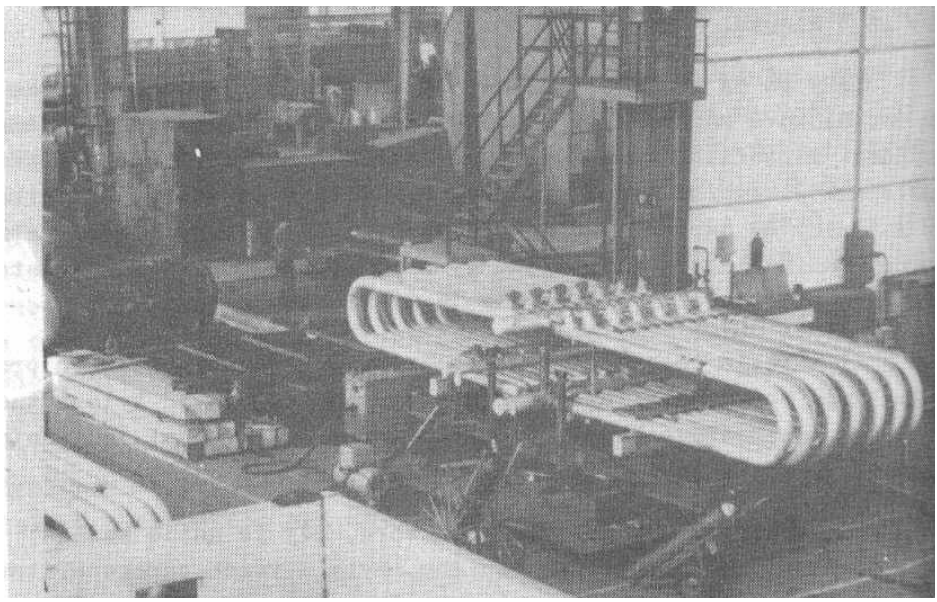
Rez „U“ článkom parogenerátora



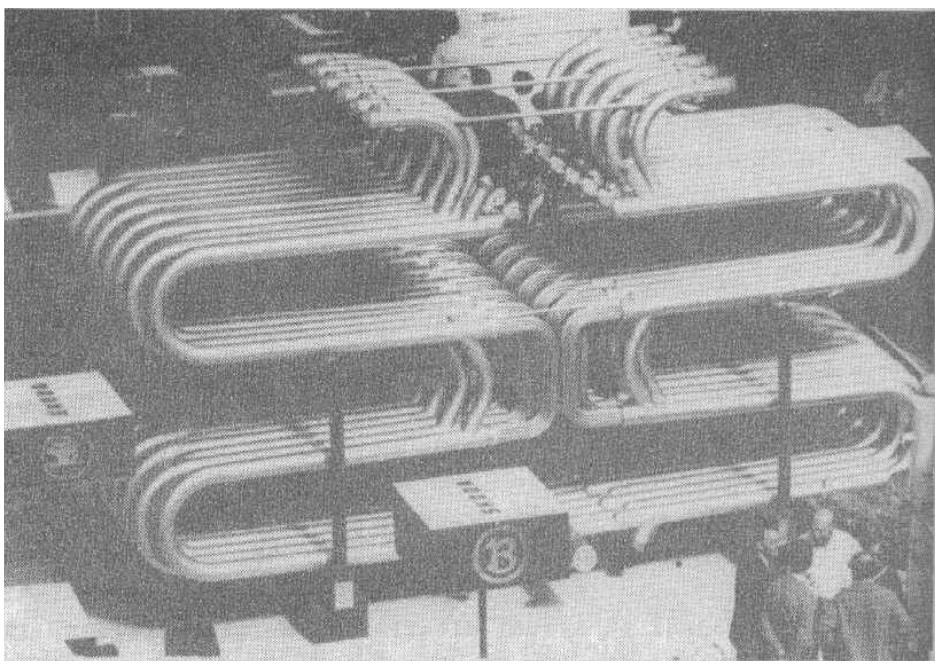
Privarovanie „U“ článkov parogenerátora na kolektor



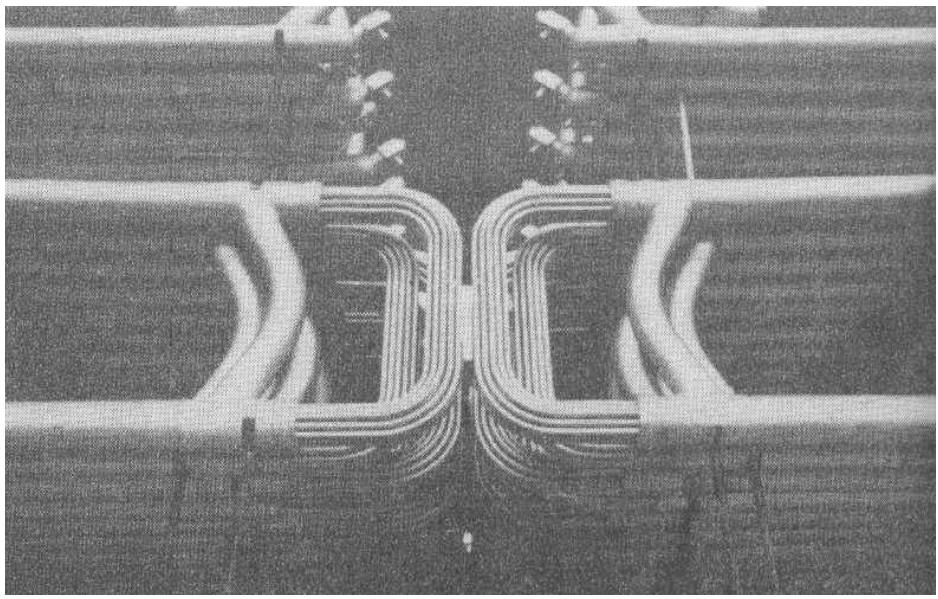
Schematický rez parogenerátorom



Výroba nízkotlakových ohrievačov



Dokončovanie výroby dvojdielnych nízkotlakových odparovačov



Detaily koncov „U“ článkov a potrubí odvodu plynu a parovodnej zmesi

Transport jednej sekcie parogenerátora do kobky parogenerátorov v medzistrojovni

Na parogenerátore č. 6 a na havarijnom systéme bolo inštalovaných veľa snímačov s príslušnými prístrojmi pre experimentálny výskum s cieľom získať údaje pre posúdenie parogenerátorov a havarijného systému pri všetkých predpokladaných prevádzkových stavoch. Overovala sa napríklad súčinnosť strednotlakovej a nízkotlakovej časti v reálnych podmienkach, korózia primárneho a sekundárneho okruhu, tepelná zotrvačnosť, nábeh a odstavovanie, pulzácie, ovládateľnosť, regulácia, skúšala sa prirodzená cirkulácia.

Výsledky všetkých skúšok boli uspokojivé.

Spúšťanie a prevádzka

V I. a II. etape energetického spúšťania boli v normálnej prevádzke parogenerátory 1. a 3. bloku. Parogenerátory (č. 3 a č. 4) 2. bloku boli v nahriatom stave pripravené odvádzať teplo v režime superhavarijného dochladzovania.

Parogenerátory boli zmontované niekoľko rokov pred začiatkom energetického spúšťania. Vzhľadom na veľký počet spojov v rúrkovniciach bolo nutné sa presvedčiť o tesnosti teplovýmenných plôch a rúrkovníc, ktoré boli hranicou medzi primárnym a sekundárnym okruhom. Geometria parogenerátorov a stav montáže neumožnili vykonať detailné skúšky, ktoré by preverili každý zvarový spoj. Pred energetickým spúšťaním sa overila tesnosť parogenerátorov zvláštnymi skúškami natlakovaním pomocou CO_2 zo strany primárneho okruhu. Tesnosť bola posudzovaná meraním prieniku CO_2 do sekundárneho okruhu. Prvopočiatočná tesnosť bola uspokojivá.

Už počas I. etapy energetického spúšťania sa zistili netesnosti. Najskôr boli na spoločných nízkotlakových prehrievačoch parogenerátorov č. 1 a č. 5. Z parogenerátora č. 1 bol vyrezaný celý U – článok, namiesto neho bol na strane primárneho okruhu privarený rúrový prepoj a sekundárna strana bola zaslepená. Na parogenerátore č. 5 bola nájdená netesná rúrka, ktorá bola zaslepená a zavarená. Na zistenie príčin vzniku netesností boli zo spoločného nízkotlakového prehrievača parogenerátora č. 1 vyrezané dva celé U – články.

Netesnosti boli neskôr zistené aj na ostatných parogenerátoroch a preto bola elektráreň od 22. 6. 1973 do 15. 9. 1973 odstavená na opravy. Na zistenie príčiny vzniku netesností a pre určenie spôsobu opravy bola určená pracovná komisia, ktorej členovia boli okrem zamestnancov A1 pracovníci výrobcu IBZKG, Škody Plzeň, Štátneho výskumného ústavu

ochrany materiálov, projektanta Energoprojektu a Výskumného ústavu zváračského.

Po skončení rozsiahleho skúmania vyrezaných vzoriek sa potvrdilo, že netesnosti vznikali len na zvaroch rúrkovníc. Nebola vhodne zvolená geometria stykových plôch na rúrkovniciach a vo zvarovom kove boli póry a dutiny s veľkosťou až do 2 mm.

Prvotnou príčinou vzniku netesností boli plynové dutiny a póry vo zvaroch, ktoré boli dôsledkom nekvalitnej práce pri zváraní. Póry prechádzali prakticky cez celú vrstvu zvaru a vplyvom bežnej prevádzky sa steny medzi pórmi porušili. Otvorením mikropórov a následnou koróziou sa prepojil primárny a sekundárny okruh.

Korózia prebiehala zrejme už od začiatku prevádzky, pretože napriek kontrole tesnosti parogenerátorov pri výrobe i pri montáži zrejme nebolo možné vtedajšími metódami zistiť malé netesnosti. Po morení sekundárnej strany parogenerátorov a po začatí prevádzky sa tieto netesnosti otvorili. Oxid uhličitý vnikajúci do vody a pary sekundárneho okruhu spôsoboval lokálnu koróziu, ktorá sa prejavila rozšírením pórov, zväčšením a rozvojom netesností.

Po odstavení elektrárne sa dôkladne overovala tesnosť jednotlivých parogenerátorov. Na parogenerátore č.1 bolo nájdených desať netesností. Vyskúšala sa technológia opráv, ale pretože sa neosvedčila, bola upravená. Harmonogram opráv všetkých parogenerátorov bol zostavený podľa technologických obmedzení – musel byť zabezpečený odvod zvyškového tepla z reaktora – a podľa radiačnej situácie.

Oprava začínala zistením netesností a po oprave sa tesnosť overovala rôznymi metódami. Najviac sa osvedčila akustická metóda, pri ktorej sa sluchom s použitím kovového zvukovodu po natlakovaní primárnej strany CO_2 a sekundárnej strany vodou, odpočúval zvuk spôsobený bublinkami CO_2.

Existencia veľkých netesnosti si vyžiadala opravu v niekoľkých krokoch. Najskôr sa odstránili veľké netesnosti a až potom bolo možné hľadať malé netesnosti. Po nájdení poruchových U – článkov a po vyrezaní prechodových rúr sa sprístupnili rúrkovnice na opravu. Po skončení opráv sa skúška tesnosti opakovala. Parogenerátor sa pokladal za tesný, ak pri tlaku CO_2 v primárnom okruhu bola jeho koncentrácia na sekundárnej strane menšia ako 0,25 % počas 24 hodín. Počas opráv sa našlo a odstránilo 152 netesností.

V ďalšom roku prevádzky sa začal upravovať chemický režim sekundárnej strany parogenerátorov dávkovaním lúhom sodným a amoniakom

na zmiernenie korozívneho účinku CO_2. Stav tesnosti sa však nezmenil. Vo februári 1974 bol opravovaný parogenerátor č. 2, v ktorom boli štyri netesnosti na strednotlakovom ohrievači a jedna na strednotlakovom odparovači. Vyskúšali sa dva nové spôsoby opráv, z nich jeden sa zdal byť vhodný, ale bol časovo náročnejší.

Opravy komplikovala radiačná situácia. Dávkový príkon v miestach opráv bol až 1,5 mSv/h, čo obmedzovalo pobyt jedného zvárača ako najviac exponovaného opravára na dvadsať hodín za štvrťrok. V tom čase bola povolená efektívna dávka 30 mSv/štvrťrok, resp. 50 mSv/r. Pri počte vhodných vlastných alebo dodávateľských zváračov už začal byť problém s odstránením netesností. V niektorých prípadoch bolo treba použiť aj olovené tienenie na zníženie dávok.

Uvažovalo sa aj o neobvyklom spôsobe odstránenia netesností tak, že do primárneho okruhu by sa nadávkovalo vodné (draselné) sklo, ktoré by utesnilo všetky existujúce netesnosti na zvaroch rúrka – rúrkovnica prakticky naraz. Pri predpokladanom množstve draslíka cirkulujúceho v primárnom okruhu asi 1 t, by po jeho aktivácii bol dávkový príkon v parogenerátoroch na úrovni až 13,8 Sv/h. Na prijateľnú hodnotu by sa znížil 85 hodín po odstavení slučky a to bolo pre prevádzku neprijateľné.

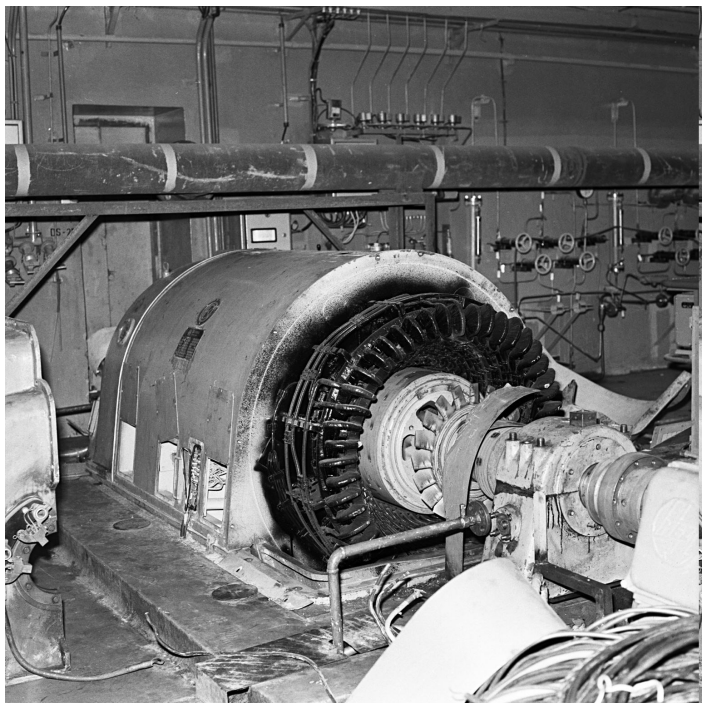
V roku 1974 bolo zistených a odstránených zaslepením na rúrkovniciach, alebo vyrezaním celého U - článku päť nových veľkých netesností. V nasledujúcom roku v odstávke od marca do decembra 1975 bolo opravených štyridsaťosem „U“ – článkov. V druhej polovici roka 1976 boli počas prevádzky odstránené netesnosti na štyroch parogenerátoroch. Netesnosti vznikali prakticky rovnomerne na všetkých miestach okrem strednotlakového prehrievača. Najviac bol korózne postihnutý parogenerátor č. 1.

Počas odstávky po havárii dňa 5.1.1976 sa parogenerátory neopravovali a boli udržiavané v suchom stave pod vákuom. Pred opätovným uvedením elektrárne do prevádzky v júni 1976 boli všetky parogenerátory skontrolované na tesnosť. Hoci ich stav bol dobrý, v ďalšom období sa vyskytovali nové netesnosti.

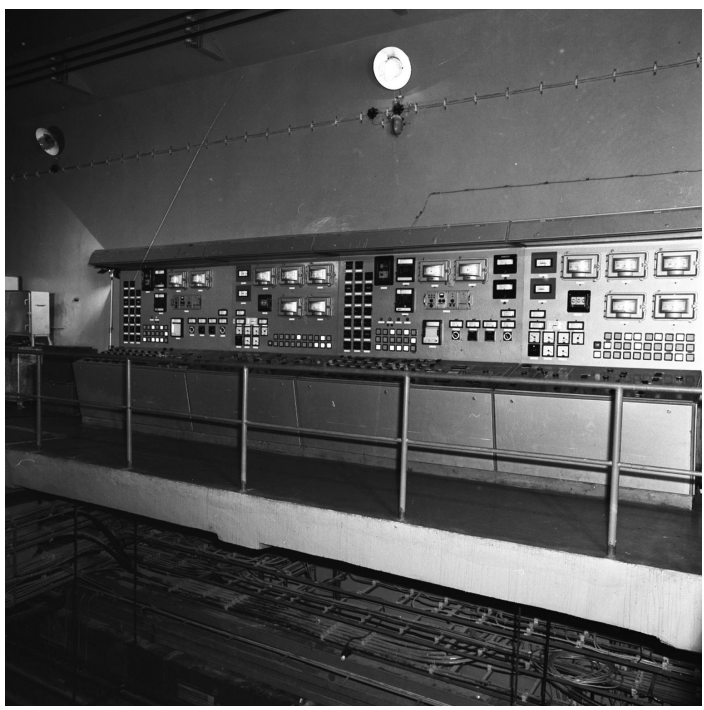
Stav parogenerátorov a možnosti opráv sa stali jedným z rozhodujúcich činiteľov pri rozhodnutí o neobnovení prevádzky po havárii vo februári 1977.

Turbokompresory

Turbokompresory zabezpečovali prúdenie chladiaceho média v primárnom okruhu. Turbokompresor bol jednostupňový radiálny, poháňaný



Odkryté „čelo“ synchrónneho motora turbokompresora



Hala turbokompresorov. Miestny panel ovládania turbokompresora

synchrónnym elektromotorom s výkonom 5 MW s obmedzením veľkých rozbehových prúdov pomocou špeciálnej rozbehovej schémy Pracoval pri 3 000 ot/min.

Na vstupe do obežného kolesa boli zabudované štyri lopatky na usmernenie a stabilizovanie toku CO_2. Za nimi pred obežným kolesom bolo dvanásť regulačných lopatiek otočných okolo svojej osi, spriahnutých cez mechanický prevod s natáčacím zariadením. Nastavovaním polohy lopatiek sa dal regulovať prietok cez turbokompresory v rozsahu 40 – 100 % nominálneho prietoku.

Pracovný priestor kompresora bol okolo hnacej osi utesnený systémom upchávok, ktorý mal zabrániť úniku chladiaceho CO_2 pozdĺž hriadeľa do atmosféry pri stojacom i točiacom sa stroji, zabrániť prieniku mazacieho oleja do CO_2 a zabrániť prieniku zmesi olejových pár a plynu do primárneho okruhu.

Upchávkový systém turbokompresora mal prevádzkovú upchávku, ktorá pôsobila pri práci a pokojovú upchávku pôsobiacu pri stojacom stroji. Prevádzková upchávka mala točiaci sa krúžok nasunutý na hriadeli a stojací grafitový krúžok s vymedzeným axiálnym posuvom podľa hriadeľa.

Grafitový tesniaci krúžok bolo treba mazať, aby sa pri vysokých rýchlostiach otáčania rotora a trení nezničil. Na miesto upchávky sa privádzal tlakový olej, ktorý na stykovom mieste hriadeľa a grafitového krúžku tvoril olejový film a tak ho chránil pred zničením. Olej preniknutý cez tesniacu plochu sa zachytával na zbernom krúžku a odvádzal do drenážnej nádrže. Najväčšia povolená hodnota prieniku oleja do plynu bola 0,2 l/h.

Aby upchávka plnila svoju funkciu, musel byť medzi tlakom oleja a plynu tlakový rozdiel 160 ± 10 kPa, maximálny dovolený pretlak bol 350 kPa. Požadovaný tlakový rozdiel udržiaval regulátor olej – plyn.

Aby sa zabránilo prieniku pár oleja do prúdiaceho plynu bol medzi obežným kolesom a prevádzkovou upchávkou systém dvoch labyrintových upchávok. Labyrintová upchávka bližšie k obežnému kolesu mala dvanásť krytov nalisovaných na hriadeli a mala spomaliť a usmerniť prúd plynu idúceho od obežného kolesa k prevádzkovej upchávke. Druhá upchávka bližšie k prevádzkovej mala spomaliť a usmerniť zmes aerosólov plynu a oleja preniknutého cez prevádzkovú upchávku.

Pokojová upchávka mala oddeliť primárny okruh od atmosféry pri stojacom stroji. Bola umiestnená medzi dvomi labyrintovými upchávkami. Tvoril ju pružný gumový prstenec, ktorý sa tlakom plynu rozťahoval.

Potrebný plyn bol privádzaný z plynového hospodárstva a podmienkou správnej funkcie bol tlak o 500 kPa väčší, ako tlak plynu v primárnom okruhu.

K pomocným zariadeniam turbokompresorov patrilo olejové hospodárstvo a filtračná stanica na zachytávanie oleja z plynu prenikajúceho cez upchávky.

Osobitnú úlohu mali v I. a II. etape energetického spúšťania turbokompresory č. 3 a č. 4. Pracovali pri 600 ot/min a počas chodu ostatných turbokompresorov pracovali do čiastočne otvorených obtokov. Poháňané boli asynchrónnymi motormi s kotvou nakrátko s veľkým záberovým momentom na hriadeli, tzv. ponny-motormi, namontovanými namiesto budičov. Motory mali výkon 55 – 65 kW, napájali sa priamo z dieselgenerátorovej stanice a boli určené na havarijné dochladzovanie reaktora pri výpadku ostatných štyroch turbokompresorov pracujúcich pri 3 000 ot/min. Neskôr sa pony-motory namontovali na všetky turbokompresory.

Hala motorov turbokompresorov - pôvodné riešenie

Každý zo šiestich turbokompresorov bol umiestnený vo vlastnej kobke. Šesť elektromotorov, ktoré ich poháňali boli na spoločnej chodbe pred kobkami. Hriadele prechádzali cez tesniace priechodky. Maximálne množstvo plynu

dodaného jedným turbokompresorom bolo 1 000 t, tlak na sacej strane bolo 5,32 MPa, na výstupe 6,57 MPa.

Medzi pomocné zariadenia kompresorov patrili spúšťacie indukčné cievky, okruhy dodávajúce mazací olej do tesniaceho puzdra a zariadenie na filtráciu pary vystupujúcej z tesniaceho puzdra.

Prevádzka

Turbokompresory

Problémom bola spoľahlivosť olejovej upchávky u turbokompresora, ktorá musela pracovať s dlhodobou spoľahlivosťou pri tlakoch do 6,0 MPa a pri 600 ot./min aj 3 000 ot./min turbokompresora. Upchávky boli viackrát poškodené a ich konštrukcia sa upravovala. Doplnené bolo meranie prietoku CO_2 cez labyrintové upchávky.

Okruh CO_2

Počas spúšťania boli problémy s únikmi CO_2, ktoré podľa projektu nemali byť väčšie ako 150 kg/h. Už v prvej etape komplexných skúšok sa nepodarilo znížiť ich pod 400 kg/hod. To bola príliš veľa z hľadiska strát koncentrácie ťažkej vody a tiež z hľadiska množstva doplňovaného CO_2. Jednou z hlavných úloh bolo maximálne zníženie úniku z primárneho okruhu, ale pri tlaku 6 MPa sa nepodarilo znížiť úniky pod 250 kg/hod. Primárny okruh bol pre dosiahnutie lepšej tesnosti príliš členitý, obsahoval mnoho prírubových a utesňovacích spojov.

Pri havárii v ktorej došlo počas neaktívnych skúšok k vniknutiu väčšieho množstva oleja z turbokompresorov do primárneho okruhu bola hlavná pozornosť venovaná konštrukcii a režimom práce tesnenia, aby sa získala istota, že nemôže dôjsť k rýchlemu a nekontrolovateľnému vniknutiu oleja do primárneho okruhu. To by totiž mohlo viesť k poškodeniu palivových článkov a zhoršeniu zloženia ťažkej vody. Prípustný obsah pár oleja v primárnom okruhu bol stanovený na 10 ppm. Pre zaistenie takejto čistoty okruhu bolo nevyhnutné, aby v doplňovanom plyne bol olej maximálne $1 \div 3$ ppm. Bolo taktiež nutné uistiť sa, že pri práci všetkých turbokompresorov vo všetkých pracovných režimoch a pri všetkých prevádzkových tlakoch, vrátane maximálneho, bolo možné kontrolovať a udržiavať obsah oleja v primárnom okruhu v požadovaných medziach.

11. OKRUH ŤAŽKEJ VODY

Okruh D_2O slúžil pre zabezpečenie normálnej prevádzky reaktora tým, že udržiaval fyzikálno – chemické parametre ťažkej vody ako moderátora. Projektové a skutočné riešenie museli zohľadňovať dve závažné hľadiská.

Prvé hľadisko bola vysoká cena ťažkej vody.Jej úniky zvyšovali prevádzkové náklady. Preto sa požadovalo, aby úniky z okruhu D_2O boli čo najmenšie a aby boli organizované s možnosťou zhromažďovať a regenerovať D_2O tak, aby sa mohla vrátiť do okruhu.

Druhým hľadiskom bola izotopická čistota D_2O. Podľa výpočtov by zníženie obsahu D_2O vo vode o 0,1 % spôsobilo aj zníženie zásob reaktivity o 0,14 % a tým by sa znížilo dosiahnuteľné vyhorenie. (Za obdobie II. etapy energetického spúšťania sa reaktivita zmenšila o 0,432 %).

V okruhu vznikali tiež vzájomné reakcie ťažkej vody a CO_2 pod vplyvom ionizujúceho žiarenia, pri ktorých sa tvorili organické väzby. Tie ovplyvňovali chemický režim ťažkovodného okruhu. Spomenuté javy boli vlastné práve tomuto konkrétnemu reaktoru a boli dané konštrukčným prepojením ťažkovodného a plynového okruhu.

Okruh mal tieto základné časti:

1. okruh chladenia,
2. systém čistenia D_2O,
3. systém doplňovania D_2O,
4. systém vypúšťania D_2O z avialovej nádoby a oddeliteľných častí potrubia,
5. systém odberu vzoriek D_2O a kontroly jej fyzikálno – chemických parametrov,
6. systém signalizácie a odvodu únikov D_2O pri normálnej prevádzke a pri poruchách.

Okruh chladenia D_2O

Okruh mal tri nezávislé slučky s bezupchávkovými odstredivými cirkulačnými čerpadlami typu CENTV-134, chladičmi, spojovacím potrubím a armatúrami. D_2O sa v chladičoch ochladzovala vodou cirkulujú-

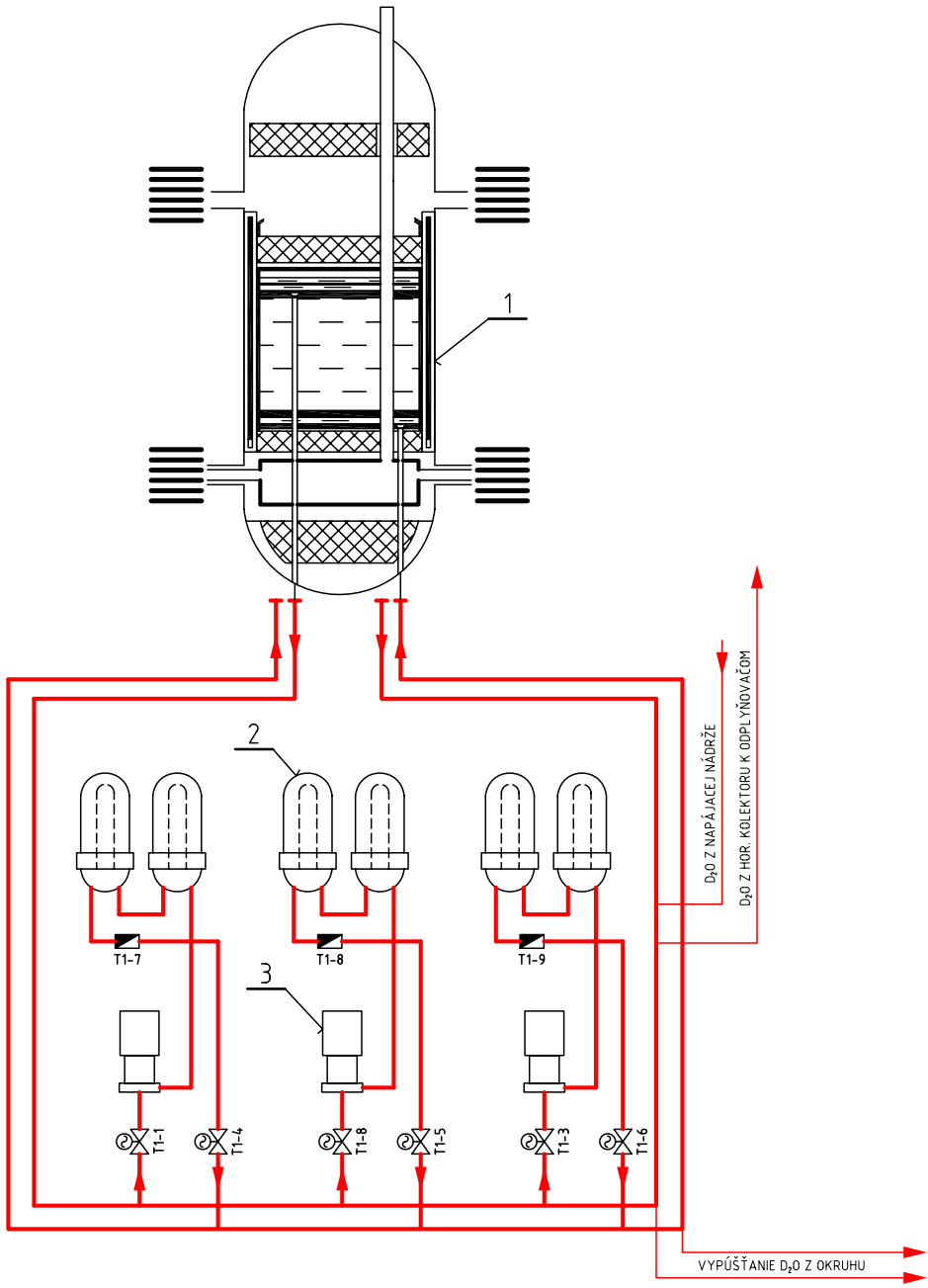


Schéma okruhu chladenia D_2O

Legenda *– 1. reaktor, 2. chladič D_2O, 3. obehové čerpadlo D_2O.*

cou cez ventilátorové chladiace veže primárneho okruhu. Pri normálnych podmienkach pracovali dve čerpadlá, tretie bolo v rezerve.

Základné parametre cirkulačného čerpadla D_2O	
Parameter	**Hodnota**
Výkon [t{h]	465
Tlak na výtlaku čerpadla [MPa]	6,7 + minimálne 0,6
Tlak v saní čerpadla [MPa]	6,7
Teplota D_2O [^oC]	do 90
Prietok chladiacej vody [t{h]	6
Otáčky čerpadla [ot{min]	3 000
Napätie na motore [V]	380
Výkon čerpadla [kW]	180 ÷ 260

Dvojtelesové chladiče D_2O boli vyrobené z nehrdzavejúcej ocele z rúrok tvaru „U“ uložených v telese chladiča. V jednom chladiči bolo 880 rúrok ∅12x1,25 mm. V rúrkach prúdila ťažká voda pod tlakom asi 6,5 MPa. Z vonkajšej strany okolo rúrok cirkulovala chladiaca voda zabezpečujúca odvod tepla. V každej slučke boli dva chladiče v sérii. Chladiaca voda bola neupravená voda z rieky Váh.

Systém čistenia D_2O

Ťažká voda sa čistila od produktov korózie a iných prímesí v destilačnej stanici, ktorá mala dve slučky, každú s výkonom 200 kg/h. Jedna z nich bola rezervná, druhá pracovná.

Každá slučka mala odparku, separátor D_2O, kondenzátor D_2O a spojovacie potrubie. Spoločným zariadení pre slučky boli odplyňovač D_2O, nádrž kondenzátu H_2O + D_2O, preplachovacie čerpadlo, olejový filter, výveva a spojovacie potrubie.

Z horúceho kolektora cirkulačného okruhu D_2O sa voda privádzala do odplyňovača, kde sa zbavila CO_2 a postupovala do odparky. V odparke sa voda odparovala a jej pary prechádzali cez separátor kvapiek do kondenzátora D_2O. Odtiaľ kondenzát prechádzal do manipulačnej nádrže v systéme doplňovania D_2O.

Plyn uvoľnený v odplyňovači a v kondenzátore prechádzal do vymrazovačov, kde sa vymrazili pary D_2O nachádzajúce sa v CO_2.

Do okruhu destilačnej stanice patrili aj vymrazovače ťažkej vody. Chladiaci plyn CO_2 bol v avialovej nádrži v priamom styku s D_2O, v ktorej sa rozpúšťal. Tiež strhával pary D_2O. Na zníženie strát vody

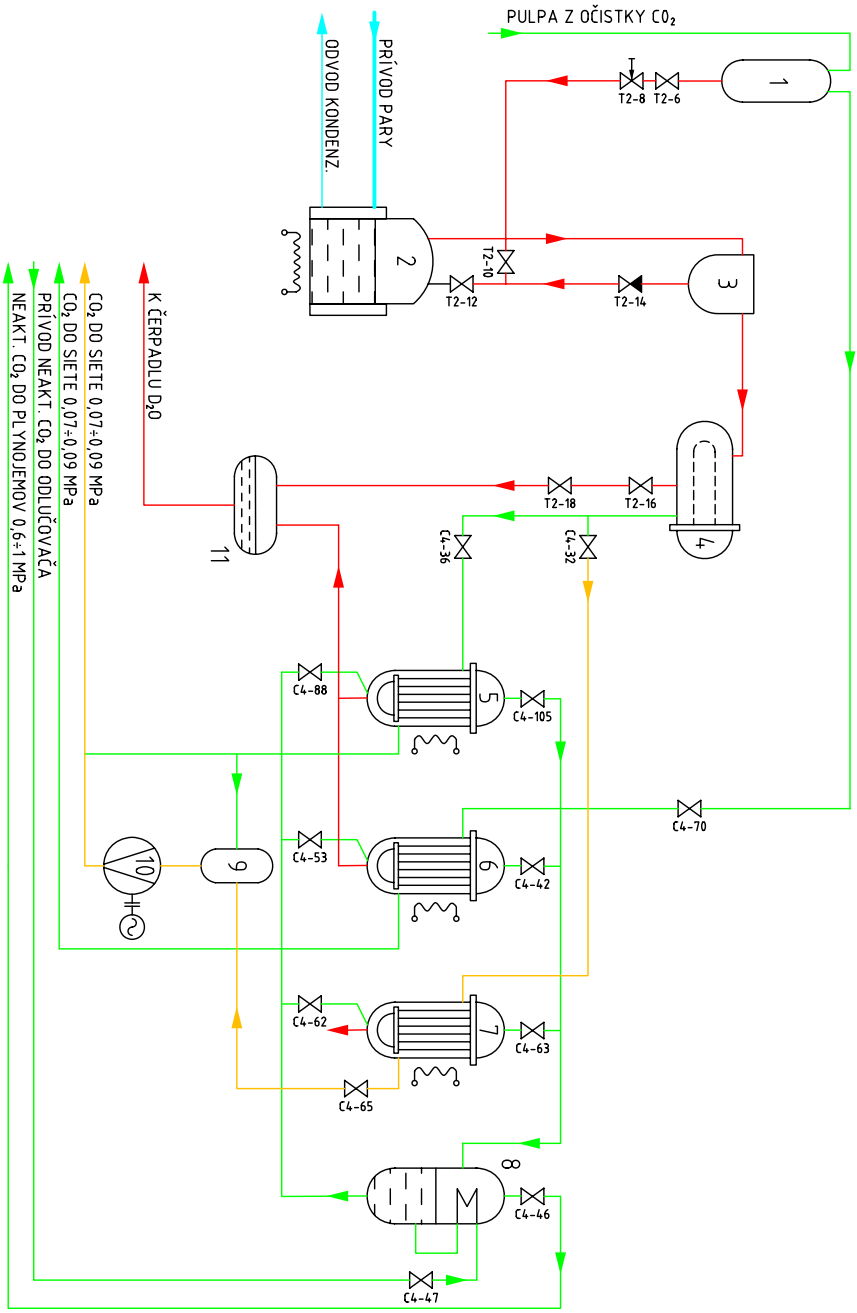


Schéma destilačnej stanice D_2O a vymrazovačov

Legenda *– 1. odplyňovač, 2. odparka D_2O, 3. separátor, 4. kondenzátor D_2O, 5. vymrazovač D_2O za kondenzátorom, 6. vymrazovač D_2O za odplyňovačom, 7. vymrazovač H_2O, 8. odlučovač, 9. olejový filter, 10. vývevy, 11. manipulačná nádrž.*

odnášaním plynom boli do technologickej schémy zaradené vymrazovače.

Systém vymrazovačov tvorili dva vymrazovače za odplyňovačom destilačnej stanice D_2O, dva vymrazovače za kondenzátormi D_2O, vymrazovač D_2O a odlučovač kvapalného CO_2.

Plyn na vymrazovanie vstupoval do medzirúrkového priestoru prvého vymrazovača, kde svojím teplom topil D_2O, ktorá namrzla na vonkajšom povrchu rúrok v predchádzajúcom cykle. Svojím teplom topil D_2O namrznutú na vonkajšej strane rúrok v predchádzajúcom cykle. Plyn sa tak ochladil a vstupoval do medzirúrkového priestoru druhého vymrazovača, kde D_2O namŕzala na rúrkach. Teplota potrebná na vymrazovanie sa získavala odparovaním skvapalneného CO_2, ktorý sa privádzal z odlučovača kvapalného CO_2. Po odparení bol vymrazovací CO_2 privádzaný do odlučovača CO_2, kde sa ochladil na rúrkach, ktorými bol vedený kvapalný CO_2. Časť plynu sa skvapalnila a časť sa vypúšťala do plynojemov.

Po namrznutí sa vymrazovač odstavil a voda sa roztopila pomocou elektrických vyhrievacích telies. D_2O sa potom odvádzala do manipulačnej nádrže.

Systém doplňovania D_2O

Ťažká voda sa doplňovala do avialovej nádoby na nahradenie strát pri normálnej prevádzke z napájacej nádrže, ktorá mala dva kontaktné signalizátory hladiny a neštandardný sklenený hladinomer použitý pri komplexných skúškach.

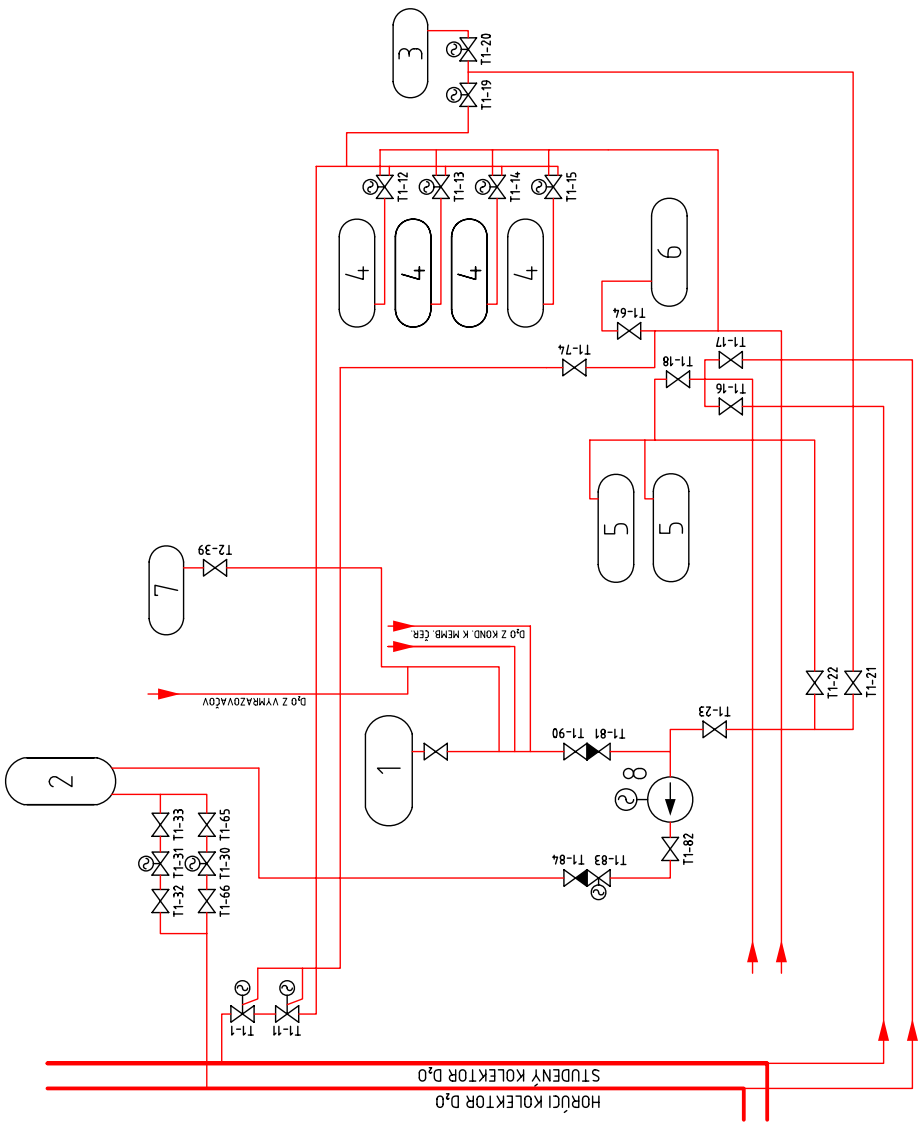
Doplňovanie vody bolo automatické alebo ručné. Impulzom od zníženej hladiny sa otvoril ventil a voda stekala samospádom z doplňovacej nádrže do cirkulačného potrubia horúcej D_2O. Hladina vody sa tým v napájacej nádrži znížila a pri dosiahnutí dolnej prípustnej hladiny sa spustilo doplňovacie membránové čerpadlo, ktoré čerpaním z manipulačnej nádrže dodávalo vodu do doplňovacej nádrže. Do manipulačnej nádrže pritekala D_2O z destilačnej stanice D_2O a z vymrazovačov D_2O alebo z nádrže čistej D_2O.

Systém vypúšťania D_2O z avialovej nádoby a oddeliteľných častí potrubia

Na vypúšťanie boli určené štyri vysokotlakové nádrže s objemom po 18,5 m^3 a jedna nízkotlaková nádrž s objemom po 18,5 m^3 a dve nádrže na vypúšťanie D_2O z potrubia s objemom po 5 m^3. Nádrže boli

vybavené kontaktnými signalizátorami hladiny a priamymi sklenenými hladinomermi.

D_2O sa z avialovej nádrže vypúšťala do vysokotlakových nádrží. Pri plnení avialovej nádoby alebo celého cirkulačného okruhu bola D_2O



Systém vypúšťania D_2O z avialovej nádoby a oddeliteľných častí potrubia

***Legenda** – 1. manipulačná nádrž D_2O, 2. napájacia nádrž, 3. nízkotlaková nádrž D_2O , 4. vysokotlaková nádrž D_2O, 5. nádrž na vypúšťanie D_2O z potrubia, 6. zberná nádrž únikov D_2O + H_2O, 7. nádrž na čistú D_2O, 8. membránové čerpadlo.*

zohriatým plynom vytláčaná rovnakou trasou. Na spojovacom potrubí z reaktora do vysokotlakových nádrží boli upchávkové uzatváracie armatúry.

Na vypúšťacom potrubí boli odbočky na destilačnú stanicu D_2O a do nízkotlakovej nádrže. Časti cirkulačného okruhu, ktoré sa nedali vypustiť do vysokotlakových nádrží, sa vypúšťali do nádrže na vypúšťanie D_2O z potrubia. Do nej sa vypúšťala tiež voda z kolektorov D_2O a cirkulačných okruhov chladenia D_2O. Z nádrží sa voda vytláčala pomocou CO_2.

D_2O unikajúca z okruhov netesnosťami sa zberala do nádrže únikov D_2O. Z nej sa mohla po prečistení v destilačnej stanici D_2O vrátiť do cirkulačného okruhu, ak vyhovovala svojou izotopickou čistotou. Inak bola zavedená do nádrže na zmes $D_2O + H_2O$ a odtiaľ na izotopické obohatenie.

Systém odberu vzoriek D_2O

Systém slúžil na kontrolu stavu ložísk cirkulačných čerpadiel, kontroly izotopickej čistoty vody a kontrolu obsahu rôznych prímesí.

Okrem týchto meraní bolo v okruhu D_2O zabudované aj zariadenie na meranie korózie avialovej nádoby.

Systém signalizácie a odvodu únikov D_2O

Systém mal špeciálne signalizátory, systém potrubí, špeciálnu kanalizáciu a zberné nádrže.

Prevádzka okruhu ťažkej vody

Pri komplexných skúškach sa zistilo viacero nedostatkov, ktoré komplikovali činnosť okruhu D_2O. Preto sa ešte pred spúšťaním urobili úpravy. Oddelilo sa pomocné potrubie od plynového a ťažkovodného okruhu, pre nespoľahlivú činnosť sa nenamontovalo druhé membránové čerpadlo, zmenil sa systém vypúšťania D_2O z avialovej nádoby a potrubí a zmenil sa systém odvádzania únikov tak, že sa oddelili úniky organizované a neorganizované.

Počas II. etapy energetického spúšťania bola krátkodobo v prevádzke destilačná stanica. Jej činnosť bola uspokojivá, obsah koróznych produktov sa znížil približne stokrát. Osobitným problémom bola tvorba organických kyselín. Pre vrátenie kondenzátu D_2O zo systému spaľovania traskavej zmesi do okruhu ho bolo treba od kyselín vyčistiť.

V roku 1976 sa vybudovala stanica na odstraňovanie organických kyselín z D_2O a koncom roka 1976 bola pripravená na komplexné skúšky.

Okrem toho čistenie bolo nutné aj pred izotopickým obohacovaním. Podrobnejší popis problému je v časti „Zariadenia chemickej technológia a chemický režim".

V tejto etape energetického spúšťania sa zistilo korózne napadnutie chladiča D_2O, prvého v smere prúdenia vody v prvej cirkulačnej slučke. Po opakovaných skúškach bolo nájdených osem rúrok s bodovými otvormi v priestore vodnej hladiny pod zavzdušnením.

Pretože nebolo jasné ako chladič opraviť, rozhodlo sa, že chladič bude demontovaný. Pre zabezpečenie pôvodných hydraulických pomerov bol nahradený prepojovacím potrubím. Na odstránenie netesností bol vypracovaný technologický postup, chladič bol prevezený do objektu plynového hospodárstva a tam bol opravený.

Súčasne s opravou sa začali hľadať príčiny vzniku netesností, ale nepodarilo sa ich jednoznačne určiť. V prevádzke sa urobili úpravy na strane chladiacej vody a uvažovalo sa s o vybudovaní zvláštneho medziokruhu pre chladenie okruhu D_2O špeciálne upravenou vodou. Pre vysokú náročnosť sa od takéhoto riešenia odstúpilo a začal sa hľadať vhodný inhibítor na úpravu vážskej vody.

Po demontáži chladiča D_2O sa po niekoľkodňovej prevádzke zistila porucha na motore ťažkovodného čerpadla. Do vinutia statora sa dostala voda a spôsobila skrat. Na opravu bol použitý stator z rezervného čerpadla.

Ďalším problémom prevádzky okruhu D_2O bolo zanášanie výmenníkov tepla organickými i neorganickými usadeninami a nánosmi zo strany chladiacej vody. Najviac boli postihnuté chladiče D_2O a chladiace okruhy cirkulačných čerpadiel D_2O. Zanesenie bolo také veľké, že ohrozovalo zvyšovanie výkonu. Preto sa urobili opatrenia na postupné preplachovanie všetkých chladičov a neskôr s úpravou na preplachovanie čerpadla počas prevádzky, keď čerpadlo bolo v horúcej rezerve.

Práca destilačnej stanice bola z hľadiska odstraňovania koróznych produktov, mechanických nečistôt a organických kyselín úspešná. Aktivita D_2O sa po prečistení v destilačnej stanici znížila 10^3 až 10^4 krát. Problémy spôsobovali opakované poruchy na systémoch merania a regulácie.

Ku koncu prevádzky sa využívalo asi 20 % kapacity destilačnej stanice na čistenie D_2O z primárneho okruhu a 80 % na destiláciu kondenzátov z okruhov systému spaľovania traskavej zmesi a čistenia CO_2.

Izotopické čistenie ťažkej vody

Na základe skúseností z prevádzky ťažkovodných reaktorov, ktoré boli spustené v 60-ych rokoch sa dá jednoznačne vyhlásiť, že izotopické zloženie ťažkej vody sa počas prevádzky reaktora neustále zhoršuje, preto bolo treba vybudovať také zariadenia, ktorého cieľom bolo zlepšiť jej izotopické zloženie. Pri prvej československej atómovej elektrárni bolo treba v súvislosti s týmto problémom vyriešiť znižovanie izotopickej čistoty ťažkej vody.

Chladiaci CO_2 sa už vo výrobnom závode kontaminoval – samozrejme len veľmi malými koncentráciami – atómmi vodíka (napríklad H_2, H_20, HCl, H_2S, NH_3, CH_4, oleja a pod.). Obsah oleja v chladiacom plyne sa v dôsledku odparovania oleja z tesnenia turbokompresorov zvyšoval. Olej sa v dôsledku žiarenia v reaktore rozpadával a spôsoboval ďalšie uvoľňovanie atómov vodíka do cirkulujúceho plynu. Ťažká voda v reaktore sa kontaminovala izotopmi ľahkého vodíka pri kontakte s CO_2. Ďalšou príčinou zhoršenia izotopického zloženia ťažkej vody bolo, že v kondenzátore nachádzajúcom sa za rekombinátorom peroxidu sa zrážala ľahkovodná para nachádzajúca sa v CO_2.

Chodba obsluhy armatúr na plošine + 6 m v objekte reaktorovne

Na zlepšenie izotopických vlastností ťažkej vody sa vybudovala stanica izotopického čistenia D_2O s frakčnou kolónou. Priemer jediného stĺpa bol 400 mm, jeho výška 28 m a obsahoval špeciálnu Sulzerovu náplň. Pokiaľ bola koncentrácia ťažkej vody na vstupe 99,7 %, tak na výstupe bola 99,8 % a za deväť mesiacov sa dalo odstrániť 150 kg H_20. Ak sa z ľubovoľných dôvodov počas prevádzky koncentrácia ťažkej vody zmenšila, jedno alebo dvojrázovým použitím kolóny dala sa zlepšiť na 99,8 %. Prevádzka bola hospodárna, ak vstupná koncentrácia D_20 bola väčšia ako 5 %.

Stanica sa uviedla do skúšobnej prevádzky v decembri 1974 a od januára 1975 pracovala prakticky nepretržite. Spracovávala prevažne kondenzát D_2O z okruhov spaľovania traskavej zmesi a čistenia CO_2, pretože izotopická čistota kondenzátu bola najmenšia. Pomerne málo času zostalo na čistenie vody priamo z primárneho okruhu. Na ilustráciu – stanica od uvedenia do prevádzky do konca septembra 1976 dodala do ťažkovodného okruhu 98 900 l izotopicky obohatenej D_2O s priemerným obsahom 98,45 % D_2O.

12. SEKUNDÁRNY OKRUH

Sekundárny okruh okrem parogenerátorov bol rovnaký ako v klasických tepelných elektrárňach. Delil sa na tri bloky, každý mal dva parogenerátory, turbogenerátor, príslušenstvo bloku a spojovacie potrubie.

Parogenerátory slúžili na odvod tepla z primárneho okruhu, na tvorbu pary pre pohon turbogenerátorov a okrem toho boli hermetickou hranicou medzi primárnym a sekundárnym okruhom. Para a voda v sekundárnom okruhu boli neaktívne. Para s dvoma rôznymi parametrami viedla na turbíny.

Pri netesnosti parogenerátora sa v dôsledku vyššieho tlaku v primárnom okruhu dostával rádioaktívny CO_2 do vody. Z tohto dôvodu sa meral obsah CO_2 vo vode a vo vystupujúcej pare. Vodná strana poškodeného odparovača sa okamžite zatvorila a zmes oxidu uhličitého, pary a vody sa odviedla do špeciálneho kondenzátora.

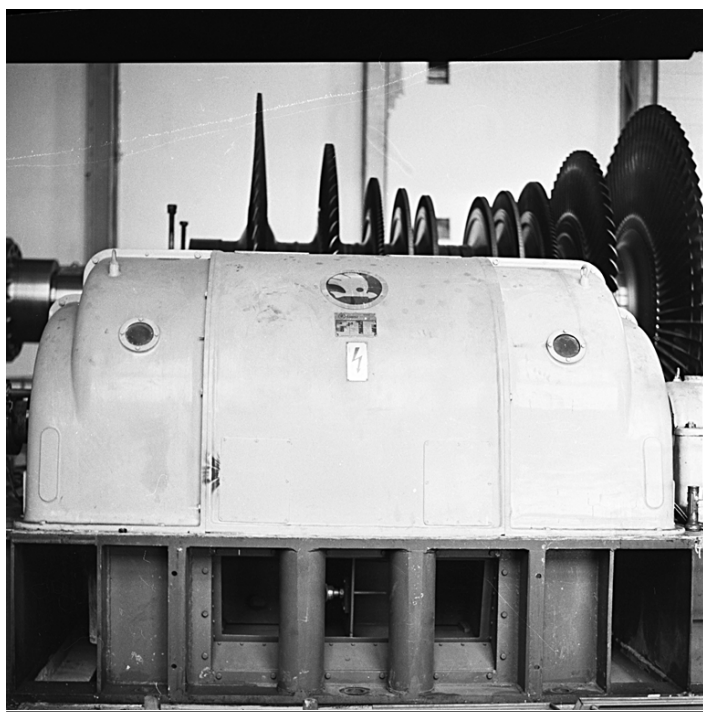
Základné parametre sekundárnej strany parogenerátora	
Sekundárna strana parogenerátora	
Spoločný ohrievač	
Teplota vody na vstupe [°C]	34
Teplota vody na výstupe [°C]	120
Množstvo vody [t/h]	123,6
Pracovný pretlak v ohrievači [kPa]	200
Nízkotlaková časť	
Teplota napájacej vody	120
Parný výkon [t/h]	36,7
Tlak nízkotlakovej pary za prehrievačom [kPa]	220
Teplota nízkotlakovej pary za prehrievačom [°C]	185
Strednotlaková časť	
Teplota vody na vstupe [°C]	120
Parný výkon [t/h]	86
Tlak strednotlakovej pary za ohrievačom [MPa]	3,15
Teplota strednotlakovej pary za ohrievačom [°C]	asi 400
Parametre jedného bloku	
Množstvo strednotlakovej pary [t/h]	127
Tlak strednotlakovej pary [MPa]	3,15
Teplota strednotlakovej pary [°C]	400
Množstvo nízkotlakovej pary [t/h]	73,4
Tlak nízkotlakovej pary [kPa]	220
Teplota nízkotlakovej pary [°C]	185

Turbogenerátory

V turbogenerátoroch sa menila tepelná energia na mechanickú a z mechanickej na elektrickú. Parné turbíny typu AK50 boli dvojtlakové. Strednotlaková para vstupovala cez spúšťacie a regulačné ventily do strednotlakovej časti. Na výstupe z nej sa privádzala nízkotlaková para cez regulačné klapky a viedla do nízkotlakovej časti turbíny. Po prechode nízkotlakovou časťou bola para vedená do hlavných kondenzátorov, kde skondenzovala.

Skondenzovaná voda sa pomocou vákuových odparovačov viedla do predhrievača, odkiaľ prúdila do hlavných dávkovačov vody a ďalej cez nízko a vysokotlakové čerpadlá.

Hriadeľ turbíny bol spojený pevnou spojkou s trojfázovým, vzduchom chladeným generátorom, s výkonom 50 MW a svorkovým napätím 10,5 kV.



Strojovňa – pohľad na generátor, v pozadí je rotor turbíny

Základné parametre turbíny AK50	
Nominálne parametre pary	
Strednotlaková para	
Množstvo strednotlakovej pary [t/h]	172
Tlak strednotlakovej pary [MPa]	2,9, max. 3,15
Teplota strednotlakovej pary [°C]	390, max. 415
Nízkotlaková para	
Množstvo strednotlakovej pary [t/h]	71,2
Tlak strednotlakovej pary [kPa]	200
Teplota strednotlakovej pary [°C]	180, max. 200

Príslušenstvo bloku a spojovacie potrubie

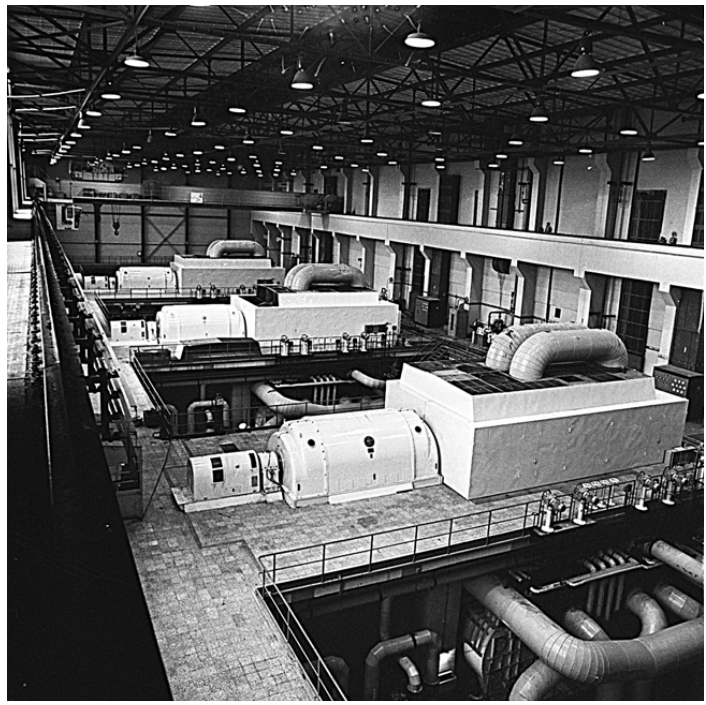
Strednotlaková para bola vedená na turbíny priamo z dvojice parogenerátorov, zatiaľ čo nízkotlaková para mala spoločný kolektor, z ktorého sa rozvádzala do jednotlivých turbín. Pred každou turbínou bol odber strednotlakovej pary na technologické účely. Para z odberu prechádzala cez redukčnú stanicu k jednotlivým spotrebičom. Na potrubí nízkotlakovej pary bol tiež odber pred každou turbínou. Odobratá nízkotlaková para sa používala na vykurovanie, pre napájacie nádrže a na ohrievanie kondenzátu pred vákuovými odplyňovačmi.

Príslušenstvo turbíny tvorili predovšetkým dva kondenzátory, ktorých hrdlá boli priamo spojené s nízkotlakovou časťou turbíny. Kondenzátory boli rúrkové. Kondenzát z hlavných kondenzátorov tlačilo čerpadlo kondenzátu cez ohrievač kondenzátu do vákuového odplyňovača. Odplynený kondenzát postupoval cez podávacie čerpadlo a spoločný nízkotlakový ohrievač do napájacej nádrže príslušného bloku.

Každá turbína mala dve vývevy, ktoré udržiavali podtlak v technologických kondenzátoroch a vákuovom odplyňovači kondenzátu a prepúšťaciu stanicu pary, ktorá umožňovala prepúšťať paru obtokom turbíny do hlavných kondenzátorov.

Každý z blokov mal pomocnú strednotlakovú a nízkotlakovú prepúšťaciu stanicu, chladič prepúšťanej pary a systém napájania parogenerátorov tvorený napájacou nádržou, dvoma strednotlakovými a dvoma nízkotlakovými napájacími čerpadlami. Jedno z čerpadiel bolo vždy pracovné, druhé v rezerve.

Cirkuláciu vody v odparovačoch parogenerátorov zabezpečovala pre každý blok trojica strednotlakových a nízkotlakových čerpadiel. Dve



Pohľad do strojovne na turbogenerátory

Strojovňa – pohľad na turbogenerátor č.2

z nich pracovali samostatne pre jeden parogenerátor, tretie sa dalo použiť pre hociktorý.

Na doplňovanie stratenej vody a kondenzátu sa používala chemicky upravená a odplynená voda. Pre celý sekundárny okruh boli spoločné jedna doplňovacia nádrž, odplyňovač vody a dve doplňovacie čerpadlá.

Chladiaca voda ohriata v hlavných kondenzátoroch sa chladila v troch blokoch ventilátorových chladiacich veží sekundárneho okruhu

Prevádzka

Zariadenia sekundárneho okruhu pracovali dobre počas celej histórie prevádzky, porúch a nedostatkov bolo málo. Problémom od II. etapy energetického spúšťania bolo, že v hlavných kondenzátoroch sa tvorili biologické nánosy, ktoré zhoršovali prestup tepla. Vyskúšalo sa niekoľko spôsobov ich odstránenia. Najvhodnejšie bolo ich vysúšanie počas prevádzky turbíny so zníženým výkonom, ale aj napriek tomu sa museli kondenzátory aspoň raz za rok čistiť mechanicky.

Pri generálnej oprave v roku 1975 sa zistilo, že niektoré rúrky v hlavných kondenzátoroch a chladiči generátora sa poškodili odzinkovaním. Poškodené rúrky sa vymenili a súčasne sa všetky rúrky kondenzátorov vyčistili prestreľovaním gumových štopľov cez rúrky.

V rámci konečného riešenia dochladzovania sa rekonštruovali ochrany turbín a príslušné panely a pulty na blokovej dozorni. Od roku 1976 boli všetky turbogenerátory v normálnej prevádzke s možnosťou prechodu na napájanie vlastnej spotreby pri havarijnom dochladzovaní.

13. PLYNOVÉ HOSPODÁRSTVO

Plynové hospodárstvo slúžilo na skladovanie CO_2 a na manipulácie s ním súvisiace. Bolo umiestnené v samostatnej budove a s hlavným výrobným blokom bolo spojené dvoma potrubnými kanálmi. V reaktorovni boli zo zariadení plynového hospodárstva umiestnené skvapalňovač CO_2 a odparovač – prehrievač CO_2.

Technologické zariadenie plynového hospodárstva malo tieto funkcie:

- prijímať a skladovať čistý CO_2,
- plniť primárny okruh,
- doplňovať primárny okruh,
- vyprázdňovať a vákuovať primárny okruh,
- zabezpečiť prevádzku pomocných okruhov,
- odsávať CO_2 do okruhu 110 ÷ 140 kPa,
- odsávať CO_2 do okruhu 70 ÷ 90 kPa a vypúšťať plynné látky do ovzdušia,
- likvidovať haváriu parogenerátorov.

Príjem a skladovanie čistého CO_2

Kvapalný CO_2 sa privážal do elektrárne v železničných cisternách a stáčal sa v sklade čistého CO_2 do štyroch nádrží, každá mala objem 20 m^3. Pri predpokladaných únikoch 150 kg/h z primárneho okruhu vystačili zásoby v sklade čistého CO_2 na deväť dní nepretržitej prevádzky.

Základné parametre skladu čistého CO_2	
Parameter	**Hodnota**
Skladovací objem [m^3]	4 x 20
Objem kvapalného CO_2 v nádržiach [m^3]	4 x 9,6
Prevádzkový tlak [MPa]	1,4 ÷ 1,6
Prevádzková teplota [°C]	–27 ÷ –35

Plnenie primárneho okruhu

Primárny okruh s objemom 1 080 m^3 sa plnil pretlačovaním kvapalného CO_2 zo skladu čistého alebo nečistého plynu tlakom plynového vankúša a jeho odparovaním v odparovači – prehrievači v reaktorovni. Odparený CO_2 sa ohrieval na teplotu 50°C alebo 70°C a zohriaty postupoval potrubím do primárneho okruhu. Pri teplote 50°C a tlaku 3,5 MPa sa plnenie prerušilo, pretože v primárnom okruhu bolo pri týchto parametroch 56,5 t CO_2, čo bola maximálne množstvo. Tlak sa ďalej zvyšoval zohrievaním plynu prácou turbokompresorov a zvyšovaním výkonu reaktora.

Základné parametre systému plnenia primárneho okruhu	
Parameter	**Hodnota**
Skladovací objem nečistého CO_2 [m^3]	4 x 20
Prevádzková teplota [°C]	+10
Prevádzkový tlak [MPa]	4,6
Výkon odparovača – prehrievača [t CO_2/h]	6
Teplota plynu na výstupe z odparovača – prehrievača [°C]	50, resp. 70
Doba plnenia primárneho okruhu [h]	asi 10

Doplňovanie primárneho okruhu

Systém doplňovania CO_2 do primárneho okruhu slúžil na náhradu CO_2 uniknutého z primárneho okruhu buď netesnosťami, alebo v dôsledku technologického procesu. Na doplňovanie boli určené tri doplňovacie kompresory, zapínané automaticky pri poklese tlaku vo vysokotlakovom veterníku na 7,2 MPa. Najskôr sa spustil jeden kompresor a ak tlak ešte klesal, zapol sa automaticky aj druhý. Tretí kompresor zapínal ručne operátor vtedy, ak bolo treba nárazovo doplňovať väčšie množstvo plynu. Plyn z vysokotlakového veterníka postupoval cez regulačný ventil do kolektora chladiaceho plynu.

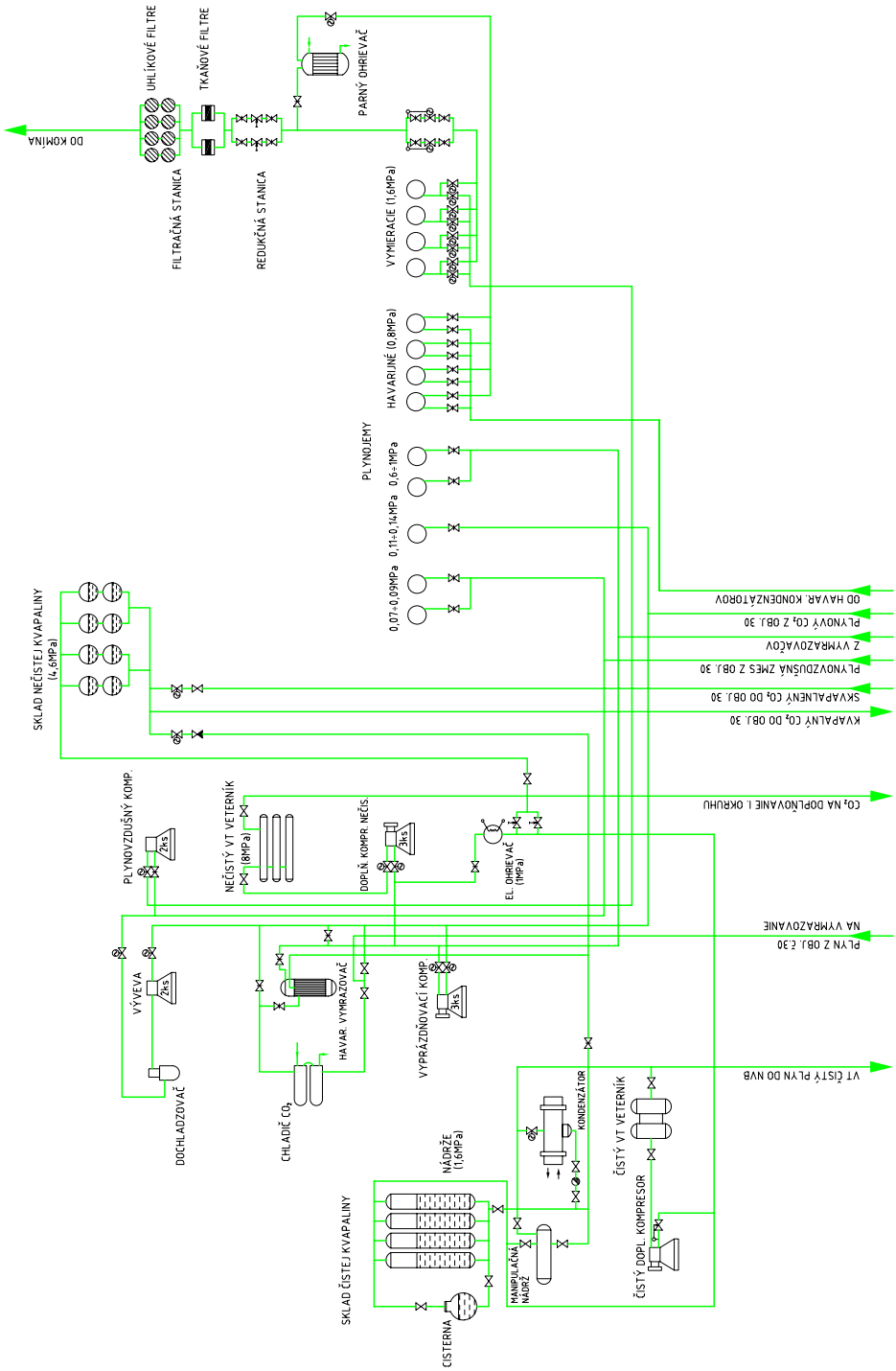


Schéma plynového hospodárstva

Základné parametre systému doplňovania primárneho okruhu	
Parameter	**Hodnota**
Výkon doplňovacích kompresorov [m^3]	3 x 28,5
Tlak v saní kompresorov [MPa]	0,6 ÷ 1,0
Tlak na výtlaku kompresorov [MPa]	8
Výkon elektrického ohrievača [t/h]	max 1
Teplota CO_2 na výstupe z ohrievača [°C]	–10 ÷ 0
Objem nečistého vysokotlakového veterníka [m^3]	6
Pracovný tlak [MPa]	8
Pracovná teplota [°C]	max 120

Vyprázdňovanie a vákuovanie primárneho okruhu

Vyprázdňovanie celého primárneho okruhu sa v trvalej prevádzke predpokladalo iba vo výnimočných prípadoch. Častejšie bolo vyprázdňovanie jednotlivých slučiek. Vyprázdňovanie sa robilo v štyroch stupňoch.

V prvom stupni sa plyn vypúšťal priamo cez skvapalňovače až do dosiahnutia kondenzačného tlaku 5,475 MPa. Skvapalnený CO_2 bol vedený do nádrže nečistého kvapalného CO_2.

V druhom stupni sa vyprázdňovaný plyn viedol cez chladič a redukčný ventil do siete 0,6 ÷ 1,0 MPa na satie doplňovacích kompresorov. Plyn stlačený na 7 ÷ 8 MPa prechádzal cez vysokotlakový veterník do skvapalňovačov v reaktorovni a odtiaľ do nádrží nečistého kvapalného CO_2. Týmto spôsobom sa slučka vyprázdňovala až do dosiahnutia tlaku 1 MPa v slučke.

V treťom stupni boli pred doplňovacie kompresory zaradené kompresory vyprázdňovacie. Pri tomto stupni sa plyn viedol z chladiča do vyprázdňovacích kompresorov, z ich výtlaku do siete 0,6 ÷ 1,0 MPa a ďalej rovnako ako v druhom stupni. Po dosiahnutí tlaku 110 kPa sa vyprázdňovanie prerušilo.

Vo štvrtom stupni už neprebiehalo skvapalňovanie CO_2, aby sa zabránilo nasávaniu vzduchu. Do tlaku 70 kPa pracovali plynovzdušné kompresory nasávajúce plyn zo systému 70 ÷ 90 kPa. Výtlak plynovzdušných kompresorov viedol priamo do vymieracích plynojemov a odtiaľ po zmeraní aktivity sa ich obsah vypúšťal cez filtre a ventilačný komín do vzduchu. Po dosiahnutí tlaku 70 kPa boli pred plynovzdušné kompresory predradené vývevy. Vyprázdňovanie skončilo pri tlaku 1 kPa.

Zabezpečenie prevádzky pomocných okruhov

Pre prevádzku pomocných okruhov zásobovalo plynové hospodárstvo spotrebiče v reaktorovni kvapalným CO_2 pre prevádzku vymrazovačov D_2O a plynným vysokotlakovým CO_2 pre transportno – technologickú časť a pokojové upchávky turbokompresorov.

Kvapalný CO_2 sa privádzal z nádrží nečistého CO_2 pri tlaku 4 ÷ 4,6 MPa. Plynný CO_2 sa privádzal s tlakom 8 MPa z čistého veterníka a do jednotlivých spotrebičov sa rozvádzal cez ohrievač v transportno – technologickej časti.

Odsávanie CO_2 do okruhu 110 ÷ 140 kPa

Plynný CO_2 sa viedol do nádrže 110 ÷ 140 kPa, kde sa tlak udržiaval prácou vyprázdňovacieho kompresora. Plyn z jeho výtlaku bol zavedený do nádrže 0,6 ÷ 1 MPa. Zdrojom plynu boli najmä výfuky poistných ventilov, zavážací stroj a medzipriestory sekčných armatúr.

Odsávanie CO_2 do okruhu 70 ÷ 90 kPa a vypúšťanie plynných látok do ovzdušia

Tento systém odsával CO_2 unikajúci v miestach predpokladaných netesností, predovšetkým z prírubových spojov a upchávok armatúr. Podtlak v systéme sa udržiaval prácou jedného z plynovzdušných kompresorov. Jeho výtlak bol vedený do vymieracích plynojemov, ktoré sa plnili postupne. Nahromadený plyn sa vypúšťal cez filtračnú stanicu s filtrami na zachytenie aerosólov a jódu do ventilačného komína a do atmosféry.

Účelom vymieracích plynojemov bolo zadržať plynovzdušnú zmes na čas potrebný na rozpad rádioaktívnych látok. Plynojemy sa vypúšťali vtedy, keď boli priaznivé meteorologické podmienky na riedenie a aktivita bola dostatočné malá.

Likvidácia havárie parogenerátorov

Havarijné plynojemy slúžili na likvidáciu havárie parogenerátorov pri porušení rúrok parogenerátora. Po skondenzovaní zmesi para – CO_2 bol plynný CO_2 vedený do havarijných plynojemov, ktoré slúžili hlavne na zachytenie nerovnomerného prietoku a na odlúčenie vlhkosti z CO_2.

V havarijných plynojemoch para expanziou a prestupom tepla do stien plynojemu skondenzovala. Plyn bol vedený cez parný ohrievač a filtračnú stanicu s filtrami na zachytávanie jódu a aerosólov do ventilačného komína bez zadržania na rozpad rádioaktívnych izotopov.

PREVÁDZKA

Počas I. etapy energetického spúšťania sa zistilo, že niektoré predpoklady projektu boli nereálne. Cez filtračnú stanicu plynového hospodárstva sa malo podľa projektu vypúšťať maximálne 175 m^3/h (200 ÷ 220 kg/h) plynovzdušnej zmesi. V skutočnosti, vzhľadom na úniky plynu z primárneho okruhu v množstve viac ako projektových 150 kg/h, bolo treba vypúšťať až 800 m^3/h plynu. Ako riešenie sa navrhlo namontovať výkonnejšie ventilátory.

V systémoch plynojemov 70 ÷ 90 kPa, 110 ÷ 140 kPa a 0,6 ÷ 1,0 MPa boli problémy so systémom organizovaných únikov CO_2 a systémom dodávky čistého CO_2 do reaktorovne. Odsávací systém 70 ÷ 90 kPa bol poddimenzovaný a nedokázal vytvoriť požadovaný podtlak v plynojemoch počas výmeny palivových článkov ani pri práci dvoch plynovzdušných kompresorov. Preto sa na vytvorenie dostatočného podtlaku použil tretí novoinštalovaný plynovzdušný kompresor.

Tieto problémy boli aj počas II. etapy energetického spúšťania. Okrem toho na plynovzdušných kompresoroch sa rýchlo opotrebovávali piestne krúžky a valce. Nevyhovujúca bola konštrukcia elektrických ohrievačov. Ich hlavica sa pri prevádzke prehrievala a na spoji s telesom ohrievača potom vznikali netesnosti. Nepodarilo sa uspokojivo vyriešiť meranie hladiny kvapalného CO_2 v nečistom sklade.

14. TRANSPORTNO – TECHNOLOGICKÉ ZARIADENIA

Transportno – technologické zariadenie slúžilo na výmenu vyhorených palivových článkov v reaktore za čerstvé, na ich transport z reaktora do skladov vyhoreného paliva a pomocné operácie, ktoré s transportom paliva súviseli. Pritom muselo byť vyhorené palivo transportované a uložené tak, aby sa účinne odvádzalo zostatkové teplo palivových článkov.

Zavážací stroj

Zavážací stroj bol jedným z najzložitejších a najdôležitejších zariadení elektrárne. Slúžil na výmenu vyhoreného paliva v reaktore za čerstvé pri prevádzke reaktora a tlaku v reaktore 6,5 MPa. Pri výmene paliva bol tesne spojený s reaktorom a bol v ňom rovnaký tlak ako v reaktore. Po utesnení technologického kanála, uzatvorení guľového ventilu v dolnej časti hlavice zavážacieho stroja a odtlakovaní medzipriestoru sa zavážací stroj mohol odpojiť od technologického kanála. Vyhorený palivový článok bol chladený vlastným chladiacim zariadením. Stroj slúžil aj na prepravu vyhoreného článku a aktívnych častí palivového kompletu z reaktora do krátkodobého skladu, komory strihania tyče, dlhodobého skladu, prípadne do horúcej komory. Predpokladal sa aj transport palivových článkov z dlhodobého skladu do vagónu – kontajnera a odvezenie do ZSSR.

Na spoločnej dráhe v reaktorovej sále boli dva zavážacie stroje. Pretože časť automatiky oboch strojov bola spoločná, nemohli stroje pracovať paralelne. Druhý stroj slúžil ako zálohový.

Na strojoch boli inštalované len pohony, chladiaca jednotka pre chladenie vyhoreného palivového článku, snímače a ovládacie tlačidlá na ručné navedenie zavážacieho stroja na technologický kanál alebo na zameriavaciu značku ďalších uvedených zariadení.

Zavážací stroj sa skladal z mosta a z manipulátora. Most niesol na horných plochách hlavného nosníka pojazdovú dráhu manipulátora a na jednej z bočných lávok pre obsluhu pojazdové ústrojenstvo mosta. Most stroja sa pomocou pojazdového ústrojenstva pohyboval po dráhe mosta, ktorá bola na stavebných výstupkoch pozdĺžnych stien reaktorovej sály. Pojazdová dráha mosta bola spoločná pre oba zavážacie stroje.

Príslušenstvo zavážacích strojov tvorila časť zariadení spoločná pre oba zavážacie stroje – pohyblivý prívod elektrickej energie k mostom zavážacích strojov, žľaby pre prívod a odvod chladiacej vody do zavážacích strojov.

Základnou súčasťou manipulátora bola vertikálna tlaková nádoba s vnútorným priemerom 490 mm a dĺžkou 13 800 mm. Vo vnútri nádoby bola hliníková kazeta s dvoma pozdĺžnymi otvormi – hniezdami. Jedno slúžilo na umiestnenie čerstvého palivového článku pred jeho vložením do reaktora, druhé umožňovalo neustále chladenie vyhoreného palivového článku vybratého z reaktora plynom. Kazeta sa otáčala o 70° pomocou hydropneumatického pohonu .

Vo hornej časti zavážacieho stroja bolo zdvihové ústrojenstvo klieští. Malo dve na sebe nezávislé zdvihové zariadenia, jedno pre čerstvý a jedno pre vyhorený palivový článok. Zdvihové ústrojenstvo sa skladalo z časti umiestnenej v tlakovom priestore stroja (lanový bubon, lano a zariadenie na registráciu zaťaženia lana) a z časti mimo tlakového priestoru (pohon a traťový prepínač). Na lanách boli zavesené kliešte, ktoré sa spúšťali do otvoru v kazete a pomocou čeľustí zachytávali palivový komplet. Zaťaženie každého lana sa indikovalo pomocou špeciálneho vážiaceho systému, aby sa zabránilo pretrhnutiu lana pri nadmernom zaťažení.

Laná boli v hornej časti kazety vedené cez sústavu kladiek, ktorá umožňovala natáčanie kazety tak, aby sa laná neprekrížili alebo aby lano nemalo neprípustný sklon k drážke bubna. Vertikálna poloha klieští bola sledovaná pomocou traťového prepínača vo vnútri zavážacieho stroja aj mimo neho.

V spodnej časti zavážacieho stroja bola hlavica zavážacieho stroja, ktorá slúžila na hermetické spojenie tlakového priestoru zavážacieho stroja s tlakovým priestorom reaktora pri výmene paliva, na hermetické zatvorenie tlakového priestoru stroja proti vonkajšiemu prostrediu pri prevážaní paliva a na uvoľnenie tesniacej zátky kanála reaktora. Výsuvná časť hlavice zavážacieho stroja mala výsuvný valec, voľne spojený s pohyblivým tienením. Výsuvný valec spojoval zavážací stroj s kanálom reaktora a pomocou „O„ krúžku zo špeciálnej gumy ho hermeticky utesňoval.

V hornej časti hlavice bol guľový ventil, ktorý utesňoval vnútorný priestor stroja proti vonkajšiemu prostrediu. Pohon guľového ventilu a jeho otáčanie boli mechanické, pomocou hydropneumatického pohonu, umiestneného mimo tienenia. Sedlo guľového ventilu bolo pri prevádzke zahlcované čistým CO_2 pri tlaku o 0,2 MPa vyšším, ako bol prevádzkový

tlak v zavážacom stroji. Priestor pod guľovým ventilom, priestor zahlcovania sedla guľového ventilu a vnútorný priestor zavážiaceho stroja boli prepojené potrubím s vnútorným priemerom 6 a 12 mm, uzatváraným vlnovcovými ventilmi. Prepojenie slúžilo na vyrovnanie tlakov v uvedených priestoroch pred otvorením guľového ventilu.

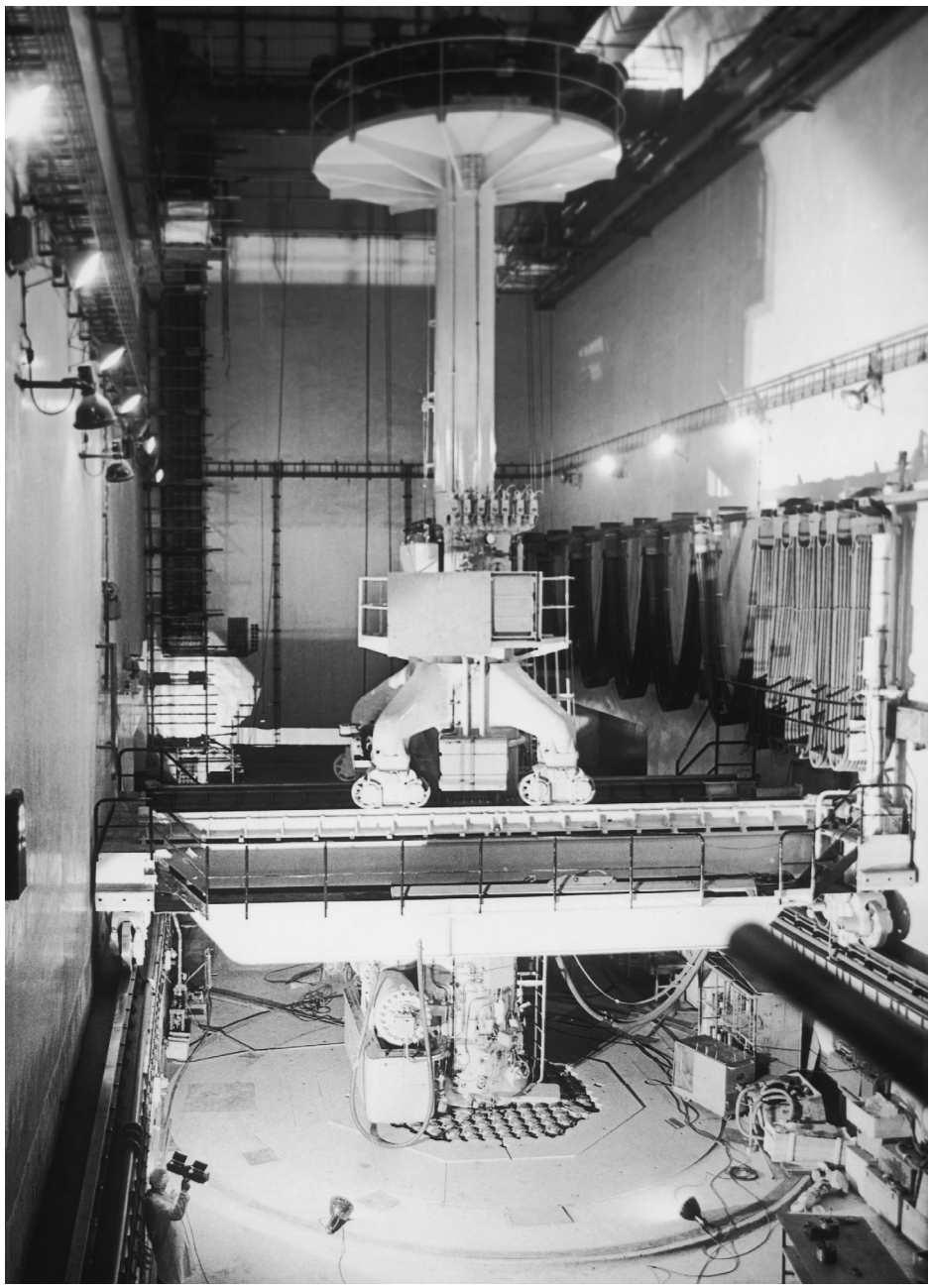
Vnútornú časť hlavice tvoril rúrkový kľúč hlavice, ktorý slúžil na uvoľnenie alebo na utiahnutie tesniacej zátky palivového kompletu kanála reaktora. Otáčavý pohyb rúrkového kľúča zabezpečovala pohonná jednotka umiestnená na vonkajšej časti zavážiaceho stroja. Rúrkový kľuč bol vertikálne unášaný výsuvným valcom s ktorým bol spojený pohybovým závitom s rovnakým stúpaním, aké mala tesniaca zátka technologického kanála reaktora.

Pohyblivé tienenie hlavice slúžilo na odtienenie medzery medzi spodnou hranou zavážacieho stroja a podlahou reaktorovej sály pri výmene článkov. Pohyblivé tienenie, spoločne, s výsuvným valcom hlavice a rúrkovým kľúčom hlavice sa posúvalo vo vertikálnom smere pomocou štyroch hydraulických valcov, umiestnených v dolnej časti stroja. Dva valce slúžili pri poruche hlavných valcov ako pomocné a boli ovládané pomocou ručného čerpadla. Pohon výsuvného valca a pohyblivého tienenia bol hydropneumatický.

Chladiaca jednotka umiestnená v dolnej časti manipulátora mala jedno pracovné a jedno rezervné turbodúchadlo, chladič plynu a sústavu potrubí. Turbodúchadlá mali vstavané trojrýchlostné asynchrónne motory, ktoré umožňovali prácu pri troch tlakových režimoch: 6,5 MPa, 2,0 MPa a 0,15 MPa.

Vonkajší plášť manipulátora tvorilo tienenie zhotovené z oceľoliatiny a výkovkov. V spodnej časti, v miestach palivového článku bolo tienenie hrubé 600 mm, v hornej časti 150 mm. V strednej časti manipulátora, v hornej časti tienenia hrúbky 600 mm boli štyri konzoly, nesúce pojazdové kolesá manipulátora, pomocou ktorých sa manipulátor pohyboval po pojazdovej dráhe. V spodnej časti manipulátora bolo optické zariadenie, ktoré slúžilo na navedenie zavážacieho stroja na zámernú značku. Skladalo sa zo snímacej hlavice, obrazového a svetelného kanála. Snímacia hlavica obsahovala fotosnímače, slúžiace na automatické navedenie zavážacieho stroja na zameriavaciu značku. Navádzanie mohlo byť ručné i automatické.

Manipulátor mal dve plošiny a sústavu rebríkov, ktoré umožňovali obsluhu dôležitých zariadení stroja. Na dolnej plošine boli umiestnené fľaše s tlakovým vzduchom a panel s rozvodom stlačeného vzduchu na



Pohľad na zavážací stroj v reaktorovej sále

obsluhu jednotlivých mechanizmov. Na tejto plošine bola umiestnená nádrž s vodou so stálou teplotou. V nej boli fľaše s tlakovým CO_2 na obsluhu niektorých zariadení a zahlcovanie upchávok čistým plynom. Pomocou stlačeného vzduchu a CO_2 sa dal priestor medzi guľovým ventilom a tesniacou zátkou technologického kanála vyčistiť čistým CO_2 pred výmenou kompletu a čistým vzduchom po výmene kompletu.

Na hornej plošine sa bolo zdvihové ústrojenstvo klieští a pohon otáčania kazety.

Zavážací stroj bol ovládaný a kontrolovaný diaľkovo z ovládacieho pultu, umiestneného v dozorni transportno – technologickej časti. Ovládacie zariadenie bolo zostavené z prvkov reléovej techniky. Elektrické zariadenie bolo v rozvádzačoch na chodbe. Prevádzková a havarijná signalizácia bola vyvedená do dozorne transportnej technológie. Z dozorne sa dala sledovať poloha zavážiaceho stroja v reaktorovej sále.

Hlavné parametre zavážacieho stroja	
Šírka mosta s nárazníkmi [mm]	5 550
Dĺžka mosta [mm]	11 800
Výška spodnej hrany hlavného nosníka mostu nad podlažím + 13,5 m [mm]	2 760
Výška manipulátora [mm]	17 141
Výška manipulátora nad podlaží [mm]	50
Dojazd manipulátora na strane dozorne [mm]	3 150
Dojazd manipulátora na strane oproti dozorni [mm]	3 470
Hmotnosť zavážacieho stroja [t]	265,6
Hmotnosť príslušenstva [t]	53,4

Skúšobný kanál zavážacieho stroja

Zariadenie skúšobného kanála zavážacieho stroja bolo počas prevádzky jadrovej elektrárne určené na kontrolu všetkých dôležitých funkcií zavážacieho stroja pri spúšťaní a vyberaní palivového kompletu, najmä na kontrolu správnosti nastavení klieští a skrutkovača, kontrolu presnosti navedenia a funkcie dúchadiel zavážacieho stroja. Okrem toho skúšobný kanál slúžil aj na kontrolu, dekontamináciu, opravu a výmenu častí zavážacieho stroja.

Na skúšobnom kanáli sa okrem kontroly dala demontovať hlavica a pohyblivé tienenie, vymeniť kliešte a laná a merať príkon dávky vo vnútri zavážacieho stroja.

Zariadenie skúšobného kanála malo tlakový kanál, plynové hospodárstvo, prehliadací kanál, odkladacie puzdro a tienenie.

Tlakový kanál sa skladal z tlakovej nádoby, nosnej rúrky a kompletného technologického kanála, ktorý bol zasunutý do tlakovej nádoby. Tlaková nádoba mala päť dielov a v spodnej časti bola uzatvorená prírubou. Medzi jednotlivé diely nádoby boli namontované vychyľovacie zariadenia, ktorými sa imitovalo zakrivenie technologického kanálu. Tlakový kanál bol dlhý 17 100 mm, pracovný tlak CO_2 bol 6,5 MPa a teplota maximálne 200°C.

Plynové hospodárstvo bolo kópiou plynového hospodárstva zavážacieho stroja a automatiky zavážacieho stroja na technologickom kanáli reaktora.

Prehliadací kanál sa skladal z nosnej rúrky a kompletného technologického kanála, ktorý mal v niekoľkých miestach otvory slúžiace na sledovanie činnosti niektorých zariadení. Otvory v hornej časti prehliadacieho kanála slúžili na sledovanie činnosti skrutkovača a kameňov palivového kompletu v technologickom kanále. Ďalšie otvory boli v oblasti zodpovedajúcej oblasti pod biologickou ochranou reaktora, kde sa dal sledovať palivový článok pri jeho vyťahovaní z aktívnej do dochladzovacej zóny reaktora. Prehliadací kanál bol rovnako dlhý ako tlakový kanál.

Odkladacie puzdro slúžilo na odkladanie celého kompletu palivového článku, samostatného palivového článku a kalibru na meranie priechodnosti kompletu cez zavážací stroj. Okrem toho slúžilo na kontrolu úrovne klieští a na kontrolu lana zavážacieho stroja. Odkladacie puzdro bolo dlhé 24 500 mm.

Tienenie zariadenia skúšobného kanála tvorili dve dosky hrubé 450 mm. V jednej doske boli otvory pre jednotlivé kanály a značky. V druhej doske bol otvor pre skrutku montážneho zariadenia zavážacieho stroja.

Transportný kontajner

Transportný kontajner slúžil na oddelenie biologickej a závesnej zátky a na odvoz biologickej zátky alebo nastrihanej tyče s priemerom 20 mm na zložisko tuhých odpadov.

Zariadenie na demontáž zátky a tyče

Technologické zariadenie slúžilo na demontáž kompletu zátky a tyče ∅20 mm palivového kompletu. Zátka bola špeciálnym postupom stiahnutá z tyče pomocou žeriavu.

Zariadenie sa skladalo z dvoch rúrok. V spodnej časti prvej z nich boli uložené upínacie čeľuste ovládané pneumatickým valcom. V hornej časti druhej rúrky boli kliešte ovládané tiež pneumatickým valcom.

Súčasťou zariadenia boli aj kužeľová tieniaca zátka slúžiaca na ochranu obsluhy, základová doska celého zariadenia, šachta s drenážnym potrubím.

Dekontaminačná šachta

Dekontaminačná šachta bola počas prevádzky určená na dekontamináciu a premývanie uzatváracej zátky palivového článku pred jej demontážou. Dekontaminácia sa dala robiť vratnou vodou, zásaditým roztokom a kyslým roztokom s následným použitím inhibítora. Na uvedenom zariadení v šachte sa dali dekontaminovať aj iné, rozmerovo vhodné časti.

Sklad zátok

Sklad zátok valcového tvaru slúžil za prevádzky na skladovanie neaktívnych, prípadne aj aktívnych zátok. Na umiestnenie zátok slúžilo pätnásť puzdier, vyrobených z rúrok s osadením pre uloženie kompletu zátky. Puzdrá boli uchytené v tieniacej doske a privarené ku dnu valcového plášťa. Priestor medzi puzdrami bol vyplnený pieskom. Puzdrá boli zatvorené zátkami. Puzdrá mali priemer 152 x 4,5 mm a dĺžku 7 250 mm.

Krátkodobý sklad vyhoreného paliva

Krátkodobý sklad vyhoreného paliva slúžil na dochladenie palivových článkov, ktoré nemohli byť dochladené v dochladzovacej zóne reaktora, napríklad po zistení porušenia tesnosti pokrytia. Bežné dochladzovanie v reaktore sa predpokladalo desať až pätnásť dní. Ak bolo treba palivový článok vytiahnuť z reaktora skôr, po minimálnom pobyte v dochladzovacej zóne pätnásť minút bolo možné zavážacím strojom premiestniť palivový článok do krátkodobého skladu, kde sa dochladzoval desať až dvanásť dní. Konštrukcia krátkodobého skladu zaručovala chladenie palivového článku plynom pri spúšťaní a vyťahovaní zo skladu.

V reaktorovej sále boli dva krátkodobé sklady tvorené nádobou valcového tvaru. V každom sklade bolo dvadsaťjeden kanálov na uloženie vyhoreného paliva.

Nádrž a kanály boli zaplnené roztokom dvojchromanu draselného (chrompikom), ktorý mal chrániť pokrytie palivových prútikov pred koróziou. Zostatkové teplo bolo odvádzané ponoreným rúrkovým chladičom, ktorým pretekala chladiaca voda.

Komora strihania tyče

Po dostatočnom dochladení bol palivový článok vrátane závesnej tyče, tieniacej a uzatváracej zátky prevezený zavážacím strojom do komory strihania tyče. Pri prevoze bol trvale chladený plynom.

V komore strihu sa hydraulickými nožnicami oddelila závesná tyč ∅20 mm. Po odstrihnutí tyče bol do zavážacieho stroja vtiahnutý palivový článok a osobitne závesná tyč so zátkami. Stroj previezol palivový článok do dlhodobého skladu vyhoreného paliva a tyč so zátkami do puzdra na skladovanie tyčí.

Dlhodobý sklad vyhoreného paliva

Sklad slúžil pre dlhodobé skladovanie vyhorených palivových článkov. Bol to vodný bazén s kapacitou 910 palivových článkov, ktoré sa zavážacím strojom vkladali do puzdier. Po vložení článku sa puzdro naplnilo roztokom dvojchromanu draselného a hermeticky sa uzavrelo. Roztok mal chrániť pokrytie paliva a súčasne odvádzať zostatkové teplo z palivového článku do vody bazénu. Podľa projektu mali byť palivové články v dlhodobom sklade asi 1,5 roka a potom odvezené do ZSSR na prepracovanie.

Sklad čerstvých palivových článkov

Sklad bol určený na skladovanie čerstvých kompletov palivových článkov. V sklade bolo osem puzdier, do ktorých sa čerstvé komplety zavážali 5 t žeriavom. Vyberali sa zavážacím strojom, ktorý ich vkladal do dochladzovacej zóny prázdneho technologického kanála.

V sklade bolo aj jedno puzdro na skladovanie biologickej zátky. Puzdro sa využívalo tiež na sušenie kompletu zátky po odstrihnutí závesnej tyče.

Do komplexu transportno – technologickej časti patrilo ešte plynové hospodárstvo, ktoré slúžilo na zabezpečenie plnenia a vypúšťanie krátkodobých skladov vyhoreného paliva, komory strihu, prijímacieho zariadenia dlhodobého skladu, stroja čistým CO_2 a plynovzdušnou zmesou, hospodárstvo dvojchromanu draselného, žeriavy a záchyty.

Postup výmeny paliva v reaktore

Vyťahovanie palivového článku z reaktora malo tieto hlavné fázy:

1. Vyťahovanie vyhoreného palivového článku žeriavom z aktívnej do dochladzovacej zóna reaktora.
2. Vytiahnutie palivového kompletu s vyhoreným palivovým článkom do zavážacieho stroja.
3. Zavezenie čerstvého palivového článku zavážacím strojom do dochladzovacej zóny.
4. Spustenie palivového článku žeriavom z dochladzovacej do aktívnej zóny.

Palivový článok sa vyťahoval z aktívnej do dochladzovacej zóny reaktora po dosiahnutí plánovaného vyhorenia. Visel na tyčiach ∅36 mm a ∅20 mm a vyťahoval sa mikroposuvom pomocou žeriava. Po vytiahnutí a dosiahnutí dĺžky vytiahnutia 4 385 mm sa vložil oporný C-krúžok a tyče sa rozpojili. Palivový článok visel na tyči ∅20 mm a opernom krúžku. Na zátku sa namontoval záchytný hríb pre uchytenie kliešťami zavážacieho stroja.

Vyťahovanie palivového kompletu – palivového článku z dochladzovacej zóny do zavážacieho stroja malo tieto fázy :

1. odtesnenie uzatváracej zátky pomocou zavážacieho stroja pripojeného na reaktor,
2. vytiahnutie palivového kompletu do zavážacieho stroja.

Uzatváraciu zátku odtesnil zavážací stroj a pritom nastali veľmi dôležité pohyby a posuny pohyblivých a vyberateľných častí technologického kanála a palivového kompletu. Skrutkovač zavážacieho stroja uvoľnil tesniacu zátku, pričom sa zatvorili vstupné okná plynu a palivový článok bol chladený prietokom plynu z reaktora cez zavážací stroj. Kliešte zavážacieho stroja uchytili hríb naskrutkovaný na vnútornom telese zátky

a začalo sa zdvíhanie, pri ktorom sa v prvej fáze zdvihu klieští zátka uvoľnila a palivový komplet mohol byť vtiahnutý do zavážacieho stroja.

Sled operácii zavážacieho stroja	
Príprava	
Navedenie stroja na zameriavaciu značku zvoleného stacionárneho zariadenia	
Operácia N:	
a) voľba programu	
b) kontrola pripravenosti armatúr, ich nastavenie do východzieho stavu	
c) kontrola pripravenosti a tlaku médií	
Ukončenie operácie bolo potvrdené signalizáciou: „NH“	
Číslo operácie	**Operácia**
1	Spustenie hlavice zavážacieho stroja na zvolený kanál
2	Zahltenie tesnenia hlavice
3	Prepláchnutie hlavice CO_2 a prestavenie guľového ventilu
4	Odhltenie tesnenia guľového ventilu
5	Otvorenie guľového ventilu
6	Vyrovnanie tlaku v zavážacom stroji s tlakom v reaktore
7	Indikácia uzatváracej rúrky – uvoľnenie zátky
8	Spustenie klieští I. pre vyhorený palivový komplet
9	Voľba tlakového režimu, zdvih klieští I. do zavážacieho stroja
10	Pootočenie kazety s hniezdom II. nad technologický kanál
11	Spustenie klieští II. s novým palivovým kompletom do technologického kanálu
12	Zdvih klieští II. do zavážacieho stroja
13	Spustenie hlavice – utiahnutie zátky
14	Vypnutie plnenia CO_2 do zavážacieho stroja
15	Zníženie tlaku CO_2 zavážacom stroji na 1,9 MPa – zmena otáčok chladiaceho dúchadla
16	Zatvorenie guľového ventilu
17	Zahltenie tesnenie guľového ventilu
18	Zníženie tlaku v hlavici zavážacieho stroja na 10 kPa
19	Odsatie CO_2 z hlavice zavážacieho stroja
20	Meranie únikov CO_2 nad zátkou technologického kanálu
21	Prepláchnutie hlavice zavážiaceho stroja
22	Odhltenie tesnenia hlavice zavážacieho stroja
23	Zdvih hlavice zavážacieho stroja
24	Kontrola správnosti prevádzkového stavu – koniec programu

Čerstvý palivový článok sa zavážal do reaktora opačným postupom ako sa vyťahoval vyhorený palivový článok. V druhom hniezde kazety

zavážacieho stroja bol čerstvý palivový článok. Zavážací stroj ostal pripojený na technologický kanál. Nad otvor technologického kanála sa pootočilo hniezdo zavážacieho stroja s čerstvým palivovým článkom a ten mohol byť spustený do dochladzovacej zóny reaktora. Kliešte zavážacieho stroja sa automaticky odpojili od palivového kompletu po jeho dosadnutí do technologického kanála a uzamknutí. Pri dosadnutí sa významne pohybovali konštrukčné skupiny palivového kompletu, ktoré zabezpečili hlavne prietok chladiaceho plynu a ukotvenie palivového kompletu v technologickom kanáli.

Potom sa utesnil palivový komplet v technologickom kanáli a otvorili sa vstupné okná chladiaceho plynu. Guľový ventil zavážacieho stroja sa zatvoril a bol spustený autonómny chladiaci okruh zavážacieho stroja na chladenie vyhoreného palivového článku v zavážacom stroji. Priestor pod guľovým ventilom a nad palivovým kompletom sa odtlakoval.

Operácia zavezenia čerstvého palivového kompletu do dochladzovacej zóny sa po kontrolách skončila a zavážací stroj odložil vyhorený palivový článok do krátkodobého skladu.

Čerstvý palivový článok sa z dochladzovacej do aktívnej zóny spúšťal žeriavom s mikrozdvihom po pripojení tyče ∅36 mm k tyči ∅20 mm. Počas spúšťania bol predlžovací kábel pripojený na kontinuálne meranie teploty výstupného plynu. Po dosadnutí palivového článku do koncovej polohy sa pripojilo prevádzkové meranie vo veku a nareguloval sa prietok plynu úmerne výkonu palivového článku.

Operácie zavážacieho stroja na jednotlivých zariadeniach boli zoskupené do trinástich programov. Mohli prebehnúť automaticky v jednej postupnosti, poloautomaticky alebo ručne po jednotlivých krokoch. Režim mohol zvoliť operátor prepínaním viacpolohového paketového prepínača. Požadovaný program na príslušnom zariadení sa predvolil zasunutím zvláštnej programovacej tabuľky do ukazovateľa priebehu operácie na stole operátora. Jednotlivé operácie po krokoch spúšťal operátor tlačidlom.

PREVÁDZKA TRANSPORTNO - TECHNOLOGICKÝCH ZARIADENÍ

Počas I. a II. etapy energetického spúšťania sa niekoľkokrát zistila nedostatočná funkcia klieští spôsobená veľmi malou povolenou toleranciou. Chyby personálu alebo nesprávna činnosť automatiky zavážacieho stroja spôsobili, že pri zdvíhaní a spúšťaní klieští sa po odľahčení zaslučkovali

laná. Problémy boli aj s teflónovým tesnením na uzatváracej zátke, ktoré pri teplotách vyšších ako 95°C zmäklo a pri odtesnení uzatváracej zátky bolo vytlačené z uloženia. Táto chyba bola jednou z príčin obmedzenia parametrov na výmenu palivových článkov – výkonu reaktora, teploty v komore studeného plynu a tlakového spádu na aktívnej zóne.

V roku 1974 sa urobili konštrukčné úpravy uzatváracej zátky, namontovalo sa meranie prietoku CO_2 cez palivový článok pri vyťahovaní z dochladzovacej zóny do zavážacieho stroja. Po úspešných testoch bol v auguste 1974 vymenený prvý palivový článok pri tepelnom výkone reaktora 329 MW, tlaku v reaktore 6,0 MPa, teplote CO_2 na vstupe do reaktora 123°C a tlakovom spáde na reaktore 0,68 MPa.

Nedostatočná funkcia klieští zavážacieho stroja spôsobila, že viackrát spadli vyhorené palivové články spadli do komory strihu, do dlhodobého skladu alebo do horúcej komory, najčastejšie z výšky 400 až 500 mm, ale aj z výšky 4 000 mm.

V dlhodobom sklade vznikli problémy s puzdrami, ktoré sa tlakovali. Ich odtlakovanie bolo zložité a spôsobilo kontamináciu vody v bazéne, ktorá potom nemohla byť chladená v normálnych chladičoch. Voda v bazéne bola asi o 10°C až 12°C teplejšia ako sa uvažovalo v projekte a teplo sa odvádzalo v podstate len odparovaním vody.

Od októbra 1974 sa palivové články menili kontinuálne pri výkonovej prevádzke striedavo oboma zavážacimi strojmi. Pretrvávali problémy s kliešťami zavážacích strojov a so slučkovaním lán. V oboch prípadoch to spôsobovali konštrukčné nedostatky a nedocenenie vplyvu rôznych médií, s ktorými prichádzali kliešte do styku.

Nespoľahlivá funkcia klieští si vyžiadala zmeny v prevádzkovom predpise. Zatvorenie klieští sa sledovalo vizuálne v sklade čerstvého paliva a v komore strihu články sa spúšťali malou rýchlosťou, čo umožnilo prerušiť spúšťanie pri náznaku otvorenia klieští.

Od začiatku prevádzky do 30.9.1976 zavážacie stroje vymenili spolu 237 palivových článkov.

V krátkodobých skladoch vznikol ku koncu prevádzky problém s dlhým pobytom palivových článkov (niektoré palivové články tam boli až rok) a nemožnosťou vymeniť roztok dvojchromanu draselného. Dlhý pobyt spôsobilo poškodenie turbodúchadla a tak sa znemožnilo chladenie palivových článkov počas transportu. Pridružil sa problém s tvorením traskavej zmesi pri chladení palivových článkov v zavážacom stroji počas transportu do krátkodobého skladu. Dočasným riešením bol dlhší pobyt palivových článkov v dochladzovacej zóne a chladenie vzduchom

pri transporte z reaktora do krátkodobého skladu.

V dlhodobom sklade bol dvojchroman draselný v puzdrách nahradený organickým roztokom – dowthermom. Nepodarilo sa významne znížiť kontamináciu vody v bazéne.

Nahromadené problémy sa mali vyriešiť zásadnými zmenami v konštrukcii klieští a zdvihového zariadenia, výmenou motorov turbodúchadiel, náhradou CO_2 v zavážacom stroji dusíkom a zmenou chladenia palivových článkov v komore strihu, krátkodobom a dlhodobom sklade.

15. MERANIE a REGULÁCIA

Rozdelenie merania a regulácie v elektrárni

V čase projektovania a budovania elektrárne A1 sa pre systém kontroly a riadenia používal pojem „Meranie a regulácia“. Bolo v ňom použité množstvo diskrétnych riadiacich a ovládacích obvodov. Celý súbor automatizačných prostriedkov a prostriedkov ručného ovládania tvoril popri strojno – technologickom zariadení a zariadení silnoprúdového rozvodu podstatnú časť zariadenia elektrárne. Všeobecne povedané, bolo to zariadenie, ktoré zabezpečovalo automatické pôsobenie medzi jednotlivými technologickými zariadeniam alebo medzi rôznymi parametrami toho istého zariadenia na jednej strane a medzi týmito zariadeniami a obsluhou na druhej strane. Pre zvládnutie takého širokého rozsahu úloh sa zaužívalo rozdelenie podľa charakteru vstupnej a výstupnej väzby s technologickým zariadením a obsluhou.

Meracie a signalizačné zariadenia, ktoré zobrazovali stav a parametre technológie tvorili informačný systém. Informačný systém bol v elektrárni A1 zostavený z individuálnych meracích prístrojov a obvodov diaľkového merania a signalizácie. Zariadenia, ktorými sa ovplyvňoval chod technologického zariadenia tvorili riadiaci systém. Informačné a riadiace prístroje a obvody boli používané vo veľkom rozsahu aj na klasických parných elektrárňach už pred výstavbou A1.

Úlohou riadiaceho systému bolo udržiavať alebo plynulo meniť zvolený parameter, t.j. regulovať. Prakticky všetky dôležité technologické uzly boli v elektrárni A1 vybavené veľkým rozsahom automatickej regulácie. Riadenie bez spätnej väzby na popud operátora alebo automaticky na základe stavu určitého parametra, častejšie na základe kombinácie a postupnosti stavov viacerých parametrov patrilo do ovládania. Auto-

matické ovládanie sa historicky vyvíjalo spolu s vývojom rozvodu silnoprúdu. V elektrárni A1 bolo automatické riadenie využívané vo veľkom rozsahu aj v riadení technologického zariadenia.

Osobitný význam mala tá časť riadiaceho systému – zabezpečovací systém elektrárne, ktorý zabezpečoval za každých podmienok správnu činnosť technologického zariadenia, alebo ho odpojil. V elektrárni A1 sa táto časť nazývala „blokády a ochrany".

Informačný a riadiaci systém elektrárne bol zostavený z prvkov bežne vyrábaných a dostupných vo svojej dobe. Tieto prvky, ale aj obvody a subsystémy z nich vytvorené, sa bežne používali v klasických elektrárňach alebo v iných priemyselných objektoch. Pre technologické celky špecifické pre jadrovú elektráreň ako reaktor, parogenerátory, hospodárstvo D_2O aj príslušné meracie a riadiace obvody boli vytvorené prevažne z bežne vyrábaných prvkov.

Jadrová energetika však priniesla so sebou nielen technológie, ale aj podmienky, ktoré sa dovtedy nikde nevyskytovali. Bolo treba naprojektovať, vyvinúť, vyrobiť a dodať zariadenia kontroly a riadenia pre tieto neštandartné technologické uzly. Vyvíjali sa priamo v čase projektovania a výstavby. Časť z nich, najmä tá, ktorá sa vyvíjala v ZSSR, dostala názov „Špeciálne systémy". Iné časti, napríklad automatika zavážacieho stroja, sa v rovnakom čase vyvíjala v Československu.

Systém kontroly a riadenia elektrárne A1, rovnako ako technologická a stavebná časť, boli výsledkom nebývalého objemu vývojových a projekčných prác a tiež výsledkom úsilia zúčastnených strán aj jednotlivcov. Príliš dlhá doba výstavby spôsobila, že v čase uvedenia do prevádzky tieto systémy už neboli na úrovni najmodernejšej techniky vo svojom odbore.

Informačný systém elektrárne A1

Informačný systém elektrárne A1 tvorili miestne a diaľkové meracie obvody tlaku, tlakovej diferencie, teploty, prietoku, hladín a chemických veličín. Väčšina informácií bola sústredená v dozorni elektrárne, prípadne v dozorni vzduchotechniky a dozorni transportnej technológie. Okrem diaľkového merania bolo najmä na sekundárnej časti elektrárne inštalované veľké množstvo miestneho merania. Na diaľkové meranie teploty sa používal prenos prirodzených signálov odporových teplomerov a termočlánkov. U ostatných meraní sa signál prenášal pomocou odporových, prípadne indukčných vysielačov alebo v tom čase v Československu

neobvyklým spôsobom, v tak zvanej diferenciálno – transformátorovej schéme.

Merané veličiny sa zobrazovali na ukazovacích ručičkových prístrojoch, líniových a bodových zapisovačoch a poruchových transparentoch. Počet sekundárnych prístrojov bol redukovaný pomocou prepínačov meracích miest. Tiež zapisovače, bodové aj líniové, boli viackrivkové. Napriek tomu operatívne panely a pulty dozorní boli zobrazovacími a ovládacími prístrojmi preplnené.

Zaujímavé boli niektoré, dnes už takmer neznáme snímače, ako prstencové váhy, ortuťové plavákové diferenčné manometre, zvonové manometre a podobne. Boli to robustné mechanické prístroje, vážiace často desať a viac kilogramov.

Okrem teplotechnických veličín – tlak, teplota, prietok – boli v elektrárni inštalované chemické analyzátory IONOFLUX a INFRALYT, určené najmä na sledovanie parametrov CO_2.

Signalizačné zariadenia boli na reléovej báze. Používali sa poruchové transparenty EP2 pre signalizáciu stavu jedinej veličiny, alebo súpravy PT 12 pre viac veličín.

Riadiaci systém elektrárne A1

Predmetom ručného aj automatického riadenie boli jednotlivé stroje, najmä čerpadlá, ale aj turbokompresory a turbíny. Rovnako predmetom riadenia boli stavy a parametre technologických médií, plynu, vody alebo pary. Akčnými orgánmi boli regulačné a uzatváracie ventily ovládané elektrickými servopohonmi.

Systém diskrétneho ovládania

Systém diskrétneho ovládania bol navrhnutý tak, aby sa jednotlivé zariadenia dali ovládať na mieste, prepnutím na deblokačnej skrini alebo diaľkovo ručne z dozorne príslušného objektu, prípadne z dozorne elektrárne. Hlavné technologické zariadenia boli vybavené automatickým ovládaním. K takýmto patrila automatika doplňovania hlavného plynového okruhu v závislosti od poklesu tlaku, respektíve otváranie poistných ventilov od jeho prevýšenia. V objekte plynového hospodárstva bol celý rad funkcií automatizovaný, napríklad ovládanie doplňovacích kompresorov. Podobná bola aj automatika cirkulačných čerpadiel D_2O. Riadiacim signálom bola hladina D_2O v avialovej nádobe. Tá bola vy-

bavená špeciálnym, mnohoelektródovým kontaktným hladinomerom. Automatizované bolo aj ovládanie obehových čerpadiel stredotlakovej a nízkotlakovej časti parogenerátorov.

Zabezpečovací systém

Tento systém reagoval na zmenu hodnoty zabezpečovaných veličín technologického procesu smerom k nebezpečným stavom procesu. Tvorili ho meracie obvody a reléové logické obvody vo funkcii ochrán, bezpečnostného blokovania, poistné zariadenia a aparatúry bezpečnostného zníženia výkonu reaktora. Väčšina technologického zariadenia mala svoj vlastný zabezpečovací systém. Na hlavnej trase premeny a prenosu energie to boli ochrany reaktora, ochrany turbín a generátorov.

Zabezpečovací systém bol posledným stupňom automatizácie procesu, ktorý vstupoval do činnosti, keď iné prostriedky nedokázali udržať zadaný režim prevádzky. Na spoľahlivosť tohto systému, aspoň čo sa týka bezpečnosti jadrového reaktora, boli kladené prísne požiadavky. Bola vytvorená schéma výberu signálov dva z troch, ktorá zvýšila odolnosť systému voči jeho nebezpečným poruchám, pri ktorých by systém nefungoval pri nedovolenej hodnote zabezpečovanej veličiny, rovnako voči bezpečným poruchám, pri ktorých by systém zapracoval aj bez prvotnej technologickej príčiny. Spoľahlivosť zabezpečovacieho systému bola zvyšovaná aj jeho overovaním a kontrolami prevádzkovým a údržbárskym personálom.

Systém spojitého ovládania – regulácia

Tento systém tvorili autonómne regulačné obvody na pomocných technologických zariadeniach a obvody na hlavnom toku premeny a prenosu energie, ktoré boli aj vzájomne previazané.

Prístrojové vybavenie systému regulácie bolo veľmi pestré. Na pomocných uzloch sa používali tzv. padáčkové, môstikové a kompenzačné regulátory. Boli to elektromechanické prístroje, ktorých jadrom bol mechanizmus ručičkového, tzv. nulového galvanometra, kde poloha ručičky bola zobrazením regulačnej odchýlky. Cez mechanický padáčkový systém a rôzne kulisy boli ovládané ortuťové spínače, ktoré pomocou relé a stýkačov ovládali akčný orgán, servopohon. Používané boli malé padáčkové regulátory typu RK, prevažne len vo funkcii hladinového člena pre signalizáciu prekročenia požadovanej hodnoty teploty. Na sku-

točnú reguláciu teploty, hlavne na vzduchotechnických zariadeniach, boli používané kompenzačné regulátory KRpo v spojení s odporovým teplomerom, KRioZv s premenným impulzom a s tepelnou spätnou väzbou. Pre reguláciu hladín alebo prietoku, kde prenos veličín bol cez odporový vysielač v môstikovom zapojení, boli používané regulátory typu MuRis.

Tieto prístroje, spolu s ortuťovými diferenčnými manometrami typov MUs a MUp, neskôr ešte dlho vyrábanými pod názvom ZEPEDIF, boli vyvíjané ešte v štyridsiatych rokoch dvadsiateho storočia firmou SIEMENS. Mali z dnešného pohľadu obdivuhodne precízne mechanické prevedenie, chýbala im však akákoľvek nadväznosť na teóriu regulácie, ktorá v čase budovania elektrárne A1 už bola známa. Ich nastavenie a obsluha si vyžadovala veľkú dávku intuície a zručnosti personálu.

Okrem padáčkových, môstikových a kompenzačných regulátorov boli použité v tom čase vyvíjané elektronické regulátory systému ERS a najmä elektrónkové regulátory sovietskej výroby RPIK. Systém ERS mal už štandardný ústredný člen PID a rôzne adaptéry. Použitý však bol len v malom rozsahu.

Regulátory RPIK, s meracími blokmi I-T-62 a I-III-62 boli použité v širokom rozsahu na hlavných technologických zariadeniach premeny a prenosu energie. Boli to tzv. kvázispojité regulátory s pružnou spätnou väzbou, vyvinuté v ZSSR vo VTI, ktorých prechodová charakteristika spolu s lineárnym servopohonom mala tvar približne proporcionálne – integračný (PI) . Jednotlivé konštanty P a I však nebolo možné priamo nastaviť. Pre nastavenie a optimalizáciu regulačného procesu boli k dispozícií experimentálne získané pokyny výrobcu a skúsenosti prítomných sovietskych špecialistov. Regulátory s takouto charakteristikou sa pre jednoduché aplikácie používajú aj dnes, hlavne pre lineárny servopohon, ktorý je ďaleko lacnejší a spoľahlivejší ako servopohon s premennou rýchlosťou používaný s klasickým regulátorom PID. V elektrárni A1 však tieto regulátory boli použité v zložitých a náročných obvodoch na hlavnom toku premeny a prenosu energie, preto im bola venovaná zvýšená pozornosť. Bolo dokonca zostavené špeciálne pracovisko na kontrolu a nastavenie regulátorov RPIK. Tie však napokon použité neboli, pretože neskôr sa zmenil typ regulátorov v projekte. Pre syntézu regulačných obvodov bol napokon využitý analógový počítač MEDA.

Pre obvody regulácie hladín v bubnoch parogenerátorov sa urobila podrobná analýza a následne syntéza regulačného obvodu s regulátorom RPIK. Bola to klasická trojsignálová regulácia používaná aj v klasických elektrárňach. Cieľom analýzy bolo hlavne vylúčenie nestability a prí-

padných autooscilácií regulačného obvodu, čo v prípade kvázispojitého regulátora s elektromechanickým relé vždy hrozilo.

Na reguláciu tlaku pary prepúšťacími stanicami boli inštalované hydraulické regulátory ASKANIA, používané vtedy v klasických elektrárňach. Boli to regulátory dýzové s pevnou alebo pružnou spätnou väzbou. Akčným orgánom boli hydraulické valce – servopohony. Spolu s olejovou nádržou, čerpadlami a ostatným pomocným zariadením, tvorili tieto regulátory technické zariadenie s úctyhodnými rozmermi.

Systém automatickej regulácie výkonu elektrárne A1

Systém automatickej regulácie elektrárne A1 predpokladal možnosť zmeny výkonu. Pri zmene záťaže na svorkách generátora nastala zmena spotreby pary a následne zmena jej tlaku. Na kompenzáciu tejto zmeny tlaku pary bola potrebná zmena výkonu reaktora, pričom mala byť splnená zásada, že zmena prietoku plynu cez primárny okruh musí byť v závislosti na zmene výkonu reaktora, respektíve pri jeho zvyšovaní ho musí predbiehať, aby nedošlo k prehriatiu palivových článkov. Regulačné obvody na hlavnom toku premeny a prenosu energie boli preto vzájomne previazané priamo, prostredníctvom elektrických signálov alebo nepriamo cez technologickú väzbu jednotlivých regulovaných veličín.

K obvodom na hlavnom toku premeny a prenosu energie patrila regulácia tlaku pary pred turbínou, regulácia množstva plynu pretekajúceho primárnym okruhom, regulácia teploty plynu na výstupe z reaktora, regulácia neutrónového toku v systéme ochrán a riadenia reaktora SUZ a nepriamo aj regulácia hladín v bubnoch parogenerátorov.

Základnou myšlienkou bola regulácia „od turbíny k reaktoru“. Elektráreň A1 mala prispieť k regulácii výkonu v elektrizačnej sústave. Pri tomto systéme sa vychádzalo z už spomínanej závislosti elektrického výkonu a tlaku strednotlakovej pary v kolektore pred turbínou. Tlak v kolektore bol teda základným kritériom zaťaženia elektrárne, od ktorého sa odvodzovali korekčné signály.

Postupnosť pôsobenia signálov pri regulácii elektrárne podľa premennej záťaže bola v projekte určená takto*:

* Na začiatku energetického spúšťania elektrárne bol v prevádzke iba obvod regulácie výkonu reaktora. Prietok plynu bol konštantný, daný počtom pracujúcich turbokompresorov bez regulácie klapkami. Ventil strednotlakovej pary bol nastavený do optimálnej polohy pre daný výkon.

- Regulátor turbíny menil výkon turbíny pomocou ventilu strednotlakovej pary.

- Zmeny tlaku pary pred turbínou boli impulzom pre zmenu prietoku plynu prostredníctvom Regulátora tlaku pary a Regulátora prietoku chladiva.

- Na zníženie prietoku plynu reagoval priamo Blok korekcie podľa prietoku rýchlou korekciou daného výkonu. Na zvýšenie prietoku chladiva Blok korekcie podľa prietoku nereagoval. Až po znížení teploty chladiva na výstupe z reaktora sa zmenilo zadanie výkonu I_{to} prostredníctvom Regulátora teploty plynu a Voliča výkonu.

Regulátor výkonu reaktora robil rýchlo všetky zmeny zadania výkonu a tiež kompenzoval všetky odchýlky skutočnej hodnota výkonu. Regulačné pásmo v tomto systéme bolo pochopiteľne obmedzené. Zhora – maximálnym výkonom technologického zariadenia, reaktora, parogenerátorov a turbín a zdola – napríklad možnosťou xenónovej otravy reaktora pri prudkom znížení výkonu a s ňou súvisiacim dlhodobým odstavením reaktora.

Tlak strednotlakovej pary bol regulovaný regulátorom KRI-III nepriamo. Výstup z tohto regulátora bol privedený na regulátor prietoku plynu RPIK-III a cez diferenciátor ED-II na regulátor teploty výstupného plynu RPIK-T. Regulátor strednotlakovej pary bolo možné používať len na určitom stupni výkonu, pri nábehu a odstavovaní bol tlak regulovaný prepúšťacími stanicami a už spomínanými hydraulickými regulátormi.

Akčným orgánom regulácie prietoku plynu primárnym okruhom bolo natočenie lopatiek v satí obežného kola turbokompresorov. Lopatkami pohyboval hydraulický servopohon pomocou prevodu, pák a posunovača na prívode tlakového oleja, ovládaného elektrickým servomotorom a regulátorom RPIK-III. V obvode bol aj tzv. blok korekcie prietoku plynu BKP, ktorý dával signál o zmene prietoku plynu do systému ochrany a riadenia reaktora.

Reguláciu výstupnej teploty plynu tvoril regulátor RPIK-T, ktorý pôsobil na volič výkonu ZM1 v systéme ochrany a riadenia reaktora. Na regulátor teploty boli privedené korekčné signály z regulátora tlaku pary KRI-III cez diferenciátor ED-II. Teplota na výstupe z reaktora bola meraná termočlánkami s malou zotrvačnosťou v troch bodoch a cez blok výberu maxima bol tento signál privedený na regulátor RPIK-T. Pri prekročení výstupnej teploty o 20°C sa tento regulátor odpojil a prepol

Bloková schéma regulácie výkonu a výstupnej teploty chladiva

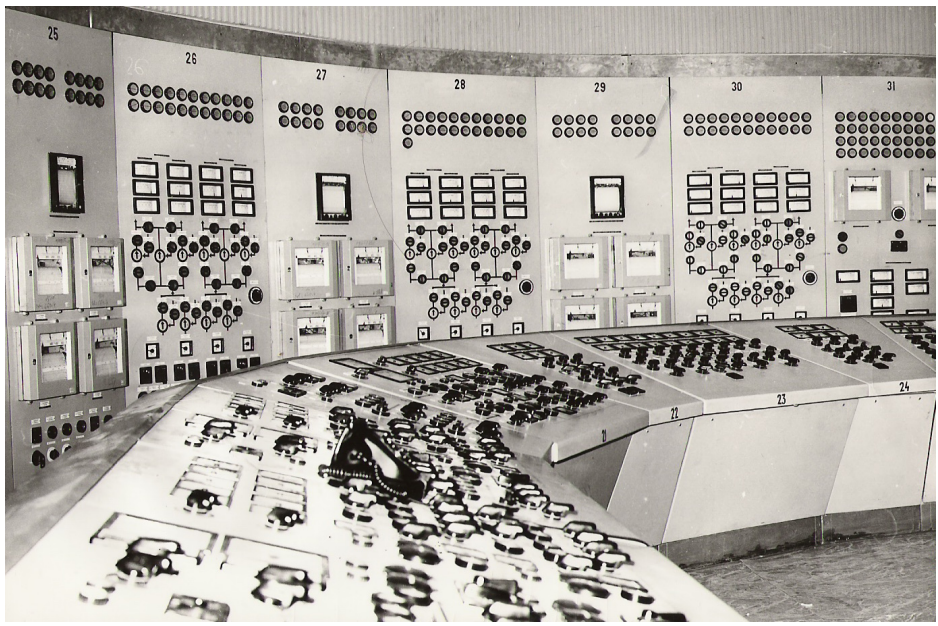
sa na záložný dvojpolohový regulátor odvodený od kontaktov bodového zapisovača teploty.

Kompletný systém automatickej regulácie premeny a prenosu energie ako celok na elektrárni A1 nebol uvedený do prevádzky. Bolo to z dôvodu nedostatkov na hlavnom technologickom zariadení, napríklad na systéme natáčania lopatiek v satí obežného kola turbokompresorov, ale aj preto, že elektráreň nedosiahla plánovaný elektrický výkon 150 MW a v prevádzke boli naraz maximálne dve turbíny. Niektoré regulačné obvody z tohto systému však boli funkčné. Napríklad regulátory hladín v bubnoch parogenerátorov, regulátor výkonu reaktora, regulátory prepúšťacích staníc a záložný regulátor teploty.

Rozmiestnenie zariadení merania a regulácie

Snímače teploty, clony pre meranie prietoku, akčné orgány regulačných a ovládacích obvodov, boli inštalované priamo na technologických zariadeniach. Snímače tlaku a tlakových diferencií, prípadne iných veličín v aktívnych prevádzkových objektoch, v reaktorovni, v plynovom hospodárstve, v čistiacej stanici aktívnych vôd, boli umiestnené v osobit-

Pohľad na pulty operátora reaktora a panely primárneho okruhu



Pohľad na pulty a panely primárneho okruhu

Pohľad na pulty operátora reaktora (vpravo) a panely elektrickej časti

ných kobkách primárnych prístrojov. V ostatných objektoch boli aj tieto snímače na technologickom zariadení alebo v jeho blízkosti.

Sekundárne ukazovacie prístroje, zapisovače, regulátory, ovládacie prvky a reléové schémy boli umiestnené na miestnych prístrojových skriniach a hlavne v dozorniach jednotlivých objektov alebo technologických uzlov. Z miestnych prístrojových skríň boli riadené niektoré pomocné systémy, spaľovanie traskavej zmesi, hospodárstvo D_2O a podobne.

Hlavným pracoviskom s najväčšou koncentráciou zariadení systému merania a regulácie bola dozorňa elektrárne, umiestnená v objekte 32 na podlaží +21 m. Dozorňa mala operatívnu a neoperatívnu časť. V operatívnej časti v zornom poli operátorov boli umiestnené panely s ukazovacími, zapisovacími prístrojmi a so signalizátorami inštalovanými spravidla v ich hornej časti. V menšej miere boli na týchto paneloch aj ovládacie prvky. Panely riadenia elektrickej schémy boli za chrbtom operátorov. V operatívnej časti dozorne bol ešte pult a stôl operátora. Na pulte bola inštalovaná väčšina ovládacích prvkov. Na stole operátora boli inštalované ovládacie prvky najdôležitejšie pre prevádzku bloku, hlavné ovládacie a signalizačné prvky systému ochrany a riadenia reaktora a ďalšie. Na nízkom pulte a na zvislých paneloch dozorne boli ostatné meracie a signalizačné prvky systému ochrany, riadenia reaktora a pohyblivých komôr. V neoperatívnej časti dozorne boli panely so sekundárnymi prístrojmi, ktorých údaj pre priame riadenie operátor nepotreboval, ale z nich boli odvodené dôležité signály pre automatické riadenie a ochrany. Okrem hlavnej dozorne na podlaží +21 m bola aj dozorňa vzduchotechniky. V elektrárni boli prívodné, odsávacie a klimatizačné vzduchotechnické zariadenia, ktoré boli riadené z tejto dozorne.

Plynové hospodárstvo, čistiaca stanica aktívnych vôd, objekt chemickej úpravy vody a čerpacej a filtračnej stanice v Pečeňadoch – mali vlastné dozorne.

Skúšky, spúšťanie a prevádzka systémov merania a regulácie

V elektrárni bol použitý rozsiahly a pestrý sortiment ukazovacích, registračných, signalizačných a regulačných prístrojov a automatov. Bolo ich približne 7 000.

Pri komplexných skúškach, fyzikálnom a energetickom spúšťaní sa komplexne preverila funkčná spôsobilosť všetkých častí systémov. Nie vždy sa dali použiť naprojektované a dodané zariadenia, pretože ich

parametre boli vybrané pre prevádzku na nominálnom výkone. Pri parametroch v I. etape energetického spúšťania rozsahy mnohých prístrojov nevyhovovali a museli byť vymenené. Okrem toho bolo aj viacero meraní doplnených. Súčasne sa ukázalo, že boli aj také merania, ktoré dávali nepoužiteľnú, bezcennú informáciu.

Počas komplexných skúšok nebolo pochopiteľne možné nastaviť väčšinu regulátorov, pretože parametre neboli v rozsahu regulácie. Nastavovali sa preto v I. etape energetického spúšťania, s výnimkou tých, ktorých prevádzka nebola v programe. Všetky základné systémy merania a regulácie v tomto období pracovali spoľahlivo.

V období prípravy na II. etapu energetického spúšťania sa urobili na systémoch úpravy podľa skúseností získaných v I. etape a odstránili sa chyby. Väčšina regulačných obvodov bola v prevádzke a osvedčili sa.

V rámci programu II. etapy boli urobené testy na systémoch merania a regulácie. Najdôležitejšími testmi bolo overenie statických a dynamických vlastností primárneho okruhu pomocou počítača, nastavenie a vyskúšanie bloku korekcie prietoku plynu reaktorom a regulátora teploty plynu na výstupe z reaktora.

Pohľad na panely sekundárneho okruhu a elektrickej časti

V III. etape energetického spúšťania sa robili na systémoch merania a regulácie ďalšie úpravy na zlepšenie alebo na rozšírenie ich funkcie a odstraňovali sa chyby.

Do prevádzky sa neuviedli všetky prostriedky merania a regulácie, pretože aj v režimoch prevádzky hlavného technologického zariadenia bolo veľa improvizácie. Systém kontroly a riadenia sa tomu prispôsoboval. Bolo treba operatívne riešiť väzby medzi prevádzkovaným a neprevádzkovaným zariadením, pričom podmienky sa neustále menili. Jednou z príčin takéhoto stavu spôsobovalo to, že A1 bolo prvé dielo tohto druhu. Napriek tomu, že elektráreň bola charakterizovaná ako priemyselná jadrová elektráreň, mala vo veľkej miere aj črty výskumného a vývojového typu. Zo subsystémov bol najspoľahlivejší systém kontroly a riadenia reaktora.

Systém ochrany a riadenia reaktora elektrárne A1

Úlohou systému riadenia a ochrany reaktora bolo poskytnúť obsluhe plnú informovanosť o stave reaktora, umožniť spoľahlivé ručné a automatické ovládanie výkonu reaktora v rôznych režimoch a zaistiť automatickú ochranu reaktora v prípade nebezpečného prekročenia dovolených parametrov. Systém zahrňoval snímače, prenosové trasy, vyhodnocovacie zariadenia, výkonové zosilňovače, akčné orgány, logické a signalizačné obvody pre meranie výkonu a periódy reaktora, pre ručnú a automatickú reguláciu výkonu, pre detekciu a vyhodnocovanie havarijných stavov a pre vykonanie nevyhnutných havarijných zásahov.

Zariadenie bolo projektované v moskovskom závode VNIIEM Moskva, v úzkej spolupráci s pracovníkmi ZVJE Plzeň. VNIIEM bol zároveň aj dodávateľom podstatnej časti elektrických blokov. Riadiace tyče boli vyrábané v ZŤS Dubnica nad Váhom.

Základné parametre systému ochrán a riadenia reaktora boli:

Výkon sa meral a zapisoval v rozsahu $5.10^{-3} \div 100\ \%\ N_{nom.}$

Výkon sa automaticky udržiaval v rozsahu $1 \div 100\ \%\ N_{nom.}$

Reaktor sa riadil ručne pomocou kompenzačných tyčí, ktoré mali rozsahu chodu 0 až 400 cm, s presnosťou ± 2 cm. Havarijná ochrana pôsobila na štyri havarijné tyče, ktoré sa voľným pádom zasunuli do aktívnej zóny asi za 1,5 sekundy po príchode havarijného signálu.

Z hľadiska funkcii bolo zariadenie systému rozdelené na tieto základné obvody: obvod merania výkonu reaktora, obvody ručnej a automatickej regulácie výkonu reaktora, obvody havarijnej ochrany reaktora a ostatné zariadenia.

Obvod merania výkonu reaktora

Obvod merania výkonu reaktora obsahoval tri ionizačné komory KNK-56 (IK), ktoré boli umiestnené, podobne ako aj všetky ostatné ionizačné komory v šachte okolo reaktora a ktorých signál bol vedený na kompenzačný zapisovač EPPV-64. Okrem toho boli výkon a perióda reaktora merané aj tromi blokmi havarijnej ochrany. Výkon sa meral v jednom logaritmickom rozsahu od 10^{-4} do 100 % N_{nom} a perióda vo dvoch rozsahoch.

Ionizačné komory typu KNK boli komory na meranie neutrónového toku s kompenzáciou prúdu od gama žiarenia. Celkove sa v elektrárni A1 použilo tridsaťšesť ionizačných komôr:

- dvakrát po päť ionizačných komôr pre obvody regulácie výkonu,
- tri ionizačné komory pre obvod merania výkonu reaktora,
- deväť ionizačných komôr pre obvody havarijnej ochrany výkonu,
- tri ionizačné komory pre obvody havarijnej ochrany od periódy,
- štyri pohyblivé komory,
- dve vnútorné ionizačné komory,
- päť ionizačných komôr bolo rezervných.

Obvody ručnej a automatickej regulácie reaktora

Všetky regulačné obvody boli navrhnuté tak, aby bolo možné elektráreň prevádzkovať v režime premenného zaťaženia zo strany siete pri zachovaní základných parametrov primárneho okruhu v prípustných hraniciach.

Reaktor sa ručne riadil pomocou tridsiatich dvoch kompenzačných tyčí, ktoré vyberal a ovládal operátor reaktora. Všetky kompenzačné tyče mali koncové vypínače a selzynové ukazovatele polohy. Presnosť ukazovania polohy v rozsahu 0 až 400 cm bola ± 2 cm.

Zadaný výkon sa automaticky reguloval pomocou dvoch identických regulátorov v rozsahu 1 až 100 % N_{nom}. Jeden z nich bol vždy v pracovnom režime a druhý v režime „horúca rezerva“. Pri poruche pracovného

regulátora jeho funkciu v plnom rozsahu automatický prevzal rezervný regulátor. Aby sa dosiahlo hladké prepnutie rezervného regulátora z režimu „horúca rezerva“ do pracovného režimu, volič výkonu rezervného regulátora vždy sledoval hodnotu „požadovaný výkon reaktora“. Každý regulátor mal na vstupe päť ionizačných komôr KNK–56 a na výstupe dve regulačné tyče.

Zadaná hodnota výkonu sa nastavovala na bloku voličom výkonu ručne alebo automaticky regulátorom teploty plynu na výstupe z reaktora. Na výstupe voliča výkonu bola požadovaná hodnota výkonu predstavovaná veľkosťou prúdu, ktorý sa privádzal na vstup elektronického zosilňovača. Tu sa sčítal s prúdom z piatich vonkajších ionizačných komôr, ktorý predstavoval okamžitú hodnotu výkonu reaktora a tak sa vytvorila regulačná odchýlka. Ďalej signál postupoval cez bloky zosilňovača, generátor nízkej frekvencie a motory regulačných tyčí menili polohu štyroch regulačných tyčí v reaktore.

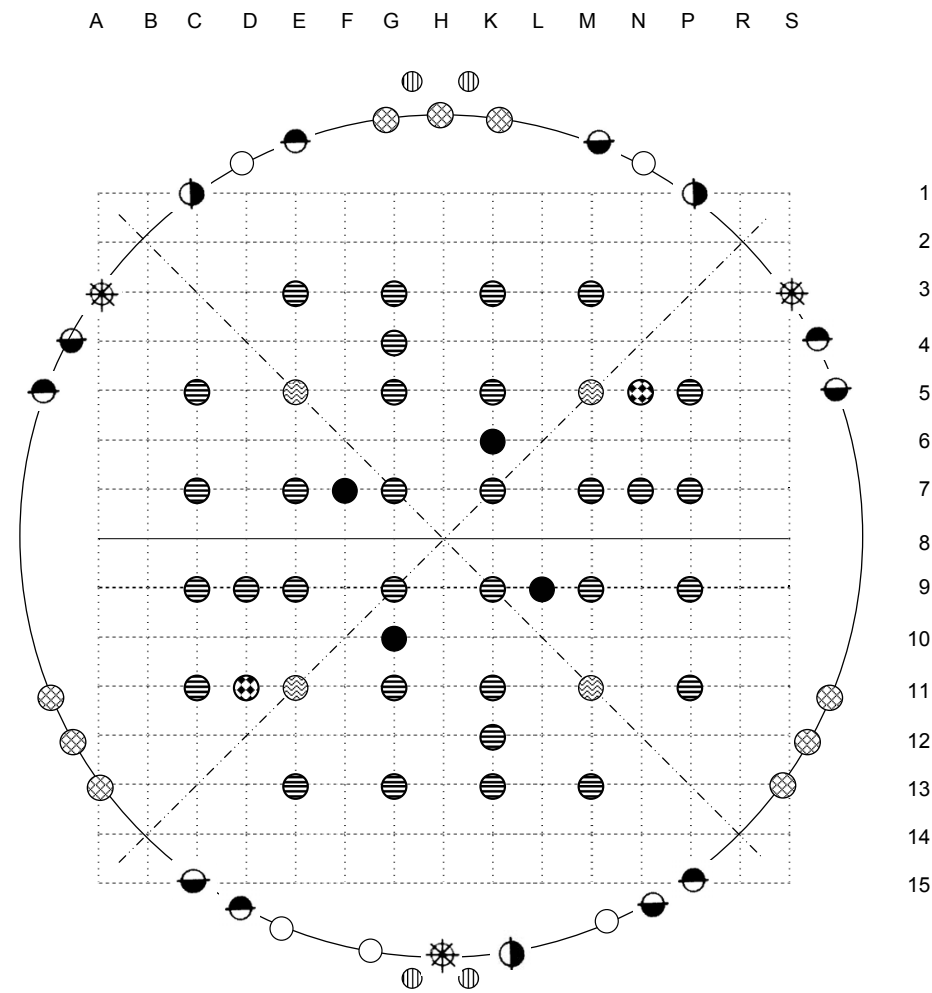
Každý regulátor mal obvody vlastnej kontroly, kontrolu napájania, kontrolu správnej funkcie zosilňovača, kontrolu napájania ionizačnej komory, kontrolu správnej polohy tyčí a ďalšie. Porucha bola signalizovaná a pracovný regulátor sa automaticky prepol na záskok.

Obvody havarijnej ochrany

Počas normálnej prevádzky sa reaktor ovládal ručne alebo automaticky. Pri iných podmienkach však mohli vzniknúť prechodové javy, ktoré by spôsobili poškodenie reaktora alebo nebezpečné stavy. Tieto procesy boli sprevádzané prekročením medzných hodnôt vybraných prevádzkových parametrov. Ak mal byť reaktor chránený pri poruchách technologického zariadenia, regulačného systému a pri chybách operátora, ochrana musela byť automatická, nezávislá na pozornosti a úvahe operátora. Na to slúžila havarijná ochrana reaktora.

Havarijná ochrana pôsobila na štyri havarijné tyče, ktoré sa voľným pádom zasunuli do aktívnej zóny za asi jeden a pol sekundy. Havarijné signály vznikali z troch druhov príčin:

- Jadrových – prekročenie dovoleného výkonu a periódy.
- Technologických, charakterizujúce odvod tepla z reaktora, prekročenie vstupnej a výstupnej teploty chladiaceho média, zníženie tlaku chladiaceho média, veľký pokles prietoku chladiaceho média.
- Elektrických – rozpad vonkajšej siete.



	Pohyblivé komory		Pohyblivé komory		
	Komory automatickej regulácie 1		Komory automatickej regulácie 1		Komory na meranie výkonu
	Komory automatickej regulácie 2		Komory automatickej regulácie 2		3 komory ochrany od periódy
	3x3 komory ochrany od výkonu		3x3 komory ochrany od výkonu		Rezervné komory

Rozmiestnenie riadiacich tyčí a ionizačných komôr v aktívnej zóne

Pri všetkých dôležitých parametroch havarijnej ochrany sa použil systém redundancie na princípe „dva z troch“, čo znamenalo že meracie kanály boli trojnásobné a na to, aby bol reaktor odstavený, museli aspoň dva kanály podať havarijný signál.

Ostatné zariadenia systému ochrany a riadenia reaktora

Do tejto skupiny patrilo napájanie systému, ovládanie, signalizácia polohy tyčí, logické obvody, vnútorné ionizačné komory (využívali sa pri spúšťaní), generátory nízkej frekvencie a ostatné meracie a signalizačné prvky.

Výkonový generátor nízkej frekvencie

Na napájanie motorov kompenzačných a havarijných tyčí napätím s konštantnou frekvenciou 10 Hz sa používal rotačný trojfázový synchrónny generátor.

Pre prácu týchto tyčí s frekvenciou 3 Hz a predovšetkým na napájanie pohonov tyčí automatickej regulácie sa používali statické trojfázové generátory, ktoré mohli spojito meniť frekvenciu v rozsahu 0 až 10 Hz, vrátane reverzácie sledu fáz, podľa veľkosti a fázy vstupného striedavého signálu.

Každý generátor mohol napájať až štyri motory. Vstupné striedavé napätie generátorov bolo zosilňované a vedené na striedavé dvojfázové motorčeky, ktoré poháňali bezkontaktné selzyny, budené do rotora striedavým napätím 50 Hz. Táto nosná frekvencia bola v statorovom napätí selzynov modulovaná frekvenciou otáčania selzynov a po fázovo citlivej detekcii bola získaná nízka frekvencia každej fáze zosilňovaná tyristorovým koncovým stupňom.

Hnací motor s indikáciou polohy

Hnacím motorom pre všetky typy tyčí bol štvorpólový synchrónny reaktančný motor, ktorý okrem klietky nakrátko pre asynchrónny rozbeh nemal na rotore žiadne vinutie. Rotory boli totiž vystavené pôsobeniu aktívneho prostredia v reaktore, statorové vinutie bolo hermeticky oddelené. Ukazovateľ polohy a indukčné snímače koncových polôh boli od aktívneho prostredia oddelené tlakovou stenou, čo umožňovalo ich výmenu pri plnom tlaku.

Medzi motorom a ukazovateľom polohy bola umiestnená odstredivá brzda na obmedzenie rýchlosti otáčania pri strate napájania. Synchrónne motory boli v pokojovom stave zabrzdené jednosmerným prúdom. Motory kompenzačných a havarijných tyčí boli pripojené na trojfázové napätie s konštantnou frekvenciou 3 Hz alebo 10 Hz. Motory regulačných tyčí

boli napájané z trojfázového generátora premenlivej frekvencie. Motory havarijných tyčí mali namiesto ukazovateľa polohy nad motorom závesný elektromagnet.

Motory pracovali s napätím 50 až 80 V, príkon bol 1 000 až 2 000 VA, maximálny moment okolo 10 Nm pri maximálnej rýchlosti 300 otáčok/min.

Mechanika riadiacej tyče

Mechanika riadiacej tyče prevádzala rotačný pohyb servomotora na postupný pohyb riadiacej tyče, zaisťovala jej vedenie a meranie polohy. Ako pohybová dvojica boli vybrané skrutka a matica, ktoré umožňovali zasúvanie a vysúvanie tyče motorickou silou, nielen vlastnou váhou. V regulačných a kompenzačných tyčiach sa skrutka z nehrdzavejúcej ocele otáčala, bola dutá a prechádzal ňou plyn na chladenie kadmiovej časti tyče. Matica bola z tvrdého grafitu, vedená bronzovými kladkami v drážkach nosnej rúry.

Havarijné tyče mali otáčavú maticu a skrutka sa pohybovala lineárne. Grafit bol pre maticu vybraný preto, lebo v reaktore sa nesmeli používať organické mazadlá. Okrem toho boli vyvinuté špeciálne guľôčkové ložiská, schopné trvale pracovať v prostredí s CO_2 pri tlaku 6,5 MPa bez akýchkoľvek organických mazadiel. Ložiská podobne ako ostatné časti mechaniky boli z nehrdzavejúcej ocele. Iba časti nosnej rúry, ktoré sa ponárali do ťažkej vody boli z avialu. Pri menovitej rýchlosti motora tyče sa pohybovali rýchlosťou 15 cm/s.

Kadmiová riadiaca tyč

Kadmiové riadiace tyče boli akčnými orgánmi regulácie reaktora, ktoré určovali veľkosť a priestorové rozloženie reaktivity, pretože priamo zasahovali do aktívnej zóny. Veľmi náročné a niekedy aj protichodné požiadavky spôsobili, že konštrukcia tyče bola zložitá. Tyče mali mať malú hmotnosť, veľký vplyv na reaktivitu, malý vývin tepla, odolnosť proti teplotám, tlaku, vode nasýtenej CO_2, nesmeli vyvolávať elektrokoróziu tlakovej nádoby reaktora.

Kadmiová tyč mala tvar fieldovskej rúrky s kadmiom rozčleneným na mnoho stoviek vzájomne oddelených krúžkov, hermeticky uzatvorených v plášti z avialu. Technológia výroby bola veľmi náročná.

Zariadenie pohyblivých komôr

Zariadenie malo charakter doplňujúceho meracieho a riadiaceho systému a umožňovalo asi 10^2 krát rozšíriť rozsah automatickej regulácie výkonu reaktora. Pracovalo na princípe pohyblivých neutrónových komôr, kde logaritmus výkonu reaktora bol daný polohou komory a perióda bola daná prevrátenou hodnotou rýchlosti pohybu komory. Komory s predzosilňovačmi boli umiestnené dlhých kanáloch, ktoré sa pohybovali (kývali) vo vodnej biologickej ochrane okolo reaktora.

Zariadenie tvorili štyri rovnaké samostatné systémy, ktorých jeden mohol byť v režime „regulácia“, ostatné tri pracovali ako merače. Ich havarijné signály boli spracované systémom výber „dva z troch“ s jedným rezervným systémom. Zariadenie bolo schopné pracovať aj pri poruchách alebo vyradení dvoch zo štyroch systémov.

Meranie polohy i vyhodnocovanie rýchlosti komôr, rovnako ako spracovanie impulzných signálov, logické, ovládacie a signalizačné obvody, vrátane obrazoviek boli zhotovené v tej dobe modernou bezkontaktnou a číslicovou technikou. Mnoho častí bolo v Československu patentovaných.

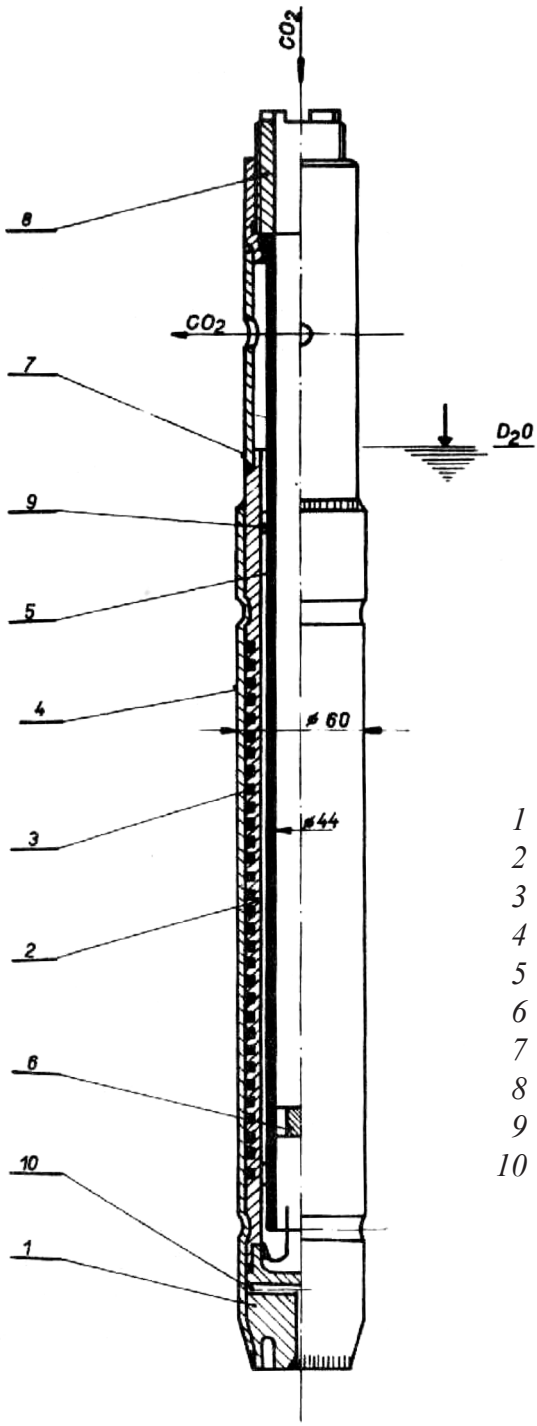
Všetky zariadenia systému sa napájali jednosmerným a striedavým napätím z dvoch nezávislých zdrojov. Jednosmerné napätie bolo z dvoch veľkých akumulátorových batérii, zdrojom striedavého napätia boli rotačné reverzné motorgenerátory, ktoré boli napájané tiež z batérií. Záskoky boli automatické.

Rozmiestnenie zariadení systému ochrany a riadenia reaktora

Zariadenie systému ochrany a riadenia reaktora bolo v elektrárni na reaktore. Boli to riadiace kadmiové tyče, ich pohybové mechanizmy vrátane pohonov, indikácie polohy a magnetov havarijných tyčí. Prechodne sa pri spúšťaní reaktora dali zasúvať i pohyblivé komory a ich pohony do zvláštnych kanálov.

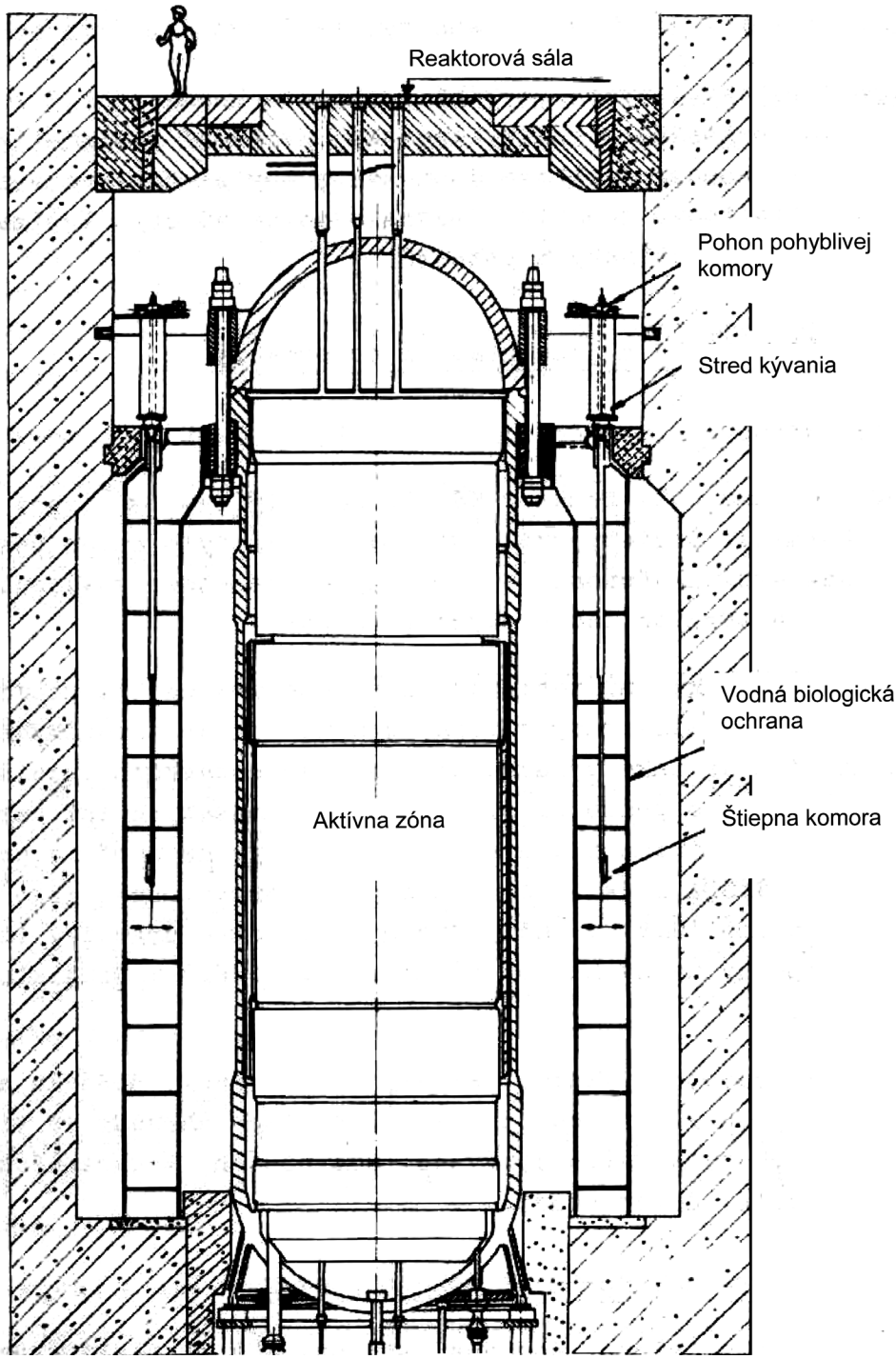
V šachte okolo reaktora bolo rozmiestnených tridsať ionizačných komôr so svorkovnicami a predzosilňovačmi, pohyblivé komory a ich pohony.

V operatívnej časti dozorne elektrárne v objekte 32 – medzistrojovni na podlaží +21 m boli na pulte operátora hlavné ovládacie a signalizačné prvky systému ochrany a riadenia reaktora, všetky bloky havarijnej



1 - hlavica
2 - vnútorná rebrovaná rúrka
3 - pohlcujúce krúžky
4 - vonkajšia rúrka
5 - vnútorná fieldovská rúrka
6 - doraz
7 - predlžovacia rúrka
8 - matica
9 - dištančné rebro
10 - odsávací otvor

Pozdĺžny rez kadmiovou tyčou



Rozmiestnenie pohyblivých komôr

ochrany a pohyblivých komôr a časť logiky pohyblivých komôr. Na nízkom pulte boli selzyny kompenzačných tyčí a na zvislých paneloch dozorne ostatné meracie a signalizačné prvky systému ochrany a riadenia reaktora a pohyblivých komôr.

Na podlaží +21 m v objekte 30 – reaktorovni – bola miestnosť systému ochrany a riadenia reaktora. Jednotlivé panely v nej mali funkciu podobnú ako panely v neoperatívnej časti dozorne. Boli tam rozvádzače s riadiacimi, logickými obvodmi regulačných, kompenzačných a havarijných tyčí, oba automatické regulátory vrátane výkonových generátorov nízkej frekvencie, napájacie zdroje, svorkovnice ionizačných komôr a panely pohyblivých komôr. Na chodbe pri tejto miestnosti boli dva agregáty 10 Hz a ich riadiace panely. Reaktor sa z tohoto miesta operatívne neriadil.

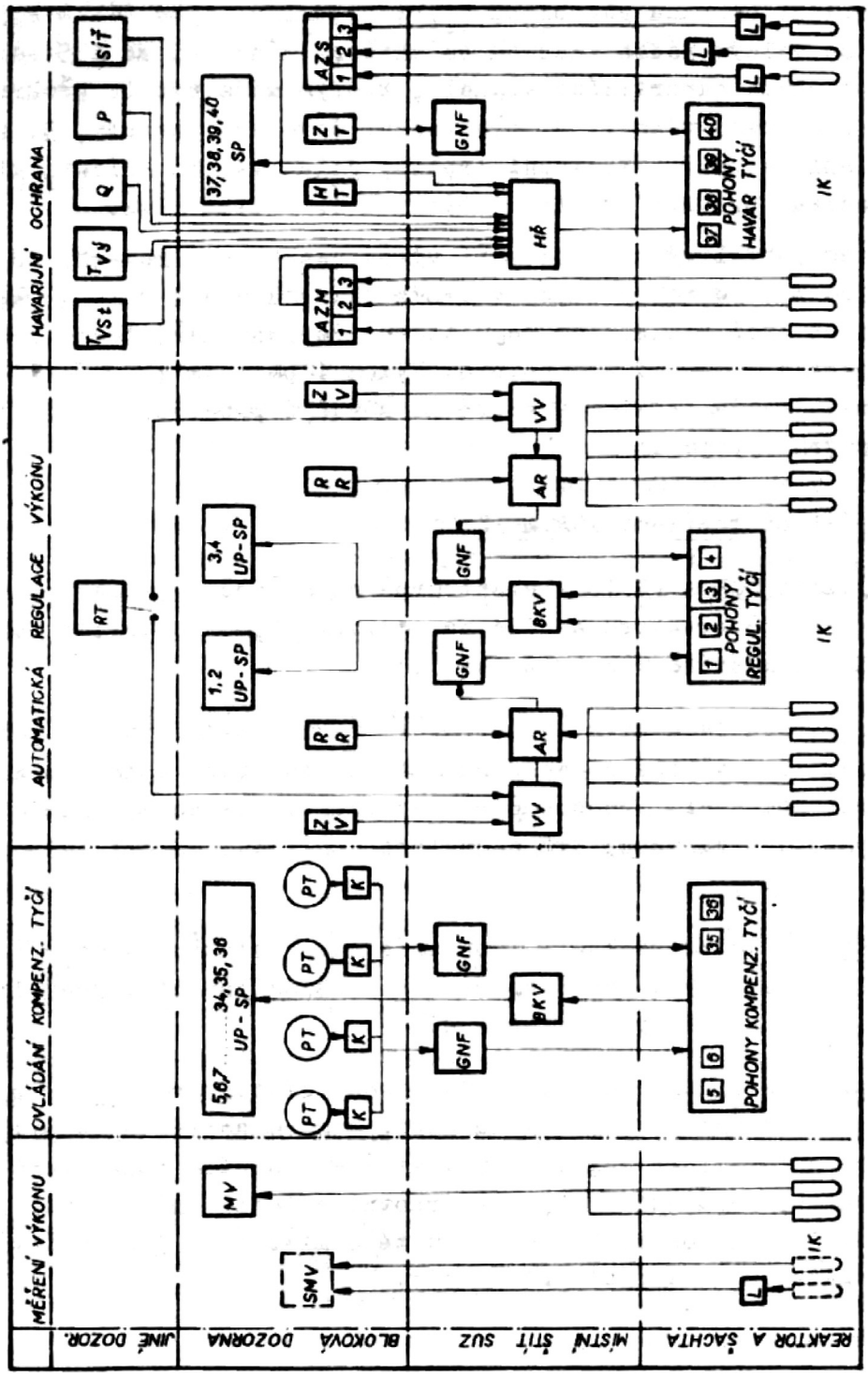
Skúšky zariadenia systému ochrany a riadenia reaktora a jeho uvádzanie do prevádzky

Všetky časti zariadenia sa vo výrobných závodoch kontrolovali v rozsahu prevyšujúcom bežné technické kontroly. Na stavbe sa po montáži robili individuálne skúšky s cieľom overiť stav a funkciu zariadenia po doprave a montáži. Odstraňovali sa i prípadné chyby.

Pri komplexných skúškach sa overovala a nastavovala súčinnosť jednotlivých blokov. Okrem toho na každom pohone tyčí prebehlo desať cyklov úplného vytiahnutia a zasunutia pri rôznych rýchlostiach a pri imitovaní porúch. Tyče havarijnej ochrany sa preverovali zhodením do aktívnej zóny imitovaním každého havarijného impulzu. Merali sa statické charakteristiky automatických regulátorov. Vo veľkej miere sa pritom používali skúsenosti z vývoja a výskumu na modeloch. Komplexné skúšky boli v júni a júli 1972 a skončili sedemdesiatdva hodinovou nepretržitou prevádzkou.

Haváriou upchávky turbokompresora a s tým súvisiacim zaolejovaním reaktora a primárneho okruhu spolu s poruchami na technologických kanáloch a odmasťovaním, sa fyzikálne spúšťanie odložilo o šestnásť mesiacov. Vážne sa tak narušila plynulosť prác a naviac pri odmasťovaní a pôvodne neplánovaných prácach boli poškodené vývody systému ochrany a riadenia reaktora. Nepriaznivo sa prejavilo tiež starnutie zariadení a to, že niektoré funkčné plochy skorodovali.

Pred fyzikálnym spúšťaním bolo treba pre plánované testy urobiť veľké úpravy na už vyskúšanom zariadení a pred energetickým spúšťaním



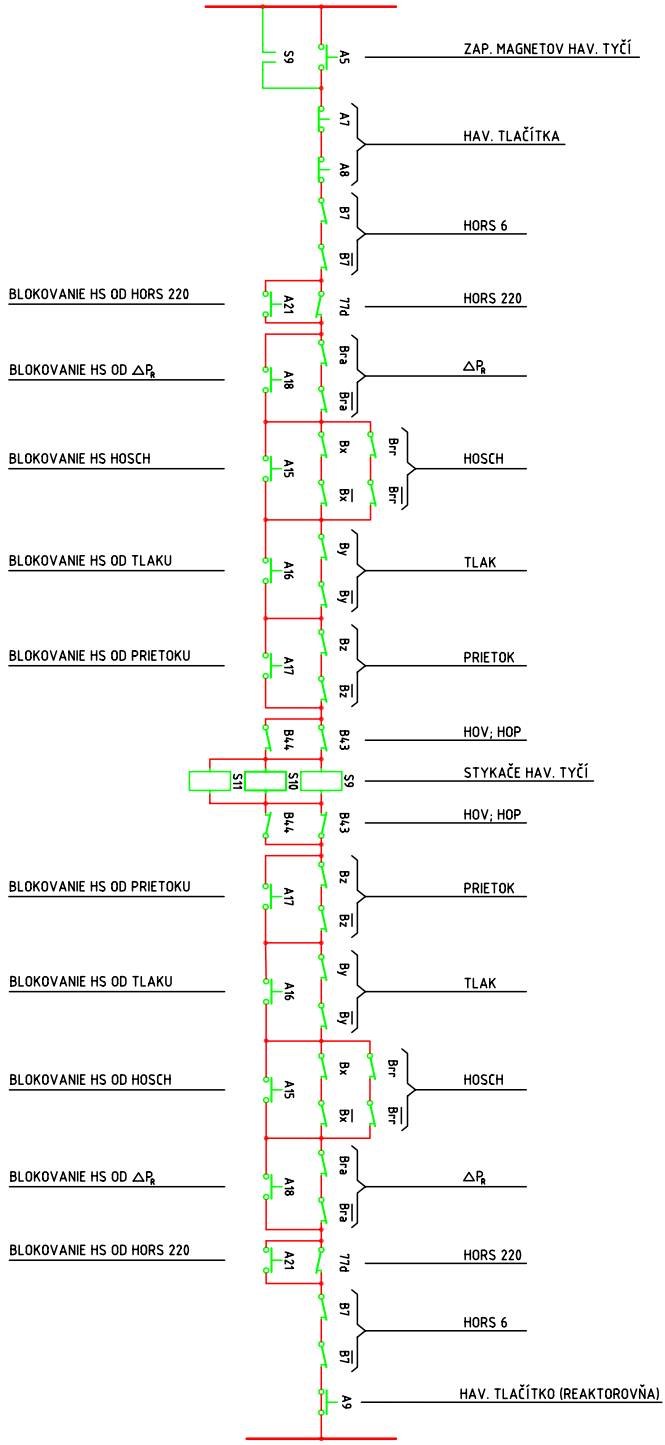
Schematické rozmiestnenie zariadenia systému ochrany a riadenia reaktora

všetko vrátiť do projektového stavu. Takmer polovica všetkých meraní a testov fyzikálneho spúšťania bola zameraná na kalibráciu a a overovanie funkcie systému ochrany a riadenia reaktora. Bolo to pochopiteľné, pretože reaktor bol prvý takéhoto typu a výkonu. Pri samotnom fyzikálnom spúšťaní sa pre riadenie reaktora i pre havarijnú ochranu použili iné, citlivejšie snímače, umiestnené v aktívnej zóne. Tieto dočasné prístroje a obvody obvykle neboli zapojené podľa princípu výberu „dva z troch" a často vysielali falošné havarijné signály.

Výsledky testov pri spúšťaní však potvrdili, že systém ochrany a riadenia reaktora mal minimálne projektové parametre a bol veľmi spoľahlivý. Za obdobie od komplexných skúšok až do skončenia I. etapy energetického spúšťania (1.6.1972 – 25.2.1973) bola havarijná ochrana aktivovaná deväťdesiat sedem krát. Z toho päťdesiattrikrát v rámci plánovaných programov, dvadsaťsedemkrát chybnými signálmi prístrojov spôsobenými nesprávnym uzemnením a poruchami napájania a trinásťkrát chybami obsluhy. Ani raz nebola havarijná ochrana aktivovaná skutočným havarijným stavom.

Počas prípravy II. etapy energetického spúšťania boli vymenené štyri kompenzačné tyče za nové, ktoré mali absorpčnú časť dlhú iba 787 mm v dolnej časti tyče. Malo sa tak dosiahnuť lepšie rozloženie neutrónového toku pozdĺž výšky aktívnej zóny. Boli vymenené kompenzačné tyče s kratšou dĺžkou kadmiovej časti za tyče s normálnou dĺžkou kadmia. Po tejto úprave sa urobilo nové meranie rozloženia neutrónového toku pozdĺž výšky a pozdĺž polomeru aktívnej zóny.

Aj v II. etape energetického spúšťania systém pracoval spoľahlivo. V III. etape energetického spúšťania sa na systéme okrem bežnej údržby a odstraňovania závad urobili viaceré úpravy, najmä po skúsenostiach z havárie s vystrelením palivového článku z reaktora dňa 6.1.1976 v schéme havarijných signálov. Zaujímavosťou boli uzamykateľné tlačidlá pre blokovanie niektorých signálov. Pokračovalo sa vo výmenách kompenzačných tyčí na zlepšenie rozloženia neutrónového toku a vymenili sa vyhorené regulačné tyče. Na konci etapy sa prejavovali vo väčšej miere príznaky starnutia súčiastok.



Upravená schéma signálov havarijnej ochrany

16. ELEKTRICKÁ SCHÉMA A JEJ ZMENY

Základný popis elektrozariadení inštalovaných podľa pôvodného projektu a pôvodnej koncepcie havarijného dochladzovania

V elektrárni A1 boli inštalované tri turbogenerátory s výkonom po 50 MW. Generátory s menovitým napätím 10,5 kV boli cez odpojovače v každom elektrickom bloku pripojené k trom trojfázovým transformátorom T1, T2 a T3 242 kV+-5 % / 10,5 kV s dvoma vinutiami s výkonom každého 63 MW. Generátory nemali generátorové vypínače.

Jednotlivé bloky boli na napätie 220 kV pripojené k jednoduchému systému zbernice cez vzduchové vypínače. Výkon bol vyvedený do energetického systému len jedným prenosovým vedením 220 kV – linkou 073 do rozvodne v Križovanoch.

Transformátormi T11, T12 a T13 boli napájané rozvody 6kV – rozvodne R6-1a, 1b; R6-2a, 2b, R6-3a,3b (po dvoch sekciách na každý blok). Systém vlastnej spotreby 0,4 kV,50 Hz bol napájaný ďalšou skupinou znižovacích transformátorov 6kV/0,4kV: T111, T132, T135 a T136 s výkonom každého 1250 kVA, T113 s výkonom 1000 kVA a T120, T130 s výkonom 630 kVA.

Rezervné napájanie vlastnej spotreby 6 kV bolo z dvoch rezervných transformátorov T18 a T19, každého s výkonom 16 MVA, 110 ± 8 /6,3 kV pripojených k linke 110 kV A1 – Piešťany a A1 – Trnava a z ďalšieho transformátora 12,5 MVA, 110 ± 8 /6,3 kV pripojeného linkou 110 kV na hydrogenerátory v hydroelektrárni v Maduniciach.

Pôvodná, projektom definovaná koncepcia pre prípady straty pracovného a rezervného napájania riešila dochladzovanie reaktora prostredníctvom len jedného predvoleného cirkulačného turbokompresora s 3 000 ot/min.

Pri odstavení reaktora, výpadku siete 220 kV, vypnutí vypínača vedenia 073, vypnutí blokových vypínačov 220 kV elektrických blokov a prevádzkovej schopnosti turbogenerátorov bola kinetická energia ich dobehov využívaná na výrobu elektrickej energie, ktorou bola napájaná vlastná spotreba počas tridsiatich piatich sekúnd od okamihu uzavretia prívodu pary do turbín.

Jeden synchrónny 5 MW motor turbokompresora bol automaticky napájaný z hydroelektrárne Madunice z jedného predvoleného hydrogenerátora 18 MVA. Ak predvolený generátor bol v prevádzke, oddelil sa od

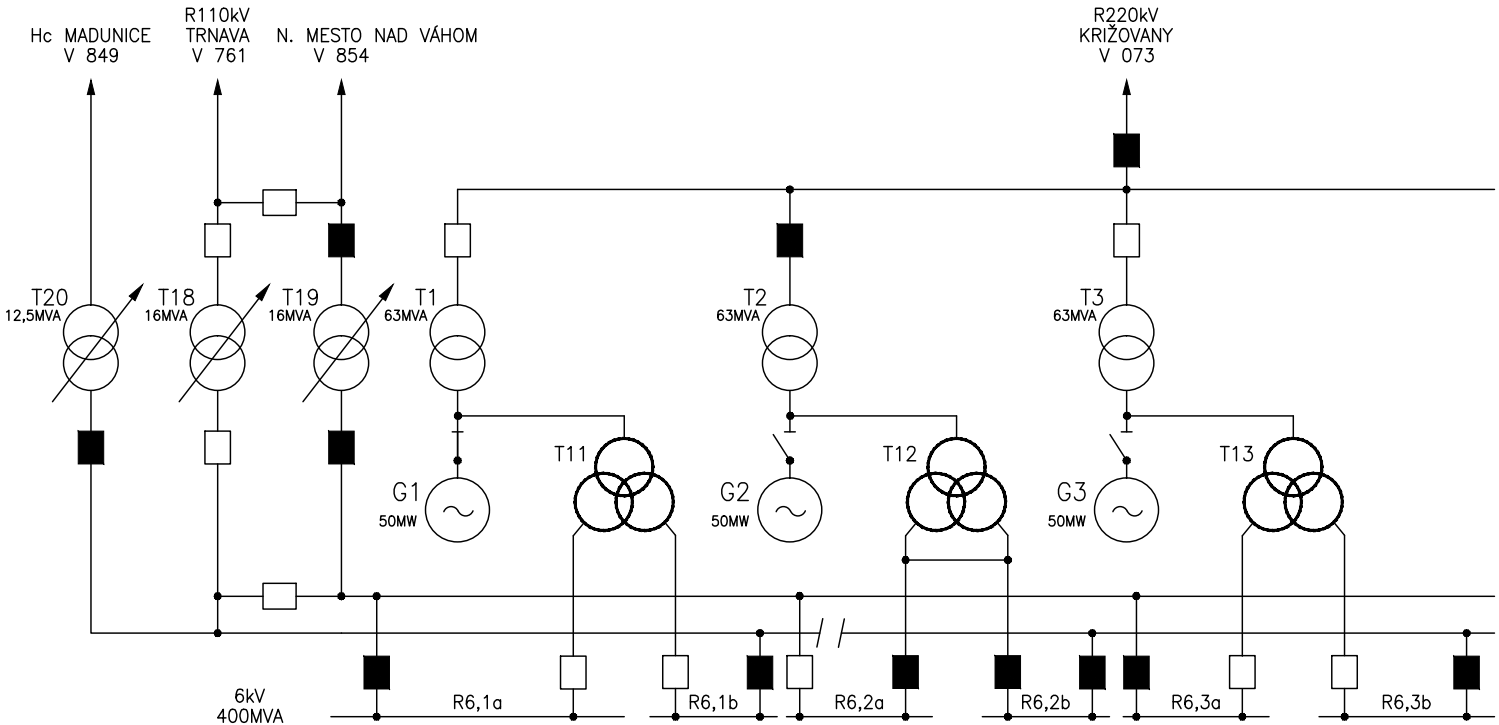
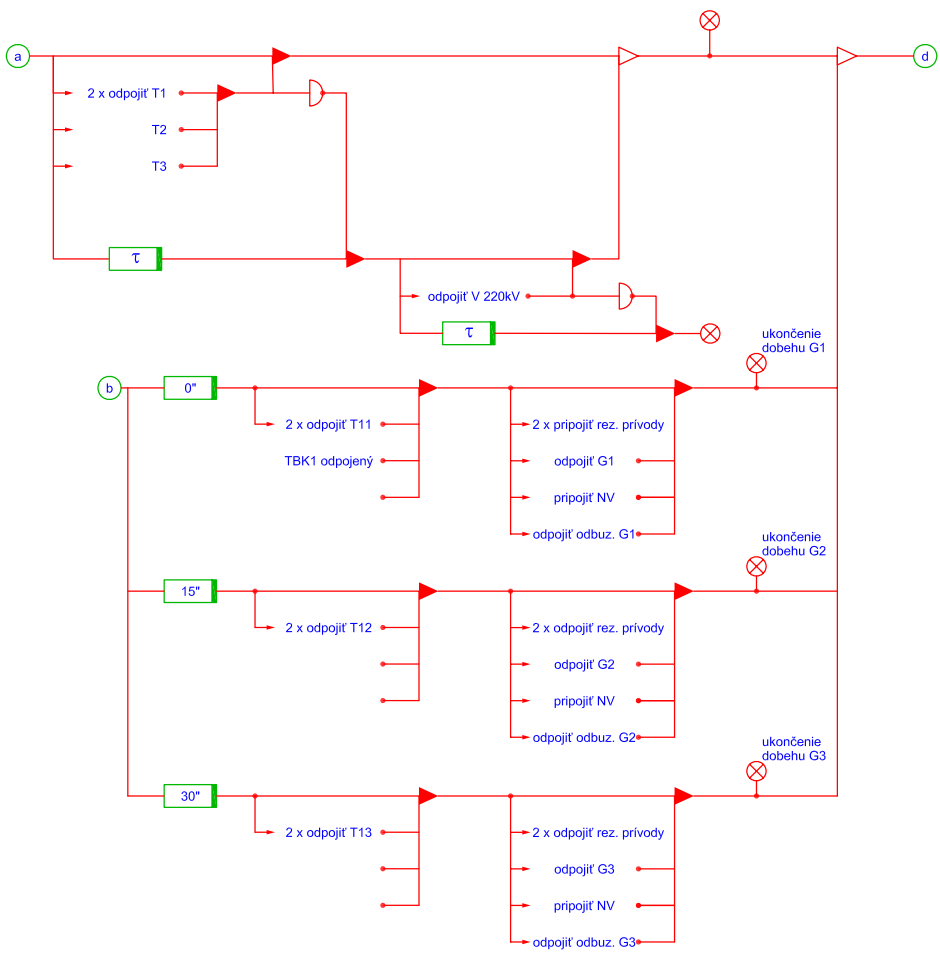


Schéma elektrárne A1 v časti vysokého a veľmi vysokého napätia v I. etape energetického spúšťania

distribučnej siete do autonómneho režimu a bol prepojený do elektrárne A1, kde k nemu resynchronizoval synchrónny motor turbokompresora.

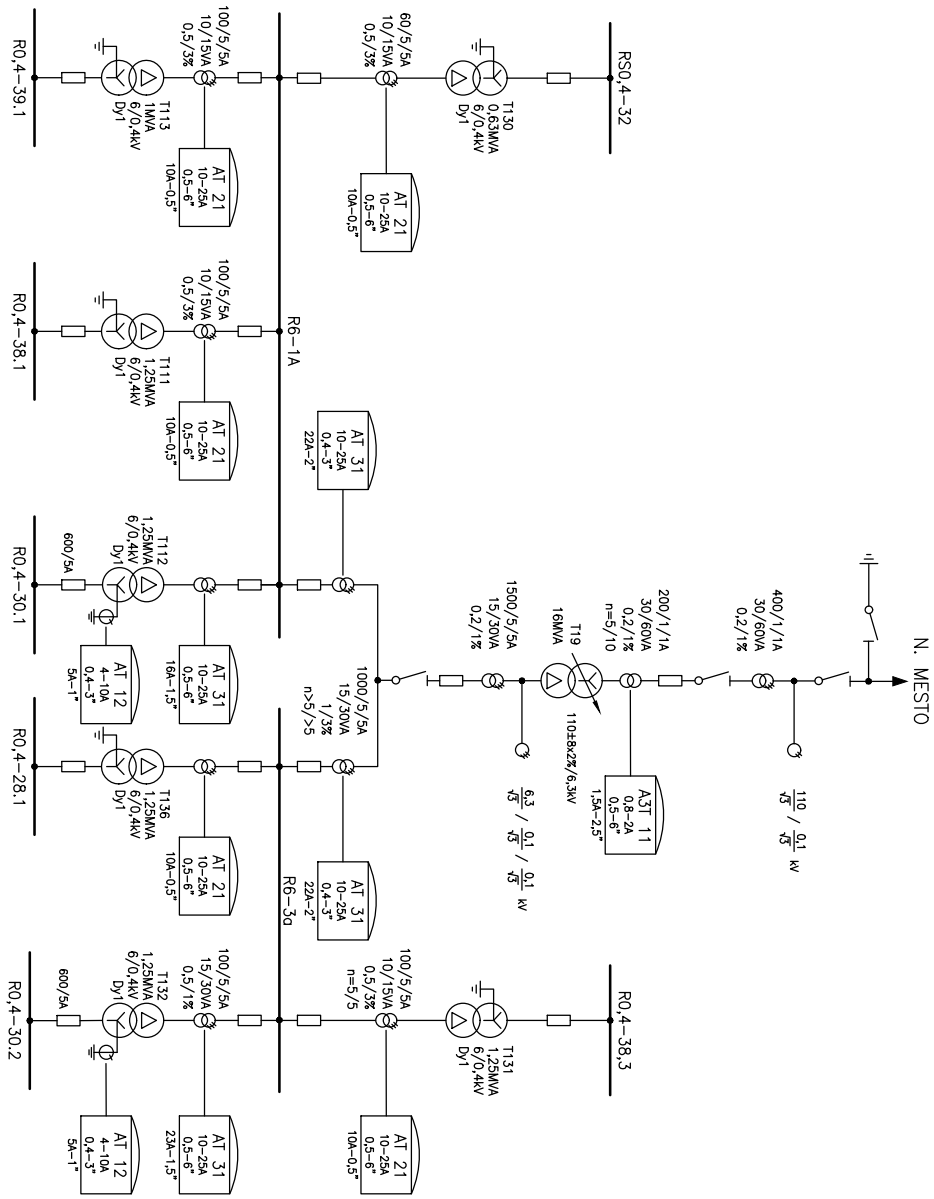
Ak predvolený hydrogenerátor nepracoval, automatický štartoval a po dosiahnutí nominálnych parametrov bolo jeho napätie cez transformátor podané na príslušnú rozvodňu 6 kV pre umožnenie automatickej resynchronizácii jedného predvoleného synchrónneho motora 5 MW cirkulačného turbokompresora. Rozbeh synchrónneho motora turbokompresora zo 110 kV siete bol však možný iba pomocou viacerých pracujúcich zdrojov. .

Pre napájanie zvlášť dôležitých spotrebičov vlastnej spotreby (systém merania a regulácie, systémy riadenia a ochrany reaktora, dozimetrická kontrola) boli vytvorené systémy zaisteného napájania 1. kategórie s dvo-



Algoritmus dobehu alternátorov

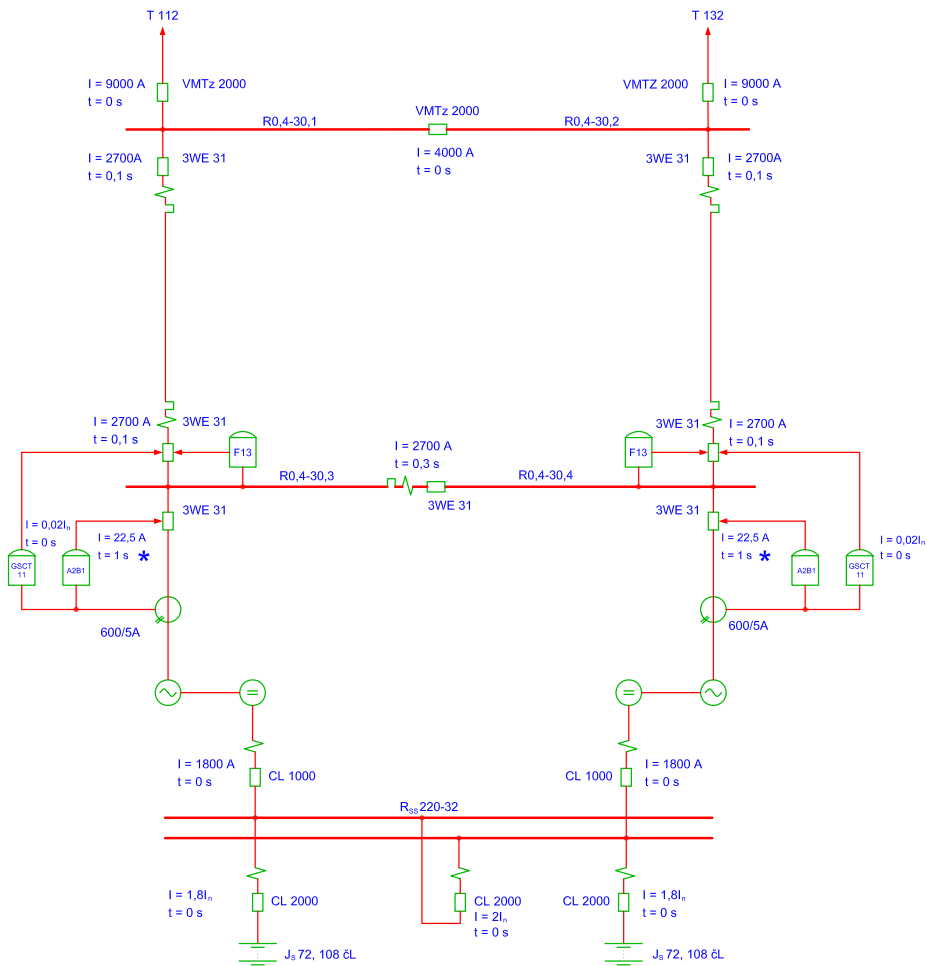
ma sekciami navzájom prepojenými pomocou sekčných vypínačov. Rozvádzače 1. kategórie 0,4 kV, 50 Hz mali možnosť napájania z pracovnej alebo rezervnej siete 0,4 kV, 50 Hz alebo z inverzných motorgenerátorov. Inverzný stroj tvorili striedavý a jednosmerný na jednom hriadeli.



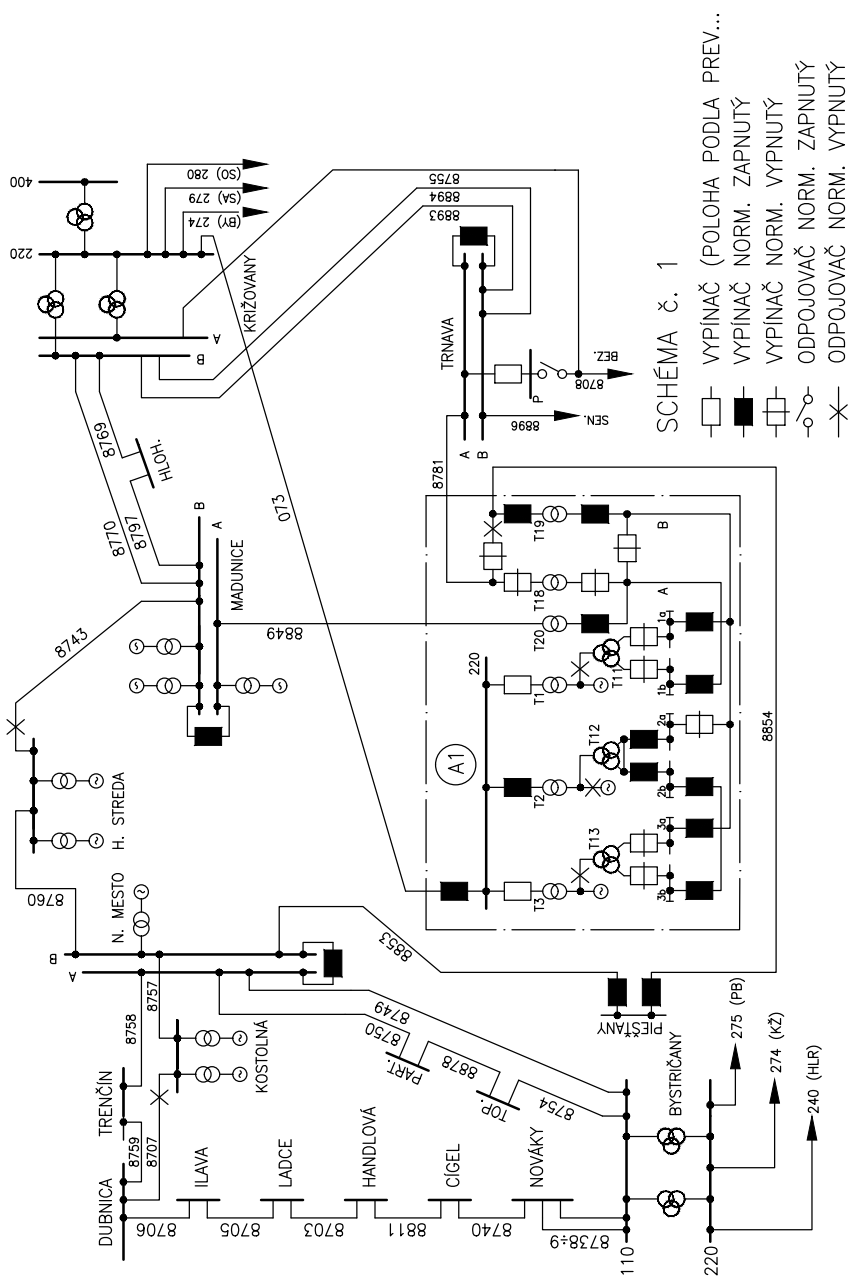
Nastavenie nadprúdových elektrických ochrán v schéme napájania vlastnej spotreby z HC Madunice cez transformátor T20

V normálnych režimoch – pri prevádzkyschopnom pracovnom, alebo rezervnom napájaní boli rozvádzače R 0,4 - 30.3 a 30.4 cez R 0,4 - 30.1 a 30.2 napájané z pracovných alebo rezervných zdrojov. V týchto normálnych režimoch obidva inverzné motorgenerátory MG1 a MG2 s automatickým inverzným režimom boli prevádzkované ako synchrónne motory poháňajúce dynamá.

Výkon striedavého stroja bol v motorickom režime 320 kW a v generátorovom režime 256 kW. Výkon jednosmerného stroja bol v motorickom režime 370 kW a v generátorovom režime 80 kW. Jednosmerné motory pracovali v generátorovom režime – ako dynamo. Dynamami boli zásobované jednosmerné spotrebiteľské systémy a súčasne boli dobíjané batérie 220 V=.



Zaistené napájanie 1. kategórie neprerušovanej jednosmernej 220 V = a striedavej elektrickej energie 0,4 kV, 50 Hz



Pripojenie A1 na sieť 220 kV a 110 kV počas fyzikálnych testov reaktora a prvých etáp energetického spúšťania (stav pred vyvedením výkonu z turbogenerátorov TG1 a TG3 do elektrizačnej sústavy)

Dieselgenerátorová stanica nebola súčasťou pôvodného projektu, teda neexistovali miestne nezávislé autonómne zdroje – dieselgenerátory, ktoré by mohli v prípade výpadku pracovného a rezervného napájania plniť (okrem iných funkcií) i funkciu dobíjania staničných batérií 220 V=.

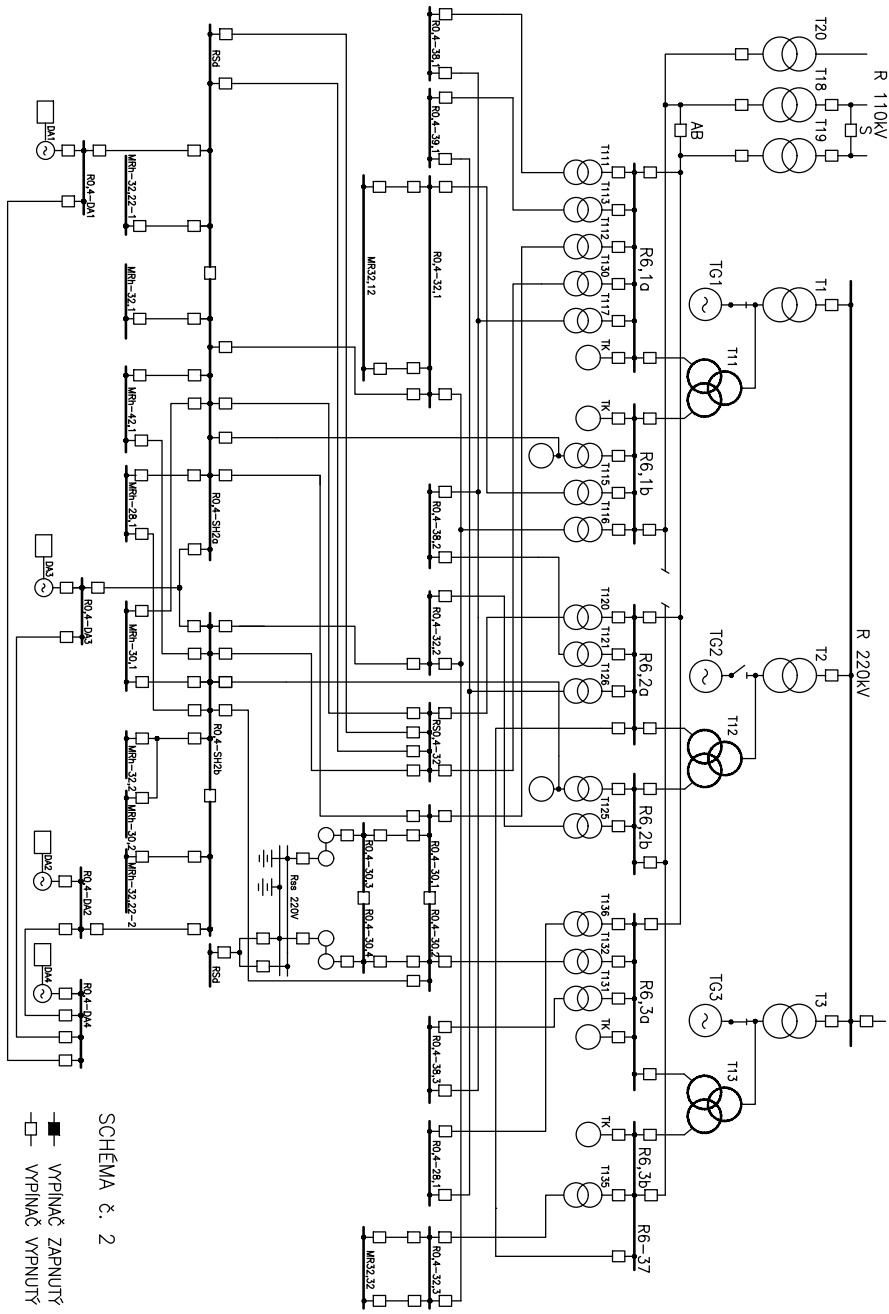


Schéma napájania vlastnej spotreby A1 počas prvých etáp energetického spúšťania. Výkon reaktora bol vyvedený len do siete 220 kV turbogenerátormi TG1 a TG3, pracovné prívody z odbočkových transformátorov T11 a T13 boli vypnuté. Turbogenerátor TG2 bol mimo prevádzky a odpojený od blokového transformátora odpojovačom

Nová koncepcia a prostriedky havarijného a superhavarijného dochladzovania elektrárne

Pri komplexných a špeciálnych skúškach elektrického zariadenia sa zistilo, že zariadenia nevyhovovali požiadavkám jadrovej bezpečnosti pri prevádzke. Zistili sa aj nedostatky projektu a nedostatočná spoľahlivosť niektorých použitých konštrukčných prvkov.

Pri mnohých „ostrých“ skúškach automatického zabezpečovania zdroja a dynamickej stability autonómnej prevádzky cirkulačného turbokompresora z hydrocentrály Madunice sa zistila a dokázala nespoľahlivosť automatického zabezpečenia tohto nezávislého zdroja pre dochladzovanie reaktora. Hydrogenerátor nebol schopný zvládnuť resynchronizáciu synchrónneho motora turbokompresora, dokonca ani pri vypnutí minimalizovanej vlastnej spotreby. Tento dynamický proces bol taký, že generátor vypínali ochrany.

Z ôsmich prípadov sa podarilo resynchronizovať synchrónny motor až na posledný pokus, aj to s podmienkou, že minimalizovaná spotreba na rozvodni 6 kV bola vypnutá, boli prestavené (znecitlivené) vlastné elektrické ochrany hydrogenerátora a ochrany generátora na vývode z Maduníc. Týmto riešením však nebolo zabezpečené dostatočné chránenie v hydroelektrárni.

Tieto nedostatky spôsobili nakoniec to, že sa prijalo rozhodnutie urobiť energetické spúšťanie v troch etapách s postupným zvyšovaním výkonu reaktora.

V I. etape bol základný režim: prevádzka s dvomi blokmi generátor – transformátor a dočasnou schémou jednosmerného napájania vlastnej spotreby z troch vonkajších zdrojov:

- Z linky 220 kV
  Cez blokový transformátor T2 a odbočkový transformátor T12 boli napájané tri 6 kV sekcie. K jednej z nich bol pripojený synchrónny motor turbokompresora č. 6. Generátor druhého bloku bol od bloku odpojený. Na odbočkovom trojvinuťovom transformátore T12 boli galvanicky prepojené jeho sekundárne vinutia 6 kV. Dôvodom bolo odstránenie nevyhovujúceho poklesu napätia pri rozbehu synchrónneho motora 5 MW cirkulačného turbokompresora č. 6. Na tento systém boli pracovnými prívodmi zapojené rozvodne 6 kV - R6, 2a; R6, 2b a R6, 3b.

- Z linky 110 kV
  Cez transformátor T19 boli napájané ďalšie 6 kV sekcie. Z nich boli napájané synchrónne motory turbokompresorov č. 1 a č. 5.
- Z linky 110 kV z Maduníc
  Cez transformátor T20 boli napájané príslušné sekcie 6 kV. K jednej z nich bol pripojený synchrónny motor turbokompresora č. 2. Sieť vlastnej spotreby bola od napájania z Maduníc odpojená.

Súčasne sa rozhodlo, že zvýšenie spoľahlivosti dochladzovania reaktora sa zabezpečí tak, že na dva turbokompresory nepracujúceho bloku budú pripojené asynchrónne „pony-motory". Návrh už neuvažoval s resynchronizáciou, alebo rozbehom synchrónneho motora 5 MW predvoleného turbokompresora napájaného z vydeleného hydrogenerátora v HC Madunice trvale pracujúce pri 600 ot/min. Ich napájanie bolo z novovybudovaných nezávislých, autonómnych elektrických zdrojov dieselgenerátorov s menovitým napätím 0,4 kV, 50 Hz – 2. kategórie prerušovaného napätia.

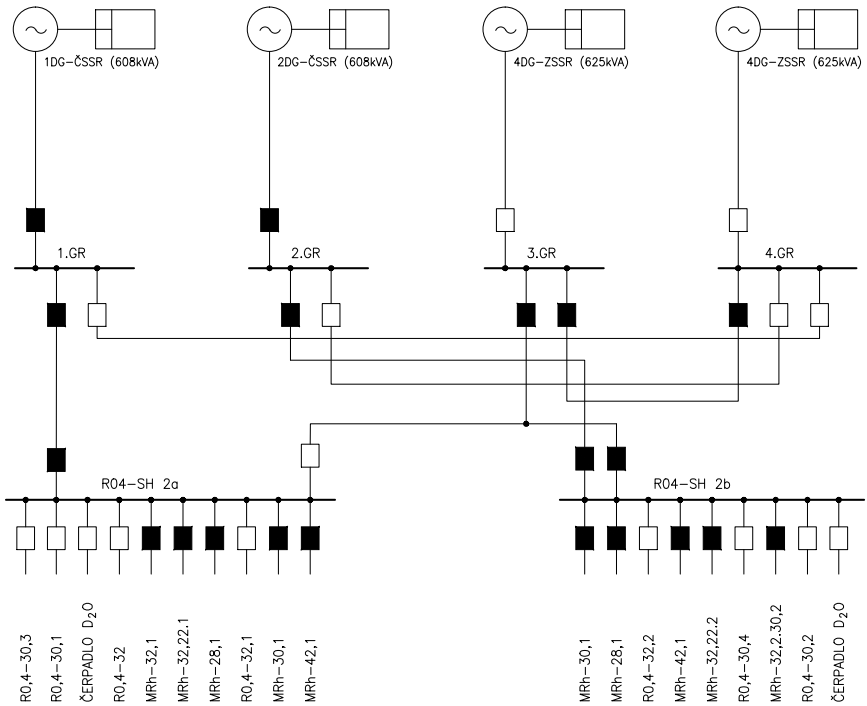
Všetky sekcie 0,4 kV boli napájané podľa pôvodného projektu, rovnako aj sieť napájania spotrebičov I. kategórie a sieť napájania spotrebičov jednosmerného prúdu.

Elektrina vyrábaná turbogenerátormi č. 1 a č. 3 bola vyvedená do energetickej siete cez systém zberníc a linku 220 kV.

Pri strate vonkajšieho napájania z liniek 220 kV i 110 kV bola vlastná spotreba v režime havarijného a superhavarijného dochladzovania zabezpečená z dvoch zdrojov:

1. Z trvale pracujúceho generátora v Maduniciach, ktorý sa odpojil od energetického systému a napájal turbokompresor č. 2 pracujúci na 3 000 ot/min.

2. Z dvoch trvale pracujúcich dieselgenerátorov, ktoré napájali turbokompresory č. 3 a č. 4 pracujúce pri 600 ot/min. Na pohon turbokompresorov boli použité asynchrónne „pony-motory" s kotvou nakrátko a výkonom 55 kW/380 V, ktoré boli na mieste odmontovaných budičov synchrónneho motora a boli spojené s turbokompresorom cez hriadeľ synchrónneho motora.



Zdroje – dieselgenerátory a hlavný rozvod neprerušovanej striedavej elektrickej energie 0,4 kV, 50 Hz, pre napájanie dôležitých spotrebičov počas I. a II. etapy energetického spúšťania

Pri strate napätia z vonkajších zdrojov a z Maduníc boli z dieselgenerátorovej stanice napájané všetky zariadenia potrebné pre superhavarijné dochladzovanie.

Dieselgenerátorová stanica nebola v pôvodnom projekte. Projektovaná a vybudovaná bola dodatočne. V novovybudovanej dieselgenerátorovej stanici boli zo začiatku inštalované dva československé dieselgenerátory s výkonom po 608 kVA, 500 kW pri 600 ot/min a dva sovietske s výkonom po 625 kVA, 500 kW pri 1 500 ot/min. Dieselgenerátory vyrobené v Československu napájali sieť zaisteného napájania spotrebičov 2. kategórie a spotrebiče potrebné pre dochladzovanie reaktora. Tieto generátory a ich systémy boli celkom nezávislé.

Sovietske dieselgenerátory s rýchlym štartom boli v horúcej rezerve. Čas od štartu do okamihu prevzatia záťaže bol dvanásť sekúnd.

V I. etape energetického spúšťania bolo veľa rôznych skúšok na overenie správania sa systému elektrického napájania. Najväčšími problémami boli pokles napätia pri spúšťaní synchrónneho motora turbokom-

presora z linky 110 kV a spúšťanie synchrónneho motora turbokompresora z Maduníc. V sieti vlastnej spotreby 6 kV kleslo napätie na 79,2 % nominálneho napätia pri zapojení všetkých dostupných zdrojov do siete 110 kV. Synchrónny motor turbokompresora sa dal spustiť z Maduníc iba vtedy, keď boli zablokované nadprúdové a dištančné ochrany.

Kritická situácia, ktorá sa týkala kapacity batérie 220 V, sa zlepšila zmenou režimu havarijných olejových čerpadiel turbokompresorov, ktoré boli najväčšími jednosmernými spotrebičmi.

Po rekonštrukcii mazacích olejových okruhov boli inštalované spádové nádrže, ktoré zabezpečovali mazanie bez pohonov prvých štyridsaťdva sekúnd od výpadku vlastnej spotreby. Jednosmerné čerpadlá nabiehali až potom a postupne.

Napokon v čase do 20 min od začiatku havarijného dochladzovania boli staničné akumulátorové batérie 220 V= odľahčované tak, že rozvádzače zaisteného napájania R 0,4 - 30.3 a 30.4 boli operátorom synchrónne pripojované na dieselgenerátory.

Takto špecificky zabezpečené vonkajšie napájanie z vonkajších a novovybudovaných miestnych zdrojov pri uvádzaní elektrárne do prevádzky bolo výsledkom mnohých návrhov československých a sovietskych odborníkov a overovacích skúšok vykonaných pred uvádzaním elektrárne o prevádzky.

Pri skúškach v tejto etape energetického spúšťania sa potvrdilo, že jeden československý a jeden sovietsky dieselgenerátor umožňujú spoľahlivo spustiť pomocné motory turbokompresorov č. 3 a č. 4 z pokojového stavu a tiež postupne rozbehnúť všetky asynchrónne motory 0,4 kV, 50 Hz ktoré boli potrebné v režime superhavarijného dochladzovania.

III. etapa energetického spúšťania bola už plánovaná s prevádzkou všetkých šiestich cirkulačných slučiek a preto sa musela zásadne zmeniť elektrická schéma. Boli zrušené všetky provizóriá II. etapy energetického spúšťania a pripravilo sa konečné riešenie dochladzovania. Preto bola elektráreň odstavená od marca do polovice novembra 1975. Konečné riešenie dochladzovania umožnilo dať do normálnej prevádzky aj druhý blok.

Okrem zmien elektrickej schémy sa odstávka využila aj na generálne a bežné opravy technologického zariadenia a bola vypracovaná a zmenená prevádzková dokumentácia pre nové podmienky.

Konečné riešenie elektrickej časti s novými funkciami havarijného a superhavarijného dochladzovania reaktora

V krátkej dobe po spustení – už 30. apríla 1973 – bol predložený návrh konečnej koncepcie dochladzovania pod názvom „ Zvýšenie spoľahlivosti dochladzovania reaktora KS150 elektrárne A1 – konečné riešenie“ na zmeny a úpravy elektrickej časti. Návrh vychádzal z dočasného riešenia dochladzovania, použitého a osvedčeného v I. a II. etape energetického spúšťania a z poznatkov získaných v týchto etapách. Všetky úpravy skončili v novembri 1975.

Základnom koncepcie bola úloha vytvoriť spoľahlivé zdroje „Prerušovanej striedavej elektrickej energie pre napájanie spotrebičov 2. kategórie“, potrebných na dochladenie reaktora pri všetkých jeho havarijných režimoch, nezávislých na základnom energetickom systéme (pracovnej a rezervnej sieti).

Pre tento účel boli navrhnuté tri vzájomne protipožiarne oddelené systémy superhavarijného dochladzovania R 0,4 - SH1 / 2,3 /. Ich havarijnými zdrojmi boli štyri nové dieselgenerátory sovietskej výroby. Dostatočné a spoľahlivé dochladenie reaktora v havarijných režimoch mali zabezpečiť asynchrónne „pony-motory“ 0,4 kV, 50 Hz, 600 ot./min. namontované na hriadele všetkých šiestich turbokompresorov.

Na zvýšenie spoľahlivosti konečného riešenia mali prispieť i navrhnuté zmeny v hydrocentrále Madunice. Spoľahlivosť navrhnutého systému dochladzovania zabezpečovala nová automatika, pracujúca na diódovo – reléovom princípe systému DIAMO.

Ako zdroj ich ovládacieho napätia 48 V= boli inštalované dve akumulátorové batérie s napätím 48 V= a bol namontovaný nový úsekový rozvádzač zaisteného neprerušovaného napätia 1. kategórie 48 V=, z ktorého boli napájané skrine jednotlivých automatov dochladzovania.

Významným návrhom a realizáciou pre zvýšenie spoľahlivosti funkcií jednotlivých zariadení v režimoch havarijného a superhavarijného dochladzovania bolo inštalovanie dvoch vypínacích cievok so samostatným ovládaním na blokových vypínačoch 220 kV, vypínačoch 6kV transformátorov T18, T19, na odbuzovačoch turbogenerátorov, na vypínačoch 6 kV transformátorov T112, T113, T126, T132, T13, na vypínačoch synchrónnych motorov 5 MW turbokompresorov, na vypínači 6 kV transformátora T20 a na vypínači spojky rezervných prípojníc SAB.

Zmeny v obvodoch automatiky a v silovom napájaní spotrebičov 2. kategórie

Systémy polovodičových automatík mali zabezpečené napájanie striedavou prerušovanou elektrickou energiou z úsekových rozvádzačov a podružných rozvádzačov. Boli vybudované tri vzájomne protipožiarne oddelené systémy káblových trás, ktoré „zasiahli" väčšinu prevádzkových súborov elektrárne. Z pôvodných kábelových kanálov boli vyťahané desiatky kilometrov silových a ovládacích káblov. Boli položené kilometre nových vzájomne fyzicky oddelených káblov, ktoré sa museli položiť takmer vo všetkých chodbách prevádzkových budov elektrárne.

Zmeny káblov v silovej a ovládacej časti zasiahli nielen rozvodne 6 kV a hlavné/úsekové rozvádzače 0,4 kV, 50 Hz ale i vonkajšie rozvodne a blokovú rozvodňu. V súvislosti s novou koncepciou automatiky u väčšiny zariadení boli zmenené algoritmy ich ovládania.

Veľké zmeny sa urobili v automatike nulového vypínania spotrebičov na rozvodniach 6 kV a 0,4 kV a v mnohých spotrebičoch technologických systémov, napríklad parogenerátorov, chladiacich čerpadiel D_2O, v plynovom hospodárstve, vybraných vzduchotechnických systémoch, motor-generátorov, turbín a v elektrickej časti blokovej dozorne.

Do prevádzky bola uvedená nová stanica izotopického čistenia ťažkej vody D_2O a vo veľkom rozsahu sa rekonštruovalo elektrické zariadenie turbokompresorov. Bola postavená nová budova superhavarijného napájania. V tejto novej prístavbe boli na podlaží +16 m inštalované tri nezávislé blokové automaty dochladzovania.

K dvom už prevádzkovaným rozvádzačom R 0,4-SH1 a R 0,4-SH2 bol nainštalovaný tretí, označený R 0,4-SH3. Rozvádzače so svojimi káblami tvorili tri navzájom protipožiarne oddelené napájacie/rozvodné systémy tzv. zaisteného napájania 2. kategórie prerušovanej elektrickej energie. Do nich boli prepojené káble vybraných spotrebičov potrebných na dochladenie reaktora.

Úpravy dieselgenerátorovej stanice

Bola rekonštruovaná a stavebne upravená dieselgenerátorová stanica a rekonštruovalo sa tiež jej palivové a olejové hospodárstvo. Boli demontované všetky dieselgenerátory československej výroby a namiesto nich boli namontované dieselgenerátory sovietske, so zaručeným rýchlym štartom do desiatich sekúnd. Bola inštalovaná nová automatika, poruchová a prevádzková signalizácia, vrátane ochrán.

Tri dieselgenerátory boli vyčlenené ako trvale pracovné, štvrtý ako rezervný, s možnosťou jeho ručného organizovaného pripojenia ako náhrada za ktorýkoľvek z pracovných. Jednotlivé dieselgenerátory štartovali automaticky na povel zo svojho blokového automatu, ktorý bol súčasťou blokového automatu dochladzovania alebo operátorom z panelu v elektrickej časti blokovej dozorne alebo z miesta. Na povel od nadradeného automatu dochladzovania štartovali vždy všetky štyri dieselgenerátory súčasne.

Úpravy v hydroelektrárni Madunice

Na spoľahlivé zabezpečenie rezervného napájania z Maduníc v havarijných režimoch elektrárne sa navrhli a urobili viaceré úpravy, napríklad štartovali dva predvolené hydrogenerátory a pripojil sa ten, na ktorom sa najskôr dosiahlo menovité napätie, prenos signálu na štart hydrogenerátorov bol troma nezávislými cestami (pomocou vysokofrekvenčného spojenia a dvoma zemnými káblami položenými v rôznych trasách), zmenilo sa napájanie vlastnej spotreby jednotlivých hydrogenerátorov a boli vypracované záväzné „Trvalé dispečerské opatrenia“. Hydrogenerátory štartovali na povel vyslaný nadradeným automatom dochladzovania alebo pomocou tlačidla na stole manipulanta v elektrickej časti blokovej rozvodne elektrárne.

Zmenili sa ovládacie obvody motorgenerátorov MG1, MG2, dôsledne boli fyzicky oddelené ich ovládacie a fázovacie obvody.

Zmeny v ovládacích obvodoch motorgenerátorov MG1, MG2

Zmeny boli vyvolané zmenami v silových rozvodoch zaisteného napájania 1. kategórie. Bola zrušená väzba na stav ističov hlavných (úsekových) rozvádzačov R 0,4-30.2 a R 0,4-30.4, boli doplnené väzby na stav ističov v prívodoch rozvádzačov R 0,4 SH1, R 0,4-SH2 a R 0,4-SH3, dôsledne boli oddelené ovládacie a fázovacie obvody jednotlivých motorgenerátorov a fyzicky oddelené samotné motorgenerátory.

Úpravy automatov dochladzovania

Požiadavkou na riešenie funkcií automatov dochladzovania bolo spoľahlivo napájať a ovládať vybrané spotrebiče vlastnej spotreby v havarijných režimoch elektrárne, v súvislosti s konečnou koncepciou havarijného dochladzovania. Napájanie pomocným napätím jednotlivých automatov bolo z dvoch napäťových sústav:

– **Napätím 48 V=** s uzemneným mínusovým pólom pre napájanie obvodov všetkých automatov dvoma káblami po protipožiarne oddelených nezávislých trasách z dvoch polí rozvádzača zaisteného neprerušovaného jednosmerného napájania 1. kategórie. Automatický záskok vykonával vlastný automat.

– **Napätím 220 V, 50 Hz** - pre napájanie pomocných obvodov skríň automatov – chladiacich ventilátorových jednotiek automatu a pracovných zásuviek.

Všetky automaty boli vybavené „oddeľovacími obvodmi“, ktoré umožňovali pripojiť k automatom externé prístroje na snímanie všetkých vstupných signálov záznamovým zapisovacím zariadením alebo počítačom.

Blokové automaty dochladzovania

Blokové automaty dochladzovania boli inštalované v budove „SH“ objektu 32, na podlaží +16 m. Okrem blokových automatov bola na chodbe tohoto podlažia inštalovaná i skriňa automatu rezervného dieselgenerátora č. 4. Každý z troch samostatných požiarne oddelených automatov mal tieto skrine:

1. Skrine automatov, v ktorej bol automat hlavného rozvádzača superhavarijného dochladzovania označený podľa blokov ASH1, ASH2, ASH3, automat dieselgenerátorov označený ADA1, ADA2, ADA3 a automat odpojenia blokových vypínačov 220 kV.

2. Skrine prevodníkov, v ktorých boli inštalované vstupné a výstupné prevodníky. Prevodníky boli potrebné preto, lebo úroveň ovládacieho napätia diódovo – reléovej automatiky (48 V=) bola odlišná od úrovne napätia ovládacích obvodov jednotlivých zariadení elektrárne 220 V=. Skriňa obsahovala i zariadenia na kontrolu prerušenia spojovacej cesty. Skriňa bola napájaná zo svojej skrine automatického záskoku napätia 220 V=.

3. Skrine automatického záskoku napätia 220 V=. Skrine boli napájané dvomi samostatnými, protipožiarne oddelenými prívodmi z dvoch polí úsekového jednosmerného rozvádzača zaisteného napätia 1. kategórie. V skrini bola umiestnená i automatika záskoku rezervného prívodu napätia 220 V= a signalizácia prevádzkového stavu jednotlivých prívodov.

Automat úsekového rozvádzača superhavarijného dochladzovania zabezpečoval prostredníctvom automatu dieselgenerátorov štart pracovných a rezervných dieselgenerátorov a ich pripojenie na príslušný rozvádzač 0,4 kV. Štartoval automaticky na povel od nadradených automatov dochladzovania, automatu odpojenia blokových vypínačov, pri stratách napätia na oboch hlavných sekciách rozvádzačov R 0,4-SH, od výpadkov ističov oboch prívodov a na „ručný“ povel z elektrickej časti blokovej dozorne.

Automat štartu dieselgenerátorov zabezpečoval štart dieselgenerátorov a kontroloval ich pripravenosť na prevzatie záťaže príslušných rozvádzačov 0,4 kV. Štartoval na povel od nadradených automatov dochladzovania ADI, ADII, od automatov superhavarijného dochladzovania, automatu odpojenia príslušného blokového vypínača 220 kV v jednotlivých havarijných režimoch elektrárne, alebo ručne – paketovým prepínačom v poli č. 1A / 2A elektrickej dozorne.

Automat odpojení blokových vypínačov 220 kV bol uvedený do činnosti vtedy, keď bol vypnutý blokový spínač 220 kV a súčasne sa zatvorili rýchlozávery príslušnej turbíny. Automat dal povel na štart pracovných dieselgenerátorov a rezervného dieselgenerátora a ich pripojenie na príslušný rozvádzač R 0,4-SH prostredníctvom automatu superhavarijného dochladzovania, odpojil (blokovým vypínačom) a odbudil svoj vlastný turbogenerátor, odpojil synchrónny motor turbokompresora vlastného elektrického bloku, vypol pracovné prívody rozvodní 6 kV vlastného elektrického bloku, podal napätie z rezervných transformátorov T18 a T19. Rezervné prívody rozvodní 6 kV zapla automatika zapnutia rezervy.

Nadradený automat dochladzovania

Na dosiahnutie vyššej spoľahlivosti boli namontované od seba nezávislé, rovnocenné nadradené automaty dochladzovania, ktoré sa nachádzali v dvoch rôznych miestnostiach na podlaží +21m. Automat označený AD-I bol umiestnený v miestnosti č. 62 a druhý automat označený AD-II v miestnosti č. 171. Všetky vstupy z akčných členov a väčšina výstupov z automatov boli vzájomne od seba galvanicky oddelené.

Káble automatov boli uložené v uzavretých káblových žľaboch vyložených azbestom a dupronitom.

Úlohou nadradených automatov bolo napájať havarijné zdroje pre spotrebiče 2. kategórie, vo všetkých havarijných režimoch elektrárne.

Nadradené automaty mali prioritné funkcie a boli im podriadené jednotlivé blokové automaty dochladzovania a automaty turbokompresorov. Automaty štartovali od odvodeného impulzu „Pád havarijných tyčí - prerušenie havarijného reťazca.“

Nadradený automat rozlišoval tri havarijné režimy reaktora:

1. režim normálneho dochladzovania,
2. režim havarijného dochladzovania,
3. režim superhavarijného dochladzovania.

Režim normálneho dochladzovania

Do režimu normálneho dochladzovania prechádzala elektráreň vtedy, keď príčinou pádu havarijných tyčí bolo pôsobenie technologických ochrán reaktora a napájanie vlastnej spotreby zostalo kryté zo základného zdroja napájania, siete 220 kV. V tomto režime automaty vyslali impulzy na štart havarijných zdrojov napájania – t.j štart dvoch hydrogenerátorov v Maduniciach a na štart všetkých štyroch dieselgenerátorov, na zatvorenie rychlozáverných ventilov turbín, na zablokovanie spätných watových ochrán turbín na dvadsaťdeväť minút a na vypnutie predvolených synchrónnych motorov 5 MW turbokompresorov.

V režime normálneho dochladzovania počet vypnutých synchrónnych motorov turbokompresorov závisel od výkonu reaktora a výstupnej teplote plynu CO_2. Predvoľbu robil operátor pomocou paketových prepínačov inštalovaných na manipulačnom pulte technologickej časti blokovej dozorne, ktorými bolo možné predvoliť, koľko turbokompresorov poháňaných synchrónnymi motormi zostane nevypnutých. Tie sa po definovanom poklese chladiaceho plynu a výkonu reaktora operátorom dali odstaviť dodatočne.

Režim havarijného dochladzovania

Režim havarijného dochladzovania reaktora bol definovaný pádom havarijných tyčí od zapôsobenia signálu „Havarijná ochrana od rozpadu siete 220 kV“ a nezregulovaním turbogenerátorov na vlastnú spotrebu.

V tomto režime okrem iného štartovali havarijné zdroje napájania – t.j. dva hydrogenerátory v Maduniciach a všetky štyri dieselgenerátory a boli vypnuté predvolené synchrónne motory 5 MW turbokompresorov. Synchrónne motory turbokompresorov a čerpadiel SLS6 boli vypnuté

podľa predvoľby, ktorá závisela od výkonu reaktora a na výstupnej teplote plynu z reaktora.

V tomto režime automaty AD-I a AD-II naštartovali blokové automaty superhavarijného dochladzovania č. 1, č. 2 a č. 3, dali povel na štart dvoch hydrogenerátorov v Maduniciach a štart všetkých štyroch dieselgenerátorov, na zatvorenie rychlozáverných systémov turbín, na okamžité vypnutie synchrónnych motorov 5 MW turbokompresorov, na obmedzenie – zníženie vlastnej spotreby na rozvodniach 6 kV a 0,4 kV vypnutím ich napájacích transformátorov jednotlivých hlavných (úsekových) rozvádzačov 0,4 kV, 50 Hz, na vypnutie vývodového vypínača na vedení 220 kV (linky 073) na, vypnutie transformátorov T18 a T19 rezervného napájania a na zablokovanie ich záskokov, na zapnutie vypínača spojky „H“ rozvodne S 20 a zapnutie vypínača spojky rezervných prípojníc, na ukončenie využívania dobehu turbogenerátorov (elektrickej energie generovanej dobehom sústrojov) ich odbudením a vypnutím blokových vypínačov 220 kV.

Automat rozlišoval rôzne časové intervaly využívania dobehu turbogenerátorov v závislosti od režimov „pred prifázovaním“ a „po prifázování“ generátorov. Využívanie dobehu turbogenerátorov mohlo skončiť postupne na jednotlivých elektrických blokoch alebo na oboch v jednom a tom istom reálnom čase.

Režim superhavarijného dochladzovania

Režim bol spustený vtedy, keď pád havarijných tyčí reaktora spôsobila havarijná ochrana od rozpadu siete a na rozvodne rezervného napájania 6 kV nebolo podané napätie z hydrogenerátora Madunice pre napájanie minimalizovanej vlastnej spotreby. V tomto režime nadradené automaty urobili všetky funkcie ako v režime havarijného dochladzovania a naviac znížili spotrebu technologickej chladiacej vody uzatvorením príslušných novoinštalovaných armatúr a zatvorili strednotlakové a nízkotlakové uzatváracie armatúry na odluhoch parogenerátorov.

Podľa konečného riešenia havarijného a superhavarijného dochladzovania reaktora pri všetkých havarijných režimoch štartovali vždy všetky štyri dieselgenerátory a napájali všetky spotrebiče vyžadujúce prerušovanú striedavú elektrickú energiu 0,4 kV. Zabezpečené napájanie 2. kategórie bolo z rozvádzačov R 0,4-SH a k nim pripojeným príslušných rozvádzačov MRh.

Pri normálnom dochladzovaní dieselgenerátory štartovali, ale vlastná spotreba zostala napájaná zo siete 220 kV. V režimoch havarijného a superhavarijného dochladzovania sa vždy stratilo napätie na 6 kV a 0,4 kV (okrem systémov 1. kategórie neprerušovanej striedavej a jednosmernej elektrickej energie). To znamenalo, že na krátku dobu boli i rozvodne R0,4-SH bez napätia. Dieselgenerátory dosahovali menovité parametre do ôsmich až desiatich sekúnd.

Po dosiahnutí nominálnych parametrov dieselgenerátorov bola prevzatá potrebná vlastná spotreba jednorázovým dynamickým režimom.

„Pony-motory" štartovali pri každom vypnutí synchrónnych motorov turbokompresorov. Turbokompresory boli „pony-motormi" vždy „podchycované" na 600 ot/min s výnimkou prípadov, keď jeden, alebo viaceré turbokompresory boli vypnuté technologickými ochranami.

„Pony-motory" (inštalované pevne na spoločnom hriadeli so synchrónnymi motormi turbokompresorov) sa dali rozbehnúť z pokoja. Rozbeh turbokompresorov mohol byť jednostupňový alebo dvojstupňový. Záviselo to od predvoľby operátora.

Úpravy na turbokompresoroch

Na všetkých turbokompresoroch boli demontované budiče synchrónnych motorov a na ich miesta boli inštalované „pony-motory", ktoré boli napájané z rozvádzačov zaisteného napájania 2. kategórie - prerušovaného napätia 0,4 kV, 50 Hz. Prietok plynu cez aktívnu zónu po páde havarijných tyčí sa znížil prechodom všetkých turbokompresorov z 3 000 ot/min na 600 ot/min. Budiace sústroje boli uložené na nový samostatný rám. Pohonom budičov boli nové asynchrónne motory 0,4 kV s výkonom 200 kW, 3 000 ot/min.

Ďalšie zmeny boli v napájaní olejových čerpadiel, príslušných armatúr a iných pomocných zariadení. Napájanie pomocných zariadení turbokompresorov bolo rozdelené do troch protipožiarne oddelených systémov zaisteného napájania 2. kategórie - 0,4 kV, 50 Hz. Bola demontovaná celá automatika turbokompresorov, vrátane pomocných rozvádzačov a miestnych panelov. Rekonštruované boli rozvádzače jednosmerného napätia.

Pôvodná reléová automatika bola nespoľahlivá a bolo nad jej možnosti splniť požiadavky, ktoré boli definované v novej koncepcie dochladzovania. Preto boli vypracované nové algoritmy ovládania turbokompresorov, ktoré boli podkladom na vypracovanie nového projektu automatického ovládania v systéme „DIAMO". Skrine automatov

jednotlivých turbokompresorov boli nainštalované na podlaží – 5,5 m v objekte 32. Každý automat sa skladal z dvoch skríň: skrine vlastného automatu a skrine koncových jednotiek.

Automat bol krokový a pracoval na diódovo – reléovom princípe. Algoritmus automatiky umožňoval, aby všetky pohony a armatúry bolo možné ovládať automaticky, diaľkovo z miestneho panela turbokompresorov, alebo pomocou deblokačnej skrine z miesta.

Úpravy na automatoch

Funkčné skúšky automatov po ukončení ich montáže boli úspešné. Automaty plnili všetky projektom algoritmami požadované funkcie pre jednotlivé havarijné režimy elektrárne. Problémy začali pri príprave komplexných skúšok celého zariadenia v simulovaných havarijných režimoch, kedy sa zistil napríklad nežiadúci štart dieselgenerátorov s obmedzením vlastnej spotreby, nežiadúce vypnutie niektorých vypínačov, bezdôvodný nábeh niektorých automatov a iné. Pri viacnásobnej opakovanej kontrole ich vnútorných zapojení i vonkajších obvodov však nebola zistená žiadna závada.

V tejto situácii pomohli pracovníci EGÚ Tanvald, ktorí mali skúsenosti s vysokofrekvenčnými prechodovými javmi v elektrických zariadeniach. Pomocou špeciálne upravených fotografických kamier s veľmi citlivou a rýchlou uzávierkou a pomocou osciloskopov zistili, že pri prechodových spínacích a vypínacích procesoch vzniká indukované vysokofrekvenčné napätie rádovo mV s dobou trvania viac ako 50 ms. Ak amplitúda týchto napätí bola väčšia ako 250 mV a doba ich trvania dlhšia ako 50 ms, nabiehali prevodníky priradené k ovládaciemu obvodu príslušných spínačov a ten aktivoval niektorý z automatov.

Problém bol odstránený znížením citlivosti všetkých prevodníkov odporom paralelne pripojeným k ich cievkam. Po tejto úprave pracovali automaty spoľahlivo a žiadne ďalšie nežiadúce funkcie zariadení nenastali.

Prevádzka

Využitím viacerých rôznych trvale prevádzkovaných zdrojov sa dosiahlo, že dochladzovanie reaktora bolo zabezpečené i pri výpadku niektorého zdroja s tým, že boli minimalizované dynamické prechodové režimy. Počas prevádzky sa vyskytli ďalej uvedené hlavné nedostatky a poruchy.

V II. etape energetického spúšťania boli najčastejšou príčinou odstavenia elektrárne poruchy v systéme elektrického zariadenia a ochrán – štyri poruchy zariadenia v elektrárni A1 a tri v sieti vonkajšieho napájania.

Vážna porucha vznikla dňa 2.10. 1973. Po skrate vo vedení 220 kV Križovany – Sokolnice zlyhal hydrogenerátor G2 v Maduniciach v režime autonómnej prevádzky s turbokompresorom č. 2 pre chybnú reguláciu otáčok. Pritom sa zmenil aj prietok plynu cez reaktor.

Akumulátorové batérie 60V sa ukázali ako nevhodné pre zabezpečenie napájania svojich spotrebičov v režime superhavarijného dochladzovania.

Po uplynutí 25 – 30 minút od začiatku tohto režimu na nich prudko pokleslo napätie a dosiahlo nežiadúco nízku úroveň – nespĺňajúcu minimálnu dovolenú hodnotu napätia pre funkcie prvkov schémy riadenia a signalizácie. Jedným z dôvodov veľkého poklesu napätia bolo to, že akumulátorové batérie 60 V boli na konci svojej technickej životnosti (do prevádzky boli uvedené v roku 1965).

Pri skúškach dieselgenerátorových systémov, zdrojov hydroelektrárne Madunice, inverzných motorgenerátorov i celého systému napájania vlastnej spotreby A1 v rôznych prevádzkových režimoch sa potvrdilo, že použité riešenie na zabezpečenie spoľahlivosti dochladzovania reaktora v I. etape energetického spúšťania bolo správne.

Výsledky skúšok sa použili na zmeny a doplnenie príslušných prevádzkových predpisov a inštrukcií.

Motorgenerátory boli nie vždy dostatočne spoľahlivé, hoci systém zaisteného napájania 1. kategórie ako celok pracoval uspokojivo. Problémy spôsobovalo zlyhanie ich regulátorov, ktoré boli prevádzkované v extrémnych podmienkach spôsobených nesprávne volenými parametrami strojov, čo sa prejavovalo hlavne v inverzných prechodových režimoch. Bolo treba sústavne ich opravovať a nastavovať.

Zlý stav vedenia 110 kV – znížená izolačná pevnosť – v blízkosti elektrárne spôsobila niekoľko odstavení reaktora ochranou od počtu pracujúcich turbokompresorov.

Nedostatky elektrických zariadení, ktoré vznikli a boli odstránené počas výstavby a prevádzky

Okrem nových koncepčných riešení normálneho a superhavarijného dochladzovania boli odstránené tieto chyby:

- Oneskorenie pôsobenia rozdielových ochrán generátorov v súvislosti s využívaním ich dobehu.

V snahe čo najlepšie zabezpečiť veľmi dôležitú funkciu využívania kinetickej energie dobiehajúcich generátorov prevádzkovateľ oneskoril pôsobenia ich rozdielových ochrán až o 0,4 sekundy. Týmto opatrením sa však na druhej strane zväčšil čas deštrukčného pôsobenia prípadnej poruchy.

- Sekundárne elektromechanické ochrany v dvoch funkčne naväzujúcich staniciach elektrárne A1 a hydroelektrárne Madunice.

Technicky náročné boli primárne skúšky porovnávacích ochrán S 103 (výrobca ZPA Trutnov), ktoré chránili 110 kV vedenie HC Madunice – A1. Ochrany inštalované v týchto staniciach boli prepojené káblom opatreným i kovovým plášťom. Primárne skúšky sa robili s inštalovanými presnými laboratórnymi prístrojmi i v prúdových obvodoch podľa programu obsahujúceho detailne popisy všetkých činností.

Bolo potrebné vykonať doplňujúce výpočty maximálnych skratových pomerov a veľmi komplikovaným technickým riešením bolo nutné zabezpečiť galvanické oddelenie – izoláciu proti "prenášaniu" nebezpečných napätí na prístroje v A1 a v HC Madunice, vznikajúcich na ich uzemňovacích sústavách pri skratoch. Pozn.: Sekundárne elektromechanické ochrany preukázali počas prevádzky a v poruchových stavoch požadované funkcie a spoľahlivosť.

- Regulátory napätia výrobných generátorov.

Regulátory napätia typu MRNG boli veľmi poruchové, často zlyhala ich funkcia. Bolo potrebné priamo počas prevádzky hľadať vhodnú úpravu výzbroje elektronických jednotiek s cieľom zjednodušiť ich funkcie a dosiahnuť spoľahlivosť. Tieto regulátory boli inštalované blízko generátorov a tým funkcia ich elektromechanických prvkov bola vystavená vplyvu silného chvenia. Pre eliminovanie chvenia boli skrine s týmito regulátormi namontované na gumové tlmiace bloky. Toto opatrenie sa ukázalo počas prevádzky ako veľmi prospešné.

- Rekonštrukcia všetkých koncoviek 6 kV-ových káblov nielen v A1, ale i vo V1, (na ktorej v tej dobe už bola ukončená montáž týchto koncoviek).

Úprava všetkých 6 kV-ových koncoviek bola nutná preto, lebo koncovky neboli správne urobené podľa platných montážnych predpisov pre daný typ káblov. Nesprávne zhotovenie spôsobovalo elektrické výboje

medzi fázami za koncovkami. Tento nebezpečný stav bol zistený počas prevádzky A1. Pracovníci Výskumného ústavu káblov a izolantov v Bratislave po konzultácii vysvetlili príčinu a poskytli montážny predpis, ktorý obsahoval exaktnú – detailnú schému s rozmermi ako majú byť koncovky vyhotovené.

- Priame spúšte ističov 0,4 kV, 50 Hz.

Pri individuálnych skúškach boli u ističov rôznych typov a prúdových dimenzií (československých a sovietskych výrobcov) vybavených priamymi spúšťami zistené nedostatočné a nespoľahlivé funkcie. Niektoré ističe mali nedostatočné reakčné rýchlosti spustenia a časov vypínania. V niektorých prípadoch došlo k úplnému zlyhávaniu chrániacich funkcií – nepôsobili priame spúšte. Z tohto dôvodu napríklad úplne vyhorela elektrická výzbroj 0,4 kV, 50 Hz pre napájanie ventilátora v chladiacej veži, pretože nepôsobila priama spúšť ochrany pri poruche motora. Požiar sa nerozšíril na iné zariadenia vďaka skutočnosti, že elektrické výzbroje pre chladiace veže boli inštalované v betónových kobkách.

Neskôr bolo v prevádzkových podmienkach navrhnuté a vybudované skúšobné zariadenie s nastaviteľným generovaným prúdom vysokých hodnôt – ekvivalentným s hodnotami skutočných skratových prúdov. V tomto zariadení bol ako zdroj inštalovaný rotačný indukčný menič. Týmito overeniami bolo veľa typov ističov s primárnymi spúšťami označených ako absolútne nevyhovujúce a museli byť nahradené inými overenými typmi ističov s dostatočnou funkciou.

Skušobné zariadenie sa využívalo na overovanie ističov inštalovaných vo viacerých budovaných jadrových elektrárniach na Slovensku*.

- Ističe typu AMT československej výroby inštalované v rozvode 0,4 kV 50Hz.

Boli prípady, keď zhoreli ističe typu AMT preto, lebo zlyhali pri vypínaní vzniknutých skratov v objektoch prevádzky, ktoré tieto ističe mali chrániť. Dôvodom bola ich nedostatočná skratuvzdornosť – schopnosť vypnúť poruchové prúdy pri daných prevádzkových podmienkach. Použitím výkonových poistiek sa dosiahlo, že pri vysokých hodnotách poruchových prúdov (väčších ako bola skratová schopnosť vypínania ističmi AMT) spoľahlivo a veľmi rýchlo vypli.

---

* Pre novobudované elektrárne VUJE presadzuje koncepciu – aplikovanie chránenia v rozvodoch 0,4 kV , 50 Hz, v rozvodoch výkonovými poistkami, sekundárnymi ochranami a výkonovými poistkami.

Pre všetky tieto ističe boli prevádzkovateľom elektrických ochrán navrhnuté výkonové poistky s výpočtom definovaných hodnôt, ktoré v krátkej dobe museli byť nainštalované v celom rozsahu elektrozariadení elektrárne A1.

Poistky mali inštalované paralelne i tzv. signálne poistky, ktoré pri pôsobení napríklad len v jednej fáze cez mikrospínač zabezpečovali trojfázové vypnutie v jednom a tom istom reálnom čase.

- Nenaštartovanie – nedosiahnutie menovitého napätia dieselgenerátora sovietskej výroby v havarijnom režime.

V prípade, keď bolo treba automaticky naštartovať a zabezpečiť napájania dôležitých spotrebičov, jeden dieselgenerátor nebol nabudený – nedosiahlo sa menovité napätie. I napriek dlhodobej kontrole vo všetkých častiach tohoto dieselgenerátora nebola zistená príčina jeho zlyhania. Nakoniec sa v manuáli dieselgenerátora našla ťažko uveriteľná poznámka, že "niekedy generátor môže nedosiahnuť hodnotu menovitého napätia z dôvodu straty magnetickej remanencie budiča". Preto bolo do budiacich obvodov na každom dieselgenerátore privedené pomocné napätia z miestnych akumulátorových batérii, ktoré zabezpečilo spoľahlivé nabudenie dieselgenerátora pri každom jeho štarte. Toto pomocné napätie bolo automaticky odpojované pri dosiahnutí určitej úrovne nabudenia dieselgenerátora.

Takéto riešenie pre zabezpečenie spoľahlivého nabudenia dieselgenerátorov bolo odporučené pre všetky dieselgenerátory ďalších vybudovaných jadrových elektrární na Slovensku.

- Zmena hodnôt prúdov – dimenzie výkonových poistiek v systémoch neprerušovanej jednosmernej elektrickej energie 1. kategórie zaisteného napájania 220 V=.

Všetky hodnoty výkonových poistiek jednosmerných rozvodov 220 V= boli skontrolované výpočtom prevádzkovateľa. Výsledkom bol návrh a výmena všetkých patrón výkonových poistiek s menšími menovitými hodnotami oproti projektom definovaných poistiek. Nové hodnoty výkonových poistiek zabezpečovali významne citlivejšie a rýchlejšie chránenie so zabezpečením dostatočných koeficientov bezpečnosti vzhľadom na maximálne prevádzkové hodnoty. Bolo to potvrdené i dlhodobou prevádzkou.

- Vybudovanie protipožiarnej steny medzi panelom elektromechanických sekundárnych ochrán.

Vybudovanie protipožiarnej steny si vynútil život – vznikol silný deštrukčný požiar v hlavnom jednosmernom rozvádzači 220 V=. Požiarom deštruovaný rozvádzač bolo potrebné celý nanovo vyzbrojiť.

- Rekonštrukcia – zvýšenia dimenzie uzemňovacej siete rozvodní 220 kV a 110 kV.

Prevádzkovateľ spracoval kvalifikovaný výpočet potrebného dimenzovania vonkajšej mrežovej siete rozvodní 220 kV a 110 kV naväzujúcich na uzemnené uzly vinutia transformátorov na základe definovaných maximálnych skratových prúdov v tejto stanici. Výpočty boli porovnané s hodnotami v projekte, podľa ktorého bola sieť zrealizovaná. Výsledkom porovnania bol skutočný stav klasifikovaný ako nedostatočný. Celá pôvodná uzemňovacia sieť bola ručne odkopaná a doplnená o ďalšie prepojenia pásovinou FeZn.

- Otepľovanie nulového vodiča v nízkonapäťovej časti systému motorgenerátory a transformátory 6 kV/0,4 kV.

Počas prevádzkovania motorgenerátorov v ich systémoch pripojených na transformátory 6/0,4 kV sa zistilo, že nulovým vodičom motorgenerátora tiekol prúd 200 A a tiež uzemňovacou pásovinou FeZn tiekol prúd, ktorý spôsoboval oteplenie zistiteľné dotykom ruky. Po mnohonásobných informovaniach a konzultáciách so špecialistami rôznych československých firiem a inštitúcií (vrátane škôl) bola vytipovaná príčina tohto javu – vznik zložiek vyšších harmonických vo veľkej miere v obvodoch prepojenia nízkonapäťovej strany transformátorov 6/0,4 kV s motorgenerátorom. Overovacími meraniami sa predpoklad potvrdil. Vypočítali sa parametre potrebných filtrov a filtre boli vyrobené na základe špecifickej objednávky. Po nainštalovaní týchto filtrov bol problém natrvalo odstránený.

- Rekonštrukcia – dobudovanie signalizácie elektrických zariadení a elektrických ochrán na blokovej dozorni.

Pred uvedením elektrárne do prevádzky boli sumárne informácie dvojstavovej signalizácie o funkciách elektrozariadení všetkých napäťových úrovní nanovo naprojektované a boli položené ďalšie káble a inštalované doplňujúce informačné panely v blokovej dozorni. Cieľom a výsledkom tejto rekonštrukcie bolo dosiahnuť exaktné informácie o stave elektrických prvkov a pôsobení elektrických ochrán. V konečnej fáze prípravy elektrárne A1 do prevádzky boli niektoré časti elektrických systémov detailne projektované pracovníkmi jednotlivých špecializácií prevádzkovateľa.

17. DOZIMETRIA

Radiačná kontrola v elektrárni

Pre radiačnú kontrolu elektrární boli určené dva stabilné systémy:

1. systém biologickej dozimetrie (pracovného prostredia)
2. systém špeciálnej technologickej dozimetrie.

Systém biologickej dozimetrie

Systém biologickej kontroly slúžil na meranie dozimetrických parametrov dôležitých pre ochranu pred ionizujúcim žiarením. Systém umožňoval merať dávkový príkon gama žiarenia, objemovú aktivitu plynov, objemovú aktivitu aerosólov v pracovnom prostredí a povrchovú kontamináciu zariadení, osôb, obuvi a pracovných odevov. Takmer všetky prístroje systému používali GM – detektory gama a beta s výnimkou merania expozičných príkonov v reaktorovej sále, kde boli použité ionizačné komory.

Na meranie kontaminácie povrchu celého tela a pracovných odevov boli prístroje v hygienických slučkách a ďalšie prístroje pre meranie kontaminácie rúk a drobných predmetov na viacerých miestach v kontrolovanom pásme.

Stabilný systém dopĺňali prenosné prístroje, ktorými sa merali rovnaké parametre ako stabilnými, obvykle však boli citlivejšie.

Prístroje merali dávkové príkony v rozsahu $10^{-4} \div 3.10^{2}$ μSv/s, objemovú aktivitu plynov v rozsahu $18,5 \div 18,5.10^{2}$ Bq/l , objemovú aktivitu aerosólov v rozsahu $3,7.10^{-4} \div 3,7.10^{-1}$ Bq/l a aktivitu jódu vo ventilačnom komíne v rozsahu $2,59.10^{-2} \div 2,48.10^{2}$ Bq/l. Systém umožňoval záznam nameraných hodnôt na zapisovačoch a opticky i akusticky signalizoval prevýšenie nastavených úrovní.

Systém technologickej dozimetrie

Systém technologickej dozimetrie slúžil na kontrolu činnosti vybraných technologických zariadení a na kontrolu tesnosti vybraných technologických zariadení, ktoré tvorili bariéru proti úniku rádioaktívnych látok do pracovného i životného prostredia.

V prvom prípade sa hodnotila účinnosť ventilačných systémov, stanice čistenia CO_2, čistenia kvapalných rádioaktívnych odpadov,

merala sa aktivita plynu pred každým turbokompresorom, aktivita vody v rôznych nádržiach, aktivita vypúšťaných vôd, aktivita plynov, aktivita alfa i beta aerosólov a ^{131}I vo ventilačnom komíne, práca zariadení v objekte spracovania pevných a kvapalných odpadov a v objekte plynového hospodárstva.

Ako detektory sa používali GM trubice priložené na potrubie, ktorým prechádzalo kontrolované médium. Sekundárne prístroje boli 26-kanálové prístroje USIT-1 a USIT-1B s polovodičovými prvkami, vyrobené v ZSSR. Prístroj bol unikátny v tom, že mal mechanický komutátor s tromi sekciami a v každej z nich bolo dvadsaťšesť kontaktov. Jedna sekcia komutátora periodicky prepínala vstupný signál z jednotlivých kanálov na jediný vyhodnocovací obvod, ktorý mal merač početnosti impulzov z detektora. Informácia o nameranej početnosti impulzov prechádzala cez druhú sekciu na porovnanie so zadanou povolenou úrovňou. Ak početnosť bola väčšia ako zadaná hodnota, signál o prekročení prechádzal cez zodpovedajúce kontakty tretej sekcie na signálny panel, prípadne aj na miesto prekročenia.

Na meranie aktivity aerosólov vo vzduchu sa používali rádiometre RA-12S, v ktorých bola pohyblivá filtračná páska na zachytávanie aerosólov. Po určitom čase – rýchlosť posuvu pásky bola voliteľná – sa časť filtračnej pásky so zachytenými aerosólmi kontinuálne posunula pod okienkovú GM trubicu a zmerala sa jej aktivita.

V druhom prípade sa merala tesnosť parogenerátorov, chladičov a ohrievačov tak, že sa trvale odoberali vzorky vody alebo pary z kontrolovaných zariadení. Vzorky prechádzali cez chladiče do meracej komory s objemom 2 l. V nej boli v ochrannom kryte umiestnené GM trubice. Sekundárny prístroj bol tiež USIT – 1. Jeho citlivosť bola $3{,}7.10^2$ Bq/l.

Špeciálnym systémom bol systém na meranie porušenia pokrytia palivových prútikov. Systém je popísaný v osobitnej časti.

Tesnosť parogenerátorov sa kontrolovala tak, že z každého sa odoberali tri vzorky pary a vody. Po ochladení boli zavedené do meracej komory s meracou a kompenzačnou GM trubicou. Vyhodnocovací prístroj – kompenzačný rádiometer A1 s elektrónkami vyrobený v Československu – bol nastavený na meranie aktivity izotopu ^{41}Ar. Ak sa zistila zväčšená aktivita v niektorom parogenerátore, odbery na všetkých parogenerátoroch sa uzatvorili, komory sa premyli čistou vodou a potom sa automaticky pripojili na porušený parogenerátor na presnejšie určenie miesta porušenia tesnosti. Citlivosť merania bola $3{,}7.10^2$ Bq/l.

Okrem tejto kontroly tesnosti sa kontrolovali aj úniky CO_2 do izolačných krytov parogenerátorov. Z nich sa odoberali vzorky vzduchu do meracej komory s objemom 40 l, v ktorej boli dva GM-detektory pre meranie a dva pre kompenzáciu gama pozadia. Vyhodnocovací prístroj bol dvadsaťšesťkanálový USIT – 1B podobnej konštrukcie ako USIT – 1. Citlivosť bola 3,7 Bq/l.

Stabilný systém dozimetrickej kontroly okrem prístrojov mal aj systém odberu vzoriek vzduchu. Tvorili ho dúchadlá, odberové trasy, držiaky aerosólových filtrov, prietokomery a uzatváracie armatúry na odberových trasách. Aktivita vzduchu sa merala v niektorých miestach nepretržite, v iných periodicky s tým, že pre meranie sa využívala rovnaká meracia komora. Aktivita aerosólov v menej dôležitých priestoroch sa nemerala kontinuálne prístrojom RA – 12S, ale merala sa aktivita filtrov z odberových trás v laboratóriách.

Sekundárne prístroje dozimetrickej kontroly boli v dozorni dozimetrickej kontroly a na dozorniach plynového hospodárstva a čistiacej stanice rádioaktívnych vôd.

Počet a druhy dozimetrickej kontroly			
Druh kontroly	Počet kontrolovaných miest		
	Dozimetrická kontrola prostredia		Špeciálna technologická kontrola
	nepretržitá	periodická	
Objemová aktivita plynov	59	262	18
Objemová aktivita aerosólov	30	410	148
Expozičná rýchlosť gama	123	-	51
Objemová aktivita ^3H	-	15	-
Aktivita pary a chladiacej vody	-	-	30
Obsah CO_2 vo vzduchu	30	-	-

Na monitorovanie radiačnej situácie počas spúšťania boli vypracované samostatné programy. Počas fyzikálneho spúšťania dozimetrické systémy a prístroje boli v prevádzke iba v objektoch reaktorovne a v medzistrojovni, aj to v obmedzenom rozsahu. Podľa programu monitorovania sa meral dávkový príkonu gama žiarenia v 78-ich bodoch, objemová aktivita plynov v 174-och bodoch a objemová aktivita aerosólov vo vzduchu v troch bodoch. Monitorované boli predovšetkým priestory susediace s reaktorom, ťažkovodným okruhom a s dielňou montáže palivových článkov. V reaktorovej sále a šachte reaktora sa meral tiež tok

neutrónov prenosnými prístrojmi. Pravidelne sa monitorovala povrchová kontaminácia.

V prevádzke boli aj prístroje na meranie aktivity výpustí ventilačným komínom. Do dozimetrického monitorovania bolo zahrnuté aj meranie obsahu CO_2 v prevádzkových priestoroch.

Radiačná kontrola počas spúšťania

Program monitorovania radiačnej situácie počas spúšťania mal dve časti:

- monitorovanie aktivity zdrojov žiarenia,
- monitorovanie pracovného a životného prostredia, vrátane plynných výpustí ventilačným komínom a kvapalných výpustí cez odpadový kanál.

Radiačná kontrola počas fyzikálneho spúšťania

Počas fyzikálneho spúšťania boli zmeny úrovne žiarenia činnosťou reaktora oproti hodnotám pozadia zanedbateľné. V reaktorovej sále sa však dávkový príkon podstatne zvýšil pri vyťahovaní ožiarených kaziet z reaktora v rámci testov fyzikálneho spúšťania. Pre experimentálne účely sa používali dva druhy kaziet:

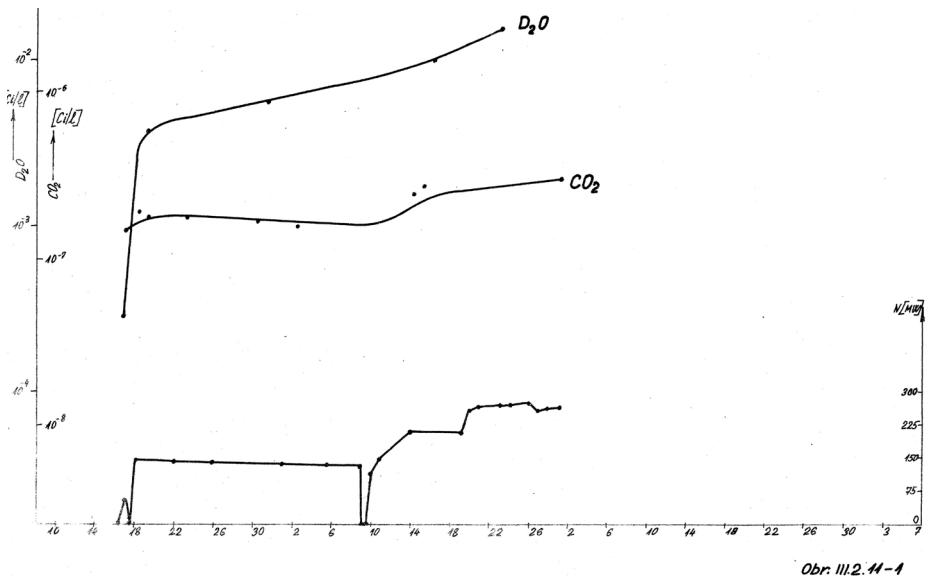
- skrátená experimentálna kazeta so vzorkami paliva a s detektormi z Dy, U a Lu umiestnenými v kazete,
- štandardné kazety, na povrchu ktorých boli nalepené rôzne fólie, napríklad z dysprózia.

Skrátená kazeta sa používala na určenie počiatočného plutóniového koeficientu. Kazety boli ožarované v aktívnej zóne reaktora obvykle pri neutrónových tokoch okolo 10^9 n/cm^2.s^{-1}.

Štandardné kazety sa používali na určenie rozloženia neutrónového toku pozdĺž výšky a polomeru aktívnej zóny. Kazety boli ožarované pri neutrónových tokoch okolo 10^5 n/cm^2.s^{-1} a preto aj dávkové príkony v ich blízkosti boli menšie.

Dávkový príkon na povrchu ožiarených kaziet bol až 120 mSv/h a za tieniacou stenou 1,5 mSv/h, ale vo väčšine prípadov to bolo menej ako 0,35 mSv/h. Dávkový príkon od ožiarených vzoriek a fólií nebol väčší ako 0,17 mSv/h. Aktivita chladiaceho plynu a ťažkej vody sa postupne zväčšovali.

Merateľné dávky dostalo tridsaťosem pracovníkov a ich kolektívna efektívna dávka za obdobie fyzikálneho spúšťania bola 6,49 manmSv. Významnejšie boli dávky na ruky spôsobené prácou s ožiarenými materiálmi pri fyzikálnych testoch. Kolektívna dávka na ruky bola 32,96 manmSv a podieľalo sa na nej dvadsať osôb. Najväčšia dávka na ruky bola 8,16 mSv. V tom čase bola povolená dávka na ruky 15 mSv/týždeň.



Histogram aktivity CO_2 a D_2O v I. etape energetického spúšťania (december 1972 – január 1973)

Radiačná kontrola počas energetického spúšťania

V rámci monitorovania zdrojov žiarenia sa merala aktivita a izotopické zloženie CO_2 v primárnom okruhu a aktivita D_2O. Aktivita a izotopické zloženie sa merali vo vzorkách odobratých pri všetkých výkonových stupňoch. Ak boli aktivity malé, robila sa aj rádiochemická analýza.

Aktivita CO_2 v I. a II. etape energetického spúšťania pri výkone 120 ÷ 280 MW_{tep}		
Izotop	**Aktivita [Bq/l] I.etapa**	**Aktivita [Bq/l] II.etapa**
^{41}Ar	$(1,04 \div 1,29).10^4$	$(0,81 \div 2,03).10^4$
^{87}Kr	$(0,67 \div 1,74).10^2$	$(0,26 \div 1,48).10^3$
^{133}Xe	$(0,26 \div 1,41).10^3$	$(1,8 \div 5,9).10^3$
^{135}Xe	$(2,15 \div 2,6).10^2$	$(0,13 \div 0,74).10^3$

Okrem uvedených izotopov sa zistili stopové množstvá ^{51}Cr, ^{59}Fe, ^{60}Co a ^{56}Mn.

Aktivita D_2O v I. a II. etape energetického spúšťania pri výkone 120 ÷ 280 MW_{tep}		
Izotop	**Aktivita [Bq/l] I.etapa**	**Aktivita [Bq/l] II.etapa**
^{24}Na	$(1,5 \div 4,1).10^4$	
^{28}Al	$(0,74 \div 3,7).10^9$	
^{51}Cr	$(0,44 \div 3,66).10^6$	do $7,4.10^8$
^{54}Mn	$(0,56 \div 2,1).10^4$	
^{56}Mn	$(1,22 \div 2,7).10^8$	$(1,1 \div 2,3).10^9$
^{59}Fe	$(0,74 \div 8,9).10^5$	
^{60}Co	$(0,15 \div 1,1).10^5$	do $3,7.10^8$
^{65}Zn	$(0,96 \div 2,29).10^4$	
Sumárna beta *)	$(0,92 \div 1,8).10^8$	

**) Sumárna beta aktivita suchého zvyšku D_2O dve hodiny po odbere vzorky*

Dávkový príkon v obslužných priestoroch nebol väčší ako 0,15 μSv/h. Z ostatných priestorov bol najväčší dávkový príkon v blízkosti systémov ťažkovodného okruhu a dosahoval hodnotu 0,02 Sv/h. Počas II. etapy sa dávkový príkon zvýšil na 2 μSv/h v priestoroch bezprostredne susediacich s miestnosťami systémov D_2O a CO_2. Dávkový príkon na povrchu systémov chladenia D_2O bol až 3 Sv/h a na potrubí CO_2 na vstupe do turbokompresorov až do 0,7 mSv/h.

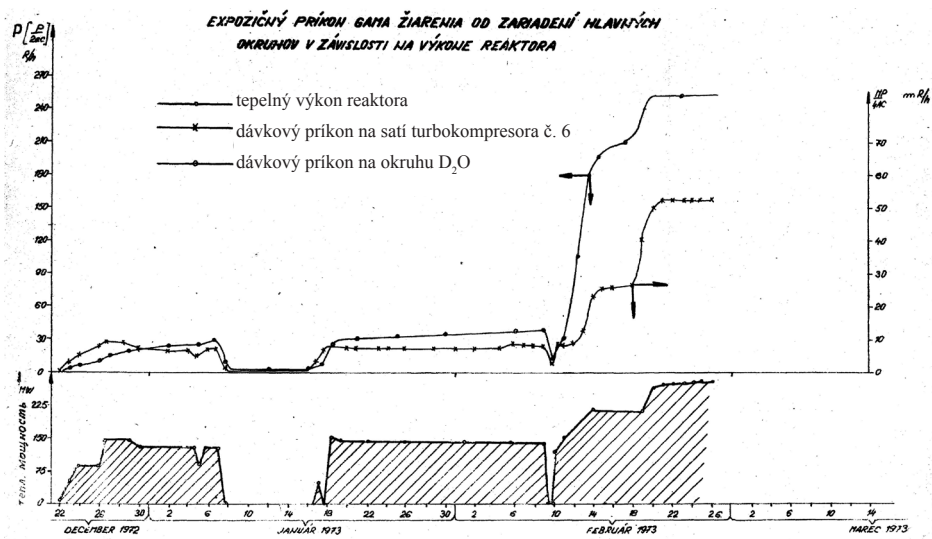
V reaktorovej sále bol dávkový príkon nad vekom reaktora 0,07 μSv/h a po vytiahnutí jedného palivového článku do dochladzovacej zóny 0,2 μSv/h. V II. etape sa dávkový príkon zvýšil na 0,3 μSv/h až 0,7 μSv/h a to preto, lebo v reaktorovej sále sa nachádzali zariadenia demontované z primárneho okruhu a tiež v dôsledku manipulácií so zavážacím strojom.

Výnimočne boli zvýšené objemové aktivity aerosólov, najviac $2,2.10^{-2}$ Bq/l a objemové aktivity plynov, najviac 7,4 Bq/l. Objemové aktivity plynov sa v II. etape príliš nezmenili s výnimkou horúcej komory, kde boli pri prehliadkach vyhorených palivových článkov až $3,7.10^3$ Bq/l. Pri prácach na ťažkovodnom okruhu sa vyskytli prípady kontaminácie vzduchu ^3H a pracovníci museli používať skafandre.

Boli zistené miesta so zvýšeným dávkovým príkonom vplyvom priestrelov cez neúplné alebo nedokonalé tienenie. Najväčšia hodnota bola 0,12 mSv/h pri prechodkách vzduchotechnického systému, v II. etape sa zväčšila na 0,6 mSv/h.

Do dozimetrického monitorovania bolo rovnako ako počas fyzikálneho spúšťania zahrnuté aj meranie obsahu CO_2 v prevádzkových priestoroch. Úniky sa nezistili.

Povrchová kontaminácia sa vyskytovala iba ojedinele a bola odstránená. Počas II. etapy sa vyskytovala častejšie a bola tiež odstránená. Najčastejšie bola kontaminovaná reaktorová sála po manipuláciách so zavážacím strojom až do hodnôt na úrovni 37 Bq/cm^2.



Histogram dávkových príkonov na hlavných technologických zariadeniach v I. etape energetického spúšťania (december 1972 – február 1973)

Výpuste ventilačným komínom boli v I. etape menšie ako minimálne detekovateľné aktivity, nameraná bola iba aktivita krátkodobých beta a aerosólov do 5,5.10^8 Bq/24h. V II. etape sa aktivity výpustí zväčšili.

Aktivita výpustí ventilačným komínom v II. etape energetického spúšťania			
Zložka výpustí	**Výpuste [Bq/24h]**		**Povolené hodnoty [Bq/24h]**
	Priemer	**Maximum**	
Vzácne plyny	5,55.10^{10}	8,51.10^{10}	2,22.10^{13} [1])
Dlhožijúce aerosóly s $T_{1/2}$ > 24h okrem Sr	1,85.10^5	1,85.10^6	3,7.10^9
Krátkožijúce s $T_{1/2}$ < 24h	7,4.10^7	2,15.10^8	neurčené
^{131}I	3,7.10^6	5,92.10^8	1,1.10^9
^{89,90}Sr	-	stopy	1,1.10^7

[1]) Povolená hodnota sa neskôr zmenšila na 3,7.10^{12} Bq/24h.

Zvýšené hodnoty výpustí jódu spôsobili práce v horúcej komore. Ventilačný systém horúcej komory mal len aerosólové filtre, preto sa jód nezachytil.

Funkčnosť a spoľahlivosť dozimetrických systémov

Málo spoľahlivé boli vývevy na systéme odberu vzoriek pre meranie aktivity aerosólov. Preto sa navrhla úprava a odbery sa premanipulovali na dúchadlá systému odberu vzoriek plynu. Tiež výkon chladičov na odbere vzoriek pary a vody z parogenerátorov bol malý a preto sa meracie komory prehrievali. Počas prevádzky sa zistilo, že systémy boli schopné zistiť iba veľké netesnosti. Bolo to potvrdené pri netesnostiach na chladičoch D_2O, na jednom z chladičov na pomocných okruhoch i na parogenerátoroch. I pri pomerne veľkých netesnostiach boli aktivity na úrovni 3,7 ÷ 37 Bq/l, ale citlivosť detektorov bola $3{,}7.10^2$ Bq/l. Preto sa neskôr používalo laboratórne meranie aktivity odobratých a spracovaných vzoriek pary a vody. V niektorých prípadoch bola selektívne meraná aktivita ^3H. Táto metóda bola veľmi citlivá a uprednostňovala sa.

Systém na meranie netesnosti parogenerátorov sa tiež neosvedčil. Automatika prepínania odberov bola nespoľahlivá a rádiometre vyvinuté a vyrobené špeciálne pre A1 sa neosvedčili, preto sa odberový systém upravil tak, aby sa dali odoberať vzorky na meranie aktivity v laboratóriách.

Celkové hodnotenie radiačnej situácie

Pomerne priaznivé hodnoty dávkových príkonov, koncentrácie rádioaktívnych látok vo vzduchu a povrchovej kontaminácie sa postupne zhoršovali v závislosti od toho, ktoré časti technologického zariadenia nefungovali tak, ako sa predpokladalo v projekte.

Zväčšovanie dávkových príkonov takmer vo všetkých miestnostiach s technologickým zariadením spôsobilo predovšetkým porušenie tesnosti pokrytia paliva. Štiepne produkty uvoľnené z paliva postupne kontaminovali vnútorné povrchy všetkých zariadení, ktoré boli v styku s CO_2 a D_2O. Napríklad na konci roku 1976 bol dávkový príkon na satí turbokompresorov pri prevádzke okolo 5 mSv/h, po odstavení okolo 0,2 ÷ 0,3 mSv/h. V miestnosti parogenerátorov bol príkon dávky pri odstavení 0,5 ÷ 0,7 mSv/h, v blízkosti strednotlakého ohrievača až 2,5 mSv/h. Dávkové príkony sa zväčšili najmä po prvej vážnej havárii.

Veľký dávkový príkon bol v dlhodobom sklade vyhoreného paliva potom, ako sa v puzdrách na ukladanie palivových článkov začalo porušovať pokrytie paliva a puzdrá sa stali netesné. Príkon dávky bol až 10 mSv/h a príliš sa nezmenšil ani po čistení vody z bazénu a po zavezení tieniacich zátok do puzdier.

Zavážací stroj mal účinné tienenie a preto príkon dávky na jeho povrchu bol malý. Problémy však spôsobovala kontaminácia povrchov v reaktorovej sále zavážacím strojom. Ten bol kontaminovaný po manipuláciách s vyhoreným palivom na reaktore, v krátkodobom i dlhodobom sklade vyhoreného paliva. Dekontaminácia stroja bola málo účinná a pracovníci, ktorí dekontaminovali, obvykle dostali vysoké dávky.

Aj ožiarenie pracovníkov sa postupne zväčšovalo tak, ako sa zväčšoval príkon dávky v blízkom okolí technologického zariadenia. Najväčší podiel na ožiarení mali opravy parogenerátorov, zavážacích strojov, turbokompresorov, transport vyhoreného paliva a práca v dlhodobom sklade. K ožiareniu významne prispeli práce na odstraňovaní následkov havárie v januári r. 1976. Pri opravách parogenerátorov sa povoľovali dávky až na úrovni najvyšších prípustných štvrťročných dávok (v tom čase 13 mSv).

Aktivitu výpustí rádioaktívnych látok cez ventilačný komín sa darilo udržiavať na úrovni podstatne menšej ako boli povolené hodnoty, s výnimkou obdobia prvej vážnej havárie. Vďaka tomu sa nezistila zväčšená hodnota aktivity v žiadnej zložke životného prostredia v okolí elektrárne. Merateľne väčšia bola iba aktivita sedimentov na dne odpadového kanálu.

18. SYSTÉM KONTROLY TESNOSTI POKRYTIA PALIVOVÝCH ČLÁNKOV

Systém kontroly tesnosti pokrytia (kontroly porušenia pokrytia) bol určený na kontrolu tesnosti pokrytia palivových prútikov v každom technologickom kanáli reaktora a na určenie veľkosti porušenia. Systém mal dve časti – odberový systém a elektronické zariadenie.

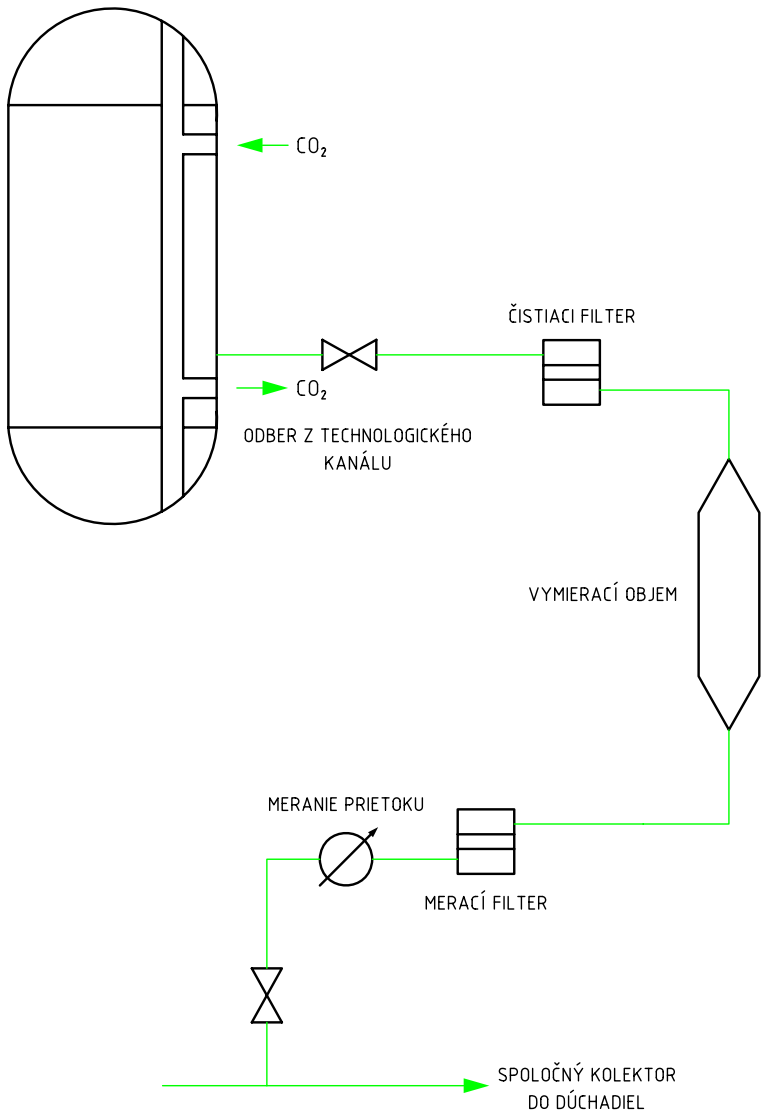
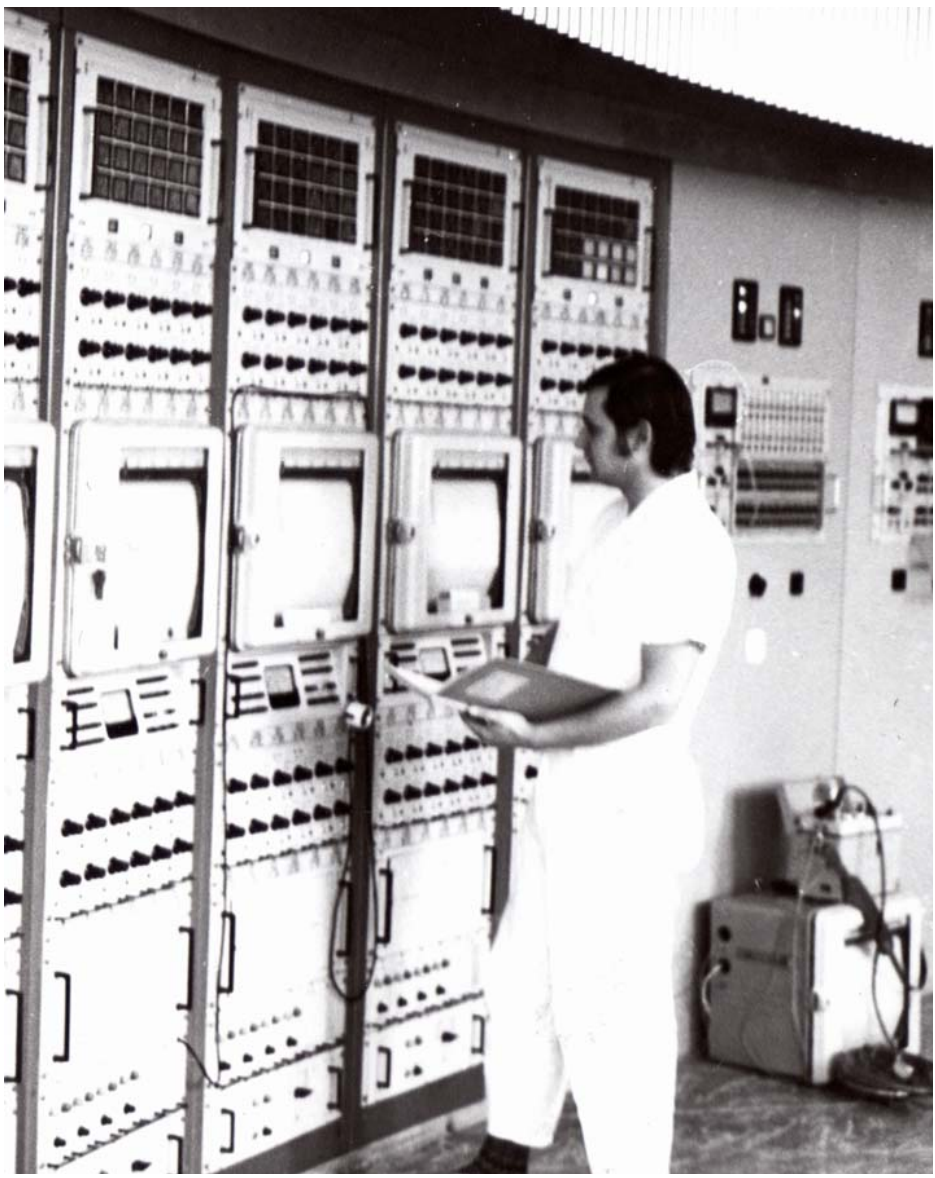


Schéma odberovej línie z jedného technologického kanála

Vzorky chladiaceho CO_2 sa odoberali z každého technologického kanála. Odberový systém tvorili odberové potrubia, regulačné a uzatváracie armatúry, čistiace a meracie filtre, zadržiavacie objemy, diferenciálne manometre na meranie prietoku a regulátor stáleho rozdielu tlaku (Δp) na spoločnom kolektore.

Elektronické zariadenie pre každý z kanálov obsahovalo scintilačné detektory, bloky merania početnosti impulzov, bloky signalizácie, napá-



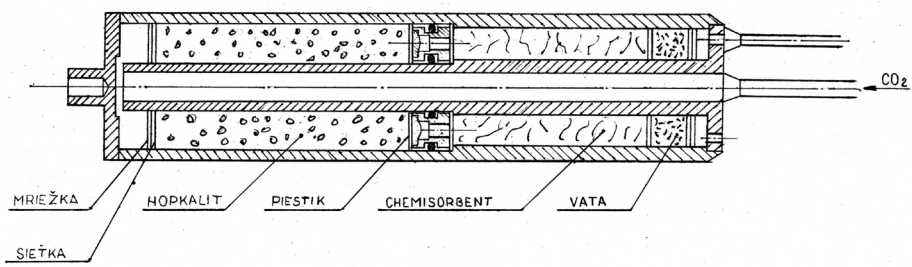
Panely systému kontroly tesnosti pokrytia v dozimetrickej dozorni

jania a kontroly. Elektronické zariadenie bolo rozmiestnené v siedmich paneloch, v každom z nich bola elektronika pre dvadsaťštyri kanálov.

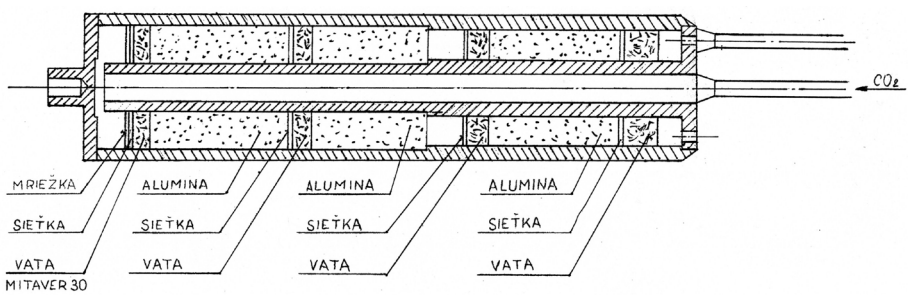
Plyn sa odoberal na výstupe z každého technologického kanála. Vzorka plynu prechádzala cez čistiaci filter, ktorý s účinnosťou 99,9 % slúžil na zachytenie izotopov jódu v organickej i anorganickej forme a tiež pevných produktov nachádzajúcich sa v CO_2 v primárnom okruhu. Filtre boli vložené do hniezda v podlahe miestnosti systému.

Pôvodne sa používali čistiace filtre sovietskej výroby, ale neskôr boli nahradené filtrami navrhnutými a vyrábanými vo vedecko-výskumnej základni EBO.

Použité čistiace filtre sa vyťahovali z hniezda na podlahe pomocou špeciálneho pojazdného tieneného kontajnera, pretože sa predpokladalo, že dávkový príkon od rádioaktívnych látok zachytených na filtri môže byť vysoký.



Pôvodná konštrukcia čistiaceho filtra



Upravená konštrukcia čistiaceho filtra

Vymierací (zadržiavací) objem slúžil na zadržanie vzorky plynu tak, aby sa stihli rozpadnúť vybrané rádioizotopy s krátkym polčasom rozpadu, ktoré by svojím energetickým spektrom ovplyvňovali citlivosť systému a aby sa izotopy Xe a Kr stačili rozpadnúť na izotopy rubídia

a cézia. Vzorka plynu po prechode vymieracím objemom prešla na merací filter, ktorý slúžil na zachytenie izotopov, ktoré vznikli rozpadom štiepnych produktov. Na vytvorenie vhodných teplotných podmienok pre detektor sa merací filter chladil vodou. K meraciemu filtru bol priložený scintilačný detektor NaJ(Tl). Medzi meracím filtrom a detektorom bola kovová prepážka. Detektor bol umiestnený spolu s meracím filtrom v betónovom bloku na zníženie pozadia gama žiarenia.

Impulzy z detektora boli privedené na vstup energetického diskriminátora, ktorý odfiltroval energie ^{41}Ar a dlhožijúcich izotopov ^{140}La ^{140}Ba a tým sa dosiahlo, že sa merali aktivity izotopov ^{88}Kr, ^{138}Xe, ^{88}Rb, ^{89}Rb a ^{138}Cs.

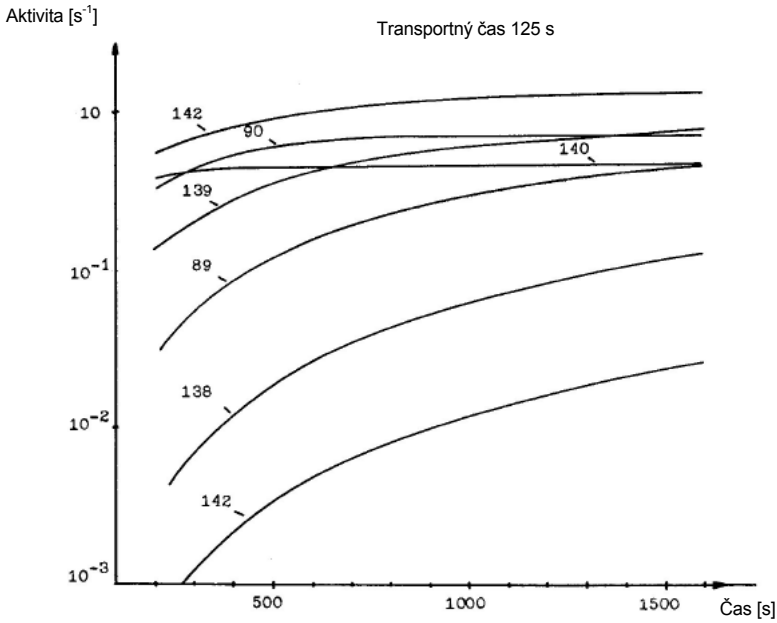
Hlavné izotopy pre meranie tesnosti pokrytia palivových prútikov				
Plynný produkt štiepenia	**Polčas rozpadu**	**Štiepny výťažok [%]**	**Meraný izotop**	**Polčas rozpadu**
^{88} Kr	2,8 h	3,6	^{88} Rb	18 min
^{88} Kr	3,2 min	4,6	^{88} Rb	15 min
^{90} Kr	33 s	5,0	^{90} Rb	2,4 min
^{91} Kr	10 s	3,4	^{91} Rb	1,7 min
^{138} Xe	17 min	5,5	^{138} Cs	32 min
^{139} Xe	41 s	5,4	^{139} Cs	9,5 min
^{140} Xe	16 s	3,8	^{140} Cs	66 s

Rýchlosť hromadenia týchto izotopov sa vypočítala pre rôzne transportné časy vzorky plynu na merací filter**.**

Experimentálne práce

Systém kontroly tesnosti pokrytia, ktorý bol vyprojektovaný a namontovaný v A1 nebol dovtedy nikde vyskúšaný v praxi a preto sa rozhodlo zaradiť do projektu spúšťania elektrárne experiment nazvaný EBO 10, ktorého cieľom bolo okalibrovať systém so zavezením palivovej kazety s kalibračným etalónom do reaktora. Predpokladalo sa neskôr urobiť experiment na aktívnej experimentálnej slučke, ktorá sa mala podľa projektu postaviť v elektrárni. Slučka sa však nevybudovala a táto časť experimentu sa nakoniec urobila na plynovej slučke v Ústave jadrového výskumu v Řeži u Prahy v troch častiach. Použilo sa konštrukčné riešenie skutočnej odberovej trasy v A1.

- V prvej časti sa urobili základné merania – predovšetkým sa merali aktivity a izotopické zloženie produktov zachytených na čistiacom a meracom filtre pri prútiku s neporušeným pokrytím.



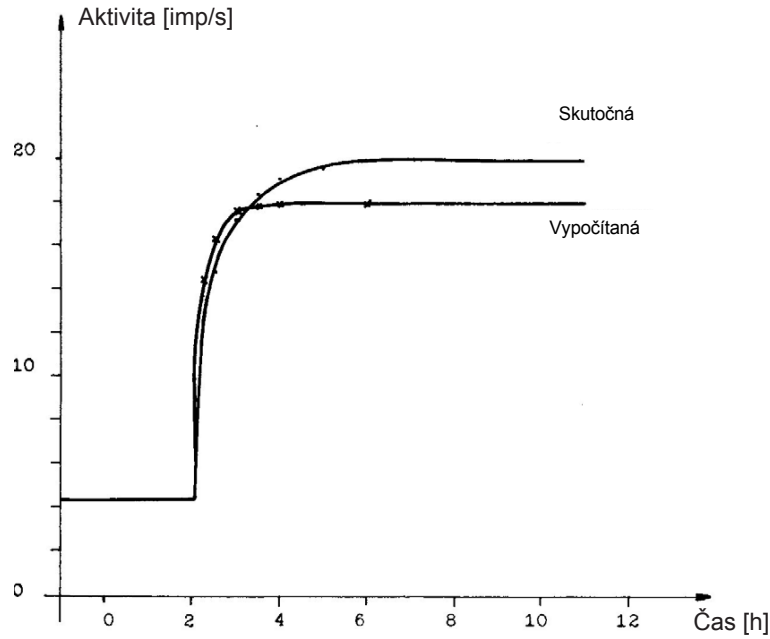
Vypočítané aktivity izotopov na meracom filtre

- V druhej časti sa urobil experiment s umelým roztrhnutím palivového prútika a sledovala sa odozva systému kontroly tesnosti pokrytia. Pritom sa obnažil povrch paliva s obohatením 6,5 % ^{235}U a s plochou 10 mm^2.
- V tretej časti sa urobil experiment s meraním aktivít v slučke, na čistiacom a meracom filtri pri zavedení prútika s umele vytvorenou poruchou pokrytia s plochou 31 mm^2.

Všetky tieto práce potvrdili, že systém kontroly tesnosti pokrytia tak ako bol vybudovaný, bol schopný zistiť reálne porušenie pokrytia palivových prútikov.

Systém kontroly tesnosti pokrytia v prevádzke

V počiatočnom období prevádzky sa overovali vlastnosti systému. Pomocou mnohokanálového analyzátora a detektorov systému sa merali izotopické zloženie meracieho filtra, účinnosť čistiaceho filtra, závislosť aktivity meracieho filtra v závislosti na prietoku plynu cez odberovú trasu a nastavovali sa prahy diskriminácie. Vyvinutá bola metóda kalibrácie detektorov.



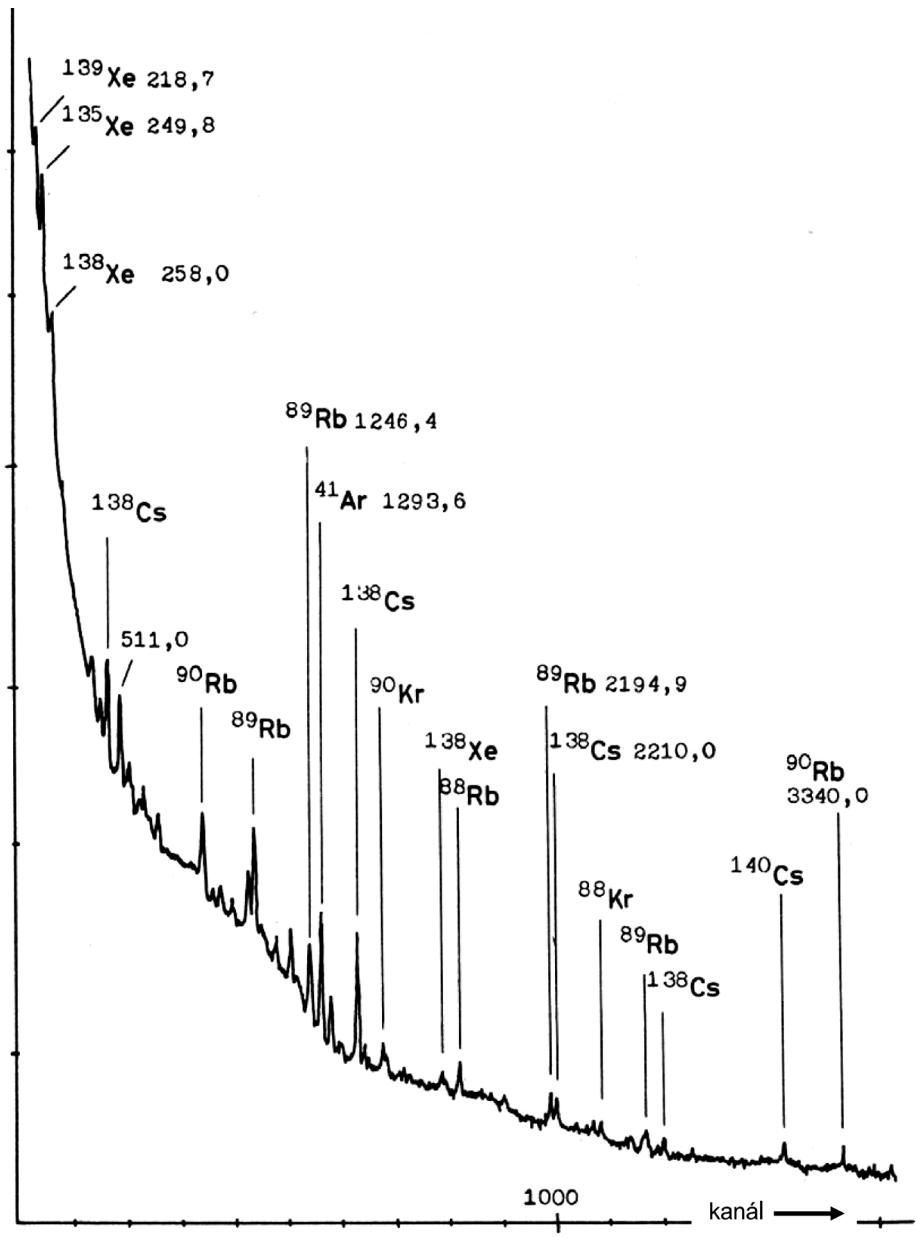
Časová závislosť aktivity meracieho filtra pri porušení pokrytia

V I. etape energetického spúšťania sa pokrytie považovalo za porušené vtedy, ak aktivita meracieho filtra v príslušnom kanáli prevýšila hodnotu dvojnásobku priemernej aktivity v ostatných kanáloch. Defekt v pokrytí sa v tomto čase nerozvíjal príliš rýchlo. Od prvých príznakov porušenia pokrytia do zdvojnásobenia aktivity prešli obvykle jeden až dva týždne. Palivové články s takto definovaným porušením pokrytia boli vytiahnuté z reaktora a kontrolované v horúcej komore. Zistilo sa, že veľkosť porušenia pokrytia nezodpovedala veľkosti signálu systému. Usudzovalo sa, že nepomer medzi veľkosťou signálu a veľkosťou porušeného pokrytia bol spôsobený miestom porušenia pokrytia – výške defektu v aktívnej zóne reaktora a možnou rozdielnou priemernou koncentráciou štiepnych produktov v chladiacom plyne.

V období od decembra 1972 do októbra 1974 bolo z reaktora vytiahnutých tridsaťpäť palivových kaziet, ktoré podľa údajov systému kontroly tesnosti pokrytia mali porušené pokrytie.

Spoľahlivá činnosť a teda aj schopnosť zistiť porušenie pokrytia paliva okrem iného závisela od veľkosti kontaminácie primárneho okruhu produktmi štiepenia uránu. Aktivita meracích filtrov reprezentovala množstvo a pohyb štiepnych produktov v primárnom okruhu. Z tohto hľadiska sa dá prevádzka systému rozdeliť do troch období.

Prvé obdobie – od začiatku energetického spúšťania do februára 1974 – bolo charakterizované stabilnými hodnotami pozadia alebo jeho zvyšovaním v závislosti od zvyšovania výkonu. Na konci tohto obdobia bolo pozadie 16 – 18 imp/s. Hodnoty boli vo všetkých kanáloch v pod-



Gama spektrum čistiaceho filtra zmerané pomocou polovodičového detektora

state rovnaké, z čoho vyplýva, že kontaminácia uránom bola rovnomerná. Z reaktora bolo vytiahnutých jedenásť palivových článkov s porušeným pokrytím. Bolo to spravidla vtedy, keď aktivita v danom kanáli dosiahla dvojnásobok pozadia.

Druhé obdobie – od februára 1974 do júna 1974 je charakterizované nestabilnou prácou systému kontroly tesnosti pokrytia. Na začiatku tohto obdobia v dôsledku zvýšenej vlhkosti CO_2 v primárnom okruhu sa objavila prakticky vo všetkých odberových trasách systému voda. Približne mesiac trvalo odstraňovanie vody a sušenie odberových trás. Bol tiež zaznamenaný veľký rozptyl hodnôt v systéme kontroly tesnosti pokrytia a postupne sa zvyšovalo pozadie. Zvyšovanie pozadia vo všetkých kanáloch svedčilo o tom, že v aktívnej zóne boli články s porušeným pokrytím a súčasne sa tieto články nedali zistiť pre veľký rozptyl hodnôt.

V marci 1974 bolo z reaktora vytiahnutých päť palivových článkov. Ich vytiahnutie do dochladzovacej zóny sprevádzal pokles pozadia a zmenšenie rozptylu hodnôt, najmä pri vytiahnutí článku G07. V tomto období bolo tiež veľa článkov, u ktorých sa podľa údajov kontroly tesnosti pokrytia predpokladalo porušenie pokrytia vo jednej tretiny výšky. Tieto predpoklady o mieste porušenia sa však nepotvrdili pri prehliadke palivového článku G07 v horúcej komore. Porušenie bolo vo výške 150, 180 a 210 cm zhora.

Hodnoty pozadia na konci druhého obdobia boli na úrovni 80 imp/s.

V treťom období – od júna do októbra 1974 – sa hodnoty pozadia príliš nezmenili. Ich absolútna hodnota bola v porovnaní s predchádzajúcim obdobím menšia, ale bolo to spôsobené zmenou prahu energetickej diskriminácie. Zvýšením prahu diskriminácie sa zväčšil pomer signál – pozadie asi triapolkrát a bolo možné registrovať štiepne produkty s krátkym polčasom rozpadu. Zmenilo sa kritérium, kedy sa pokrytie pokladalo za porušené. Hodnota z dvojnásobku strednej hodnoty sa zmenšila na jedenapolnásobok.

V ďalšom období boli pri prechodových procesoch v primárnom okruhu odberové rúrky systému spravidla zaplnené vodou, ktorá vznikla kondenzáciou z vlhkosti v chladiacom plyne. Zvýšenie teploty v miestnostiach cez ktoré prechádzali odberové rúrky na 42 ÷ 47°C malo zaistiť, aby pri tlaku v primárnom kruhu a vlhkosti plynu do 1 300 ppm vlhkosť nekondenzovala. Táto úprava však nebola účinná. Na druhej strane zvýšenie teploty v miestnostiach spôsobilo zhoršenie stability detektorov a znížila sa aj ich životnosť

Stav palivových článkov reaktore charakterizovala celková aktivita CO_2 v primárnom okruhu. Krivka pozadia systému kontroly tesnosti pokrytia sa menila v uvedených obdobiach rovnakým trendom ako krivka príkonu dávky na potrubí primárneho okruhu.

V prvom období bol príkon dávky 0,65 mSv/h pri tepelnom výkone reaktora 380 MW. Počas druhého obdobie sa príkon dávky zväčšoval až do vytiahnutia kaziet E03, G07, P07 a D07. Potom sa príkon dávky podstatne zmenšil, no neskôr sa stále zväčšoval a v koncom októbra 1974 bol 1,8 mSv/h.

Stály vzrast príkonu dávky je možné vysvetliť tým, že na začiatku prevádzky sa produkty štiepenia z kontaminácie článkov uránom usadzovali na rôznych miestach primárneho okruhu a preto významne neprispievali k celkovej aktivite CO_2. Množstvo uránu v primárnom okruhu začalo hrať úlohu v čase „nasýtenia" vnútorných povrchov a ku koncu roku 1974 každý palivový článok s porušeným pokrytím spôsobil zvýšenie aktivity v primárnom okruhu.

Kinetika rozvoja defektov

Z analýzy veľkosti hodnôt v kanáloch s kazetami s porušeným pokrytím vyplýva, že vo väčšine prípadov sa hodnoty začínali zväčšovať začína po odstávke reaktora.

Krivku rozvoja defektu charakterizuje rýchly vzrast, potom boli hodnoty stabilné, alebo pomaly rastli. Spravidla po niekoľkých dňoch sa hodnoty zväčšovali exponenciálne a kazeta bola vytiahnutá do dochladzovacej zóny. Dá sa povedať, že čas medzi výrazným vzrastom aktivity v technologickom kanáli a vytiahnutím kazety bol štyri až osem dní. Boli však aj také kazety, keď zväčšovanie aktivity trvalo dvadsaťosem dní.

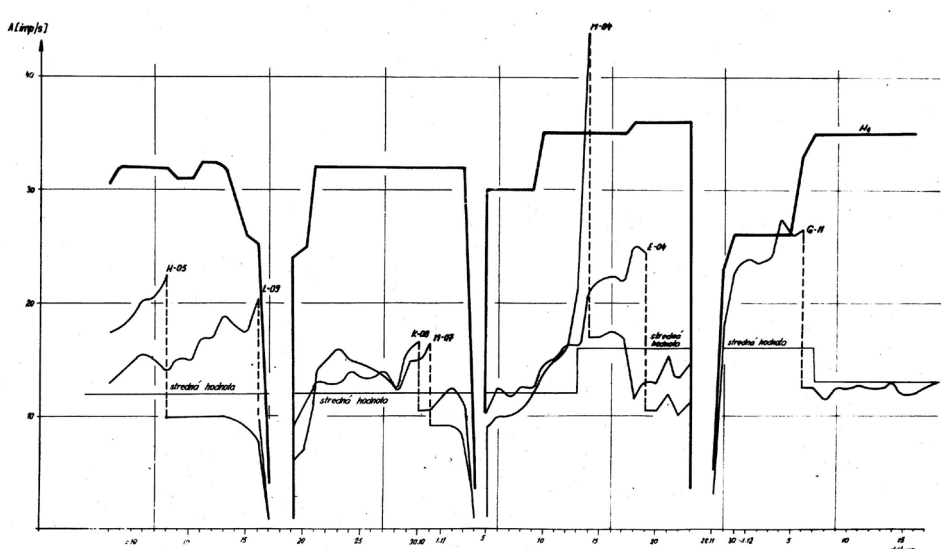
V niektorých prípadoch hodnoty narastali i po vytiahnutí kazety do dochladzovacej zóny. Z toho vyplýva, že porušenie pokrytia bolo také veľké, že uvoľňovanie štiepnych produktov pokračovalo.

Urobili sa pokusy odhadnúť množstvo uránu v primárnom okruhu. Pri predpoklade že pozadie je 45 imp/s, diskriminačný prah 2,5 MeV, účinnosť 0,06 % a je známe izotopické zloženie štiepnych produktov, potom vypočítaná kontaminácia bola 10 mg na kanál ($Q = 1{,}56.10^3$ kg/s, $q = 3.\ 10^{-3}$ kg/s, $t_c = 10$ s, $t_1 = 55$ s, $t_2 = 75$ s, $\Phi = 10^{13}$ $cm^{-2}.s^{=1}$), t.j. 1,5 g na celú aktívnu zónu.

Pretože systém kontroly tesnosti pokrytia pracoval podľa projektu s rovnakou pomernou citlivosťou do povrchovej kontaminácie uránom

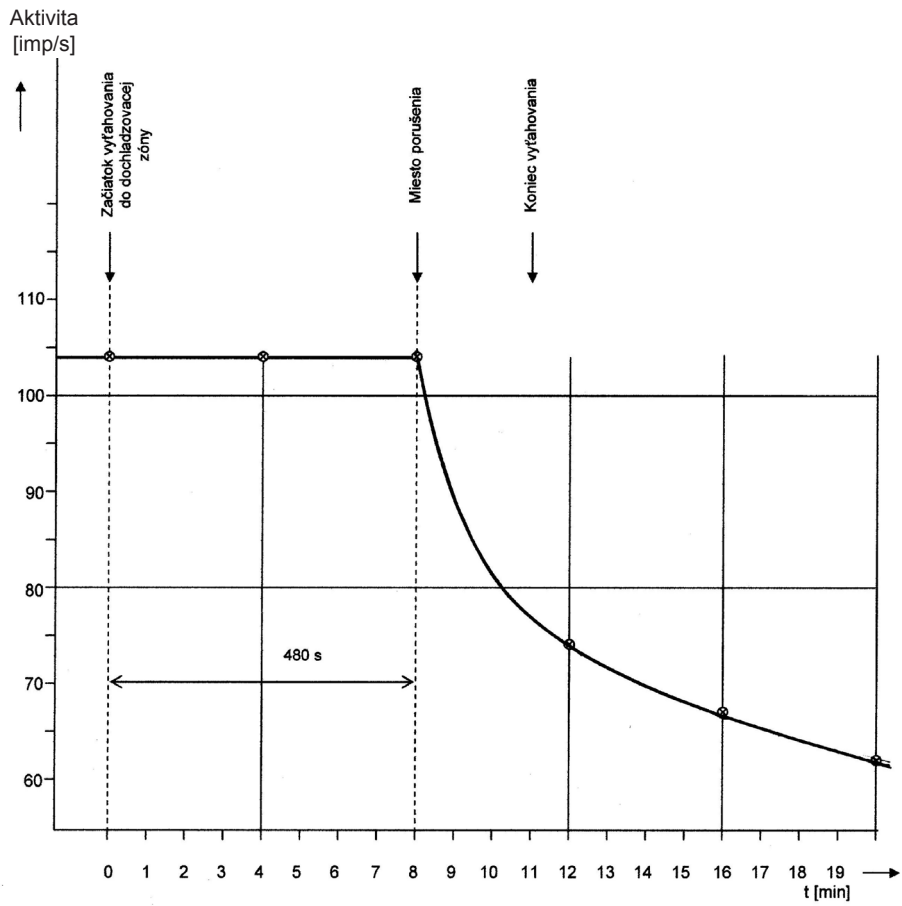
60 mg/kanál, potom vzhľadom na horeuvedenú kontamináciu primárneho okruhu vyplynulo, že články s porušeným pokrytím by sa mali bezodkladne vyťahovať nielen z aktívnej zóny, ale aj z reaktora.

Prehľad charakteristických údajov poškodených palivových článkov						
Číslo kanála	**Dátum vytiahnutia z AZ**	**Hodnota kontroly tesnosti pokrytia pred vytiahnutím článku [imp/s]**	**Hodnota pozadia pred vytiahnutím [imp/s}**	**Hodnota kontroly tesnosti pokrytia po vytiahnutí článku [imp/s]**	**Miesto porušenia od vrchu článku [cm]**	**Miesto porušenia podľa zistenia v horúcej komore [cm]**
M10	10.06.1973	116,0	27,0	35,0	300	300
H05	08.10.1973	22,5	10,0	12,0	200	200
L09	16.10.1973	20,5	10,4	10,0	160	-
K08	30.10.1974	16,3	10,5	11,0	230	-
M07	31.10.1973	15,5	10,0	11,5	290	-
M04	14.11.1973	44,0	14,0	16,0	150	-
E04	19.11.1973	28,0	11,5	15,0	250	-
G11	06.12.1973	27,0	13,0	16,0	250	150 a 180
P06	24.12.1973	43,5	10,0	15,0	100	-
K13	18.01.1974	42,5	22,0	19,0	250	310
L11	29.01.1974	36,0	15,0	16,0	250	230



Typický priebeh merania systémom kontroly tesnosti pokrytia pri vyťahovaní článkov do dochladzovacej zóny

Urobili sa tiež pokusy určiť miesto porušenia pokrytia – výšku tak, že sa merala aktivita meracieho filtra počas vyťahovania palivového článku do dochladzovacej zóny reaktora. Predpokladalo sa, že keď obnažený povrch paliva vyjde z aktívnej zóny, rýchlo sa zníži tvorba merateľných štiepnych produktov a tým aj odozva systému. Takto hodnotené články sa potom prezerali v horúcej komore. Miesto poškodenia sa vo väčšine prípadov potvrdilo.



Charakteristický priebeh odozvy systému kontroly tesnosti pokrytia pri vyťahovaní palivových článkov do dochladzovacej zóny

Problémy v prevádzke systému kontroly tesnosti pokrytia

Počas prevádzky často kondenzovala voda v odberových trasách. Trasa sa musela zatvoriť a po vysatí vody vysušiť. Počas sušenia meranie v príslušnom kanále nefungovalo. Ani po zvýšení teploty odberových trás elektrickým ohrevom sa nepodarilo kondenzáciu úplne vylúčiť a bola pomerne častým javom. Neskôr – v júni 1976 – sa zistilo, že niektoré trasy v časti od čistiaceho po merací filter sa upchávali a museli sa prefukovať buď stlačeným dusíkom alebo plynom reaktora.

Postupne sa zväčšovala kontaminácia primárneho okruhu, zhoršovala sa citlivosť systému a tak sa porušenie pokrytia zistilo s oneskorením a porušenie bolo väčšie. Stredné hodnoty aktivít sa postupne zväčšovali, najmä po opätovnom spustení elektrárne po prvej havárii. Zistil sa väčší počet článkov, ktoré mali zrejme latentne porušené pokrytie, neboli vymenené a pokrytie sa skutočne porušilo pri prevádzke.

Nerovnaká vzdialenosť meracieho filtra od prepážky spôsobovala rozptyl údajov o aktivite meracích filtrov. V októbri 1973 sa vzdialenosť medzi detektorom a filtrom zväčšila o 30 mm. Tým sa údaje zmenšili dvaapolkrát. Rovnakým pomerom sa zmenšila citlivosť, ale rozptyl hodnôt sa zmenšil. V rovnakom období sa zvýšil prietok plynu cez odberovú trasu a tým sa zväčšil podiel krátkodobých izotopov vo vzorke plynu a skrátil sa tak čas detekcie porušeného pokrytia.

Prehliadkou palivových článkov s poškodením pokrytia v horúcej komore sa zistilo, že odozva systému kontroly tesnosti pokrytia nebola rovnaká v rôznych palivových článkoch s rovnako veľkým poškodením pokrytia.

Podobne ako iné zariadenia, systém kontroly tesnosti pokrytia bol náročný na prevádzku a v daných prevádzkových podmienkach sa prejavili jeho nedostatky.

19. ZARIADENIA CHEMICKEJ TECHNOLÓGIE A CHEMICKÝ REŽIM

Objekty chemickej prevádzky boli vyprojektované v rokoch 1960 až 1962 a vychádzali z vtedajších požiadaviek klasických elektrární na riešenie chemických a koróznych problémov. V tomto období sa budovala napríklad elektráreň Hodonín so štyrmi 50 MW blokmi a s podobným výkonom sekundárneho okruhu sa projektovala aj elektráreň A1. Výkon 150 MW_{el} výrazne prevyšoval v tej dobe budované prototypy reaktorov LWGR v Obninsku – 5 MW_{el}, BWR v Melekesse – 50 MW_{el} a PWR v Rheinsbergu – 70 MW_{el}. V 60-tych rokoch neboli skúsenosti s jadrovou energetikou a bezpečnostné požiadavky a kritéria sa riešili podobne ako v klasickej elektrárni.

Všetky chladiče primárneho okruhu boli chladené otvoreným chladiacim systémom podobne ako sekundárny okruh. Mali len svoju samostatnú chladiacu vežu, z ktorej časť zahustenej vody z chladiaceho okruhu v množstve okolo 30 t/hod sa vypúšťala kontinuálne do potoka Manivier a odtiaľ do Dudváhu. Veže boli ventilátorové s úletom až 90 t/hod. Týmto spôsobom boli chladené napr. aj puzdrá s vyhorenými palivovými článkami v dlhodobom sklade. Až dodatočne sa vybudoval chladiaci medziokruh na chladenie bazénu dlhodobého skladu.

Chladiaca voda sa nijako chemicky neupravovala, bola iba s možnosť dávkovať hexametafosfát. Dodatok projektu na jej úpravu sa spracoval až v priebehu prevádzky, ale úprava sa už nestihla, pretože elektráreň bola odstavená.

Z rovnakého dôvodu sa neurobili ani iné pripravené úpravy a dodatky ako napríklad zariadenie na čistenie D_2O od organických nečistôt.

Objekty chemickej prevádzky

Chemická úprava vody – výroba demineralizovanej vody – objekt č. 40

Zariadenia objektu chemickej úpravy vody boli určené na výrobu demineralizovanej vody pre sekundárny okruh. Proces úpravy vody obsahoval čírenie vody vápnom, filtráciu na pieskových filtroch a úpravu na ionexových filtroch. Chemická úprava vody bola jeden z mála systémov, ktoré nebolo potrebné v priebehu spúšťania a prevádzky významne meniť a vyrobená demineralizovaná voda vyhovovala požiadavkám na kvalitu. Maximálny výkon chemickej úpravy vody bol 50 t/hod.

Čistiaca stanica rádioaktívnych vôd – objekt č. 41

Zariadenia objektu č.41 čistili rádioaktívnu odpadovú vodu na úroveň podľa povolenia na ich vypúšťanie do recipienta. Zahustené koncentráty a použité filtračné pieskové a ionexové hmoty sa skladovali v objekte špeciálneho zložiska, objekt č. 44/10.

Projekt objektu čistiacej stanice bol poznamenaný v tej dobe veľmi preferovaným zlepšovacím hnutím a opatreniami na úsporu materiálu. Samotný objekt čistenia rádioaktívnych vôd bol (okrem nádrží) ešte v dobe projektovania zmenšený po stavebnej aj technologickej časti na polovicu. Táto zmena mala za následok, že stanica kapacitne nepostačovala, najmä v prvých etapách prevádzky, keď množstvo pritekanej vody bolo väčšie ako spracovateľské možnosti.

Ďalším „zlepšením“ bola zámena pôvodne navrhovaného vnútorného obloženia zberných veľkokapacitných nádrží z nehrdzavejúcej alebo uhlíkatej ocele za preferované polyesterové sklolamináty. Tento povlak sa odúval a praskal a nádrže boli netesné prakticky od ich zhotovenia. Požiadavka, aby aspoň niektoré nádrže boli obložené nerezovým plechom sa nerealizovala z dôvodu, že táto zmena by vyvolala posun spustenia elektrárne. Dodatočne sa podarilo obložiť nehrdzavejúcim plechom iba v dve nádrže, aj to až po odstavení elektrárne.

Špeciálne zložisko – objekt č. 44/10, 44/20

Zariadenia špeciálneho zložiska v objekte č. 44/10 boli určené na prečerpávanie a skladovanie kvapalných koncentrátov, kalov a sorbentov. Iba dve skladovacie betónové nádrže boli obložené nehrdzavejúcim plechom: boli tesné a používajú sa doteraz.

V zariadeniach špeciálneho zložiska – objekt č. 44/20 sa v podzemných betónových bunkroch skladovali pevné rádioaktívne odpady. Samotný objekt a tiež niektoré iné objekty (napríklad káblové kanály) boli nevhodne umiestnené v Manivierskej doline a neboli dostatočne zabezpečené proti dažďovým prívalovým vodám. Preto boli niekoľkokrát zatopené. Dodatočná ochrana proti týmto vodám sa dobudovala až po záplavách.

Chemický režim pri komplexných skúškach a energetickom spúšťaní

Základnou odlišnosťou reaktora KS150 od iných reaktorov podobného typu bolo vzájomné konštrukčné spojenie plynového a ťažkovodného okruhu. Takéto riešenie umožňovalo na jednej strane použiť beztlakovú nádobu pre moderátor, na druhej strane to istým spôsobom komplikovalo technologickú schému a režim udržiavania zadaných parametrov chladiva a moderátora. Vysoké nároky boli najmä na čistotu chladiva. V navrhnutom systéme sa hromadili produkty vzájomného pôsobenia D_2O, CO_2 a nečistoty, ktoré vznikli pri korózii materiálov a ich aktiváciou neutrónmi.

Pri havárii upchávkového systému turbokompresora č.1 koncom mája 1971 vniklo do primárneho okruhu asi 1 000 kg oleja. Vniknutý olej sa účinkom cirkulačných kompresorov rozprášil do aerosólovej formy a postupne bol zanesený do plynového a ťažkovodného okruhu. Pri oterových skúškach sa zistilo, že prakticky celý primárny okruh je zaolejovaný. Komplexné skúšky sa prerušili a začalo sa s odmasťovaním.

Odmasťovanie

Na odmasťovanie sa vypracovali a odskúšali dva spôsoby. Suchý spôsob, založený na spaľovaní oleja v pomocnom ohrievači pri teplotách asi 500°C a mokrý spôsob s použitím vodného roztoku detergentu. Suché odmasťovania podľa očakávania bolo málo účinné, pretože teplota niektorých konštrukčných častí zariadenia nesmela prevýšiť 130°C, pričom teplota odparovania oleja je až 330°C. Pre mokré odmasťovanie sa použil roztok detergentu Slovafol 910 (alkypolyglykoléter) koncentrácie 2 – 4 g/l s prídavkom 0,1 – 0,5 g/l polyfosfátov (tripolyfosfát a hexametafosfát) na zlepšenie účinku oplachu. Takto boli odmastené slučky parogenerátor – turbokompresor a pomocné okruhy reaktora.

Ťažkovodný okruh a avialová nádoba reaktora sa odmasťovali roztokom detergentu bez prídavku polyfosfátov, pretože pri koróznych skúškach avialu s roztokom detergentu s obsahom technických polyfosfátov sa zistilo, že spôsobuje koróziu. Reaktor vrátane neoddeliteľných častí sa neodmasťoval, pretože boli obavy zo zavlhčenia grafitovej biologickej ochrany. Okrem toho v takom veľkom preplachovanom objeme sa nedala dosiahnuť účinná cirkulácia. Vyberateľné časti reaktora sa odmastili mimo reaktora.

Sušenie

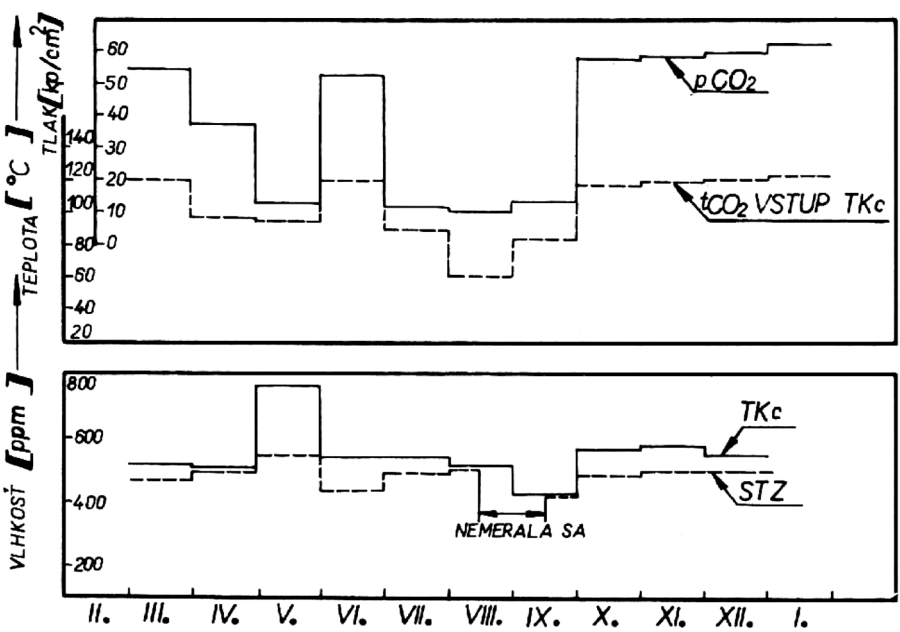
Okruh bol po mokrom odmasťovaní významne zavlhčený. Vlhkosť v plynovom okruhu sa podstatné znížila už v priebehu 2. etapy kom-

plexných skúšok, keď v okruhu klesla z pôvodných asi 1 000 ppm na asi 400 ppm. Pre úplné odvodnenie okruhu sa na najnižších miestach zariadenia a potrubných trás ešte pred komplexnými skúškami doplnili drenážne zátky.

Sušenie jednotlivých okruhov prebiehalo podľa možnosti súčasne alebo postupne v nasledujúcich troch až štyroch cykloch:

- naplnenie suchým plynom alebo vzduchom,
- ohrev systému alebo okruhu elektrickými ohrievačmi pre tento účel namontovanými, horúcou vodou alebo parou, prípadne cirkulačným teplom na teplotu 55 až 60 ^{0}C,
- vákuovanie okruhov na hodnotu 10^{-1} až 10^{-3} mm Hg súčasne s ich ohrevom alebo do zníženia teploty na 35°C.

Priemerná hodnota vlhkosti v primárnom okruhu za sledované obdobie bola 555 ppm. Vlhkosť meraná za výstupným kondenzátorom slučky spaľovania traskavej zmesi sa menila v rozsahu od 290 ppm do 760 ppm. V máji 1973 vlhkosť vystúpila až na 6 000 ppm pri beztlakovom stave reaktora.



Vlhkosť, teplota a tlak CO_2 v plynovom okruhu a na výstupe systému spaľovania traskavej zmesi v roku 1973

Po skončení sušenia boli všetky okruhy zaplnené suchým CO_2 s vlhkosťou menšou ako 20 ppm. Nasledovala tlaková skúška primárneho okruhu pri teplote asi 80°C a tlaku 5,4 MPa. Po vysušení okruhu bola vlhkosť menšia ako 150 ppm a stredná hodnota 70 ppm.

Celkové vysušenie bolo úspešné, pretože po naliatí ťažkej vody D_2O do okruhu sa izotopické zloženie ťažkej vody nezhoršilo.

Izotopická čistota sa čiastočne zhoršila (asi o 0,18 %) po spustení cirkulácie a nahriatí plynového okruhu pri energetickom spustení na teplotu 280°C až 300°C. V tejto dobe sa uvoľnila naadsorbovaná vlhkosť na vnútornom povrchu plynového okruhu, ktorého plocha bola asi 57 000 m^2 v dôsledku pokrytia pórovitou vrstvou koróznych produktov bola plocha povrchu plynového okruhu niekoľkonásobne vyššia.

Chemický režim parogenerátorov

Jedným z najzávažnejších následkov korózie parogenerátorov bola netesnosť rúrkovníc. Pri prieniku CO_2 do vody sekundárneho okruhu začali rúrkovnice korodovať a vznikali netesnosti. Možnosť vzniku netesností vyplývala už z technických podmienok pre výrobu parogenerátorov, kedy sa tesnosť zvarov kontrolovala len na modelových kontrolných rúrkovniciach. Podľa týchto podmienok povolená netesnosť bola menšia ako 0,1 mikrolitra CO_2 na jeden U – článok parogenerátora pri normálnom tlaku. Takáto netesnosť pre 124 488 zvarov všetkých parogenerátorov a pri pracovnom tlaku CO_2 predstavovala prienik asi 2 kg CO_2 za hodinu. Pri takomto prieniku sa hodnota pH vody sekundárneho okruhu zmenšila na hodnotu asi 5,3. Podľa prevádzkového predpisu pre obsluhu parogenerátorov a normy ON 077401 minimálna hodnota pH mala byť 7. Takéto pH sa udržiavalo zvýšeným dávkovaním hydroxidu sodného a amoniaku do napájacej vody jednotlivých sekcií parogenerátorov. Dávkovanie zabezpečovalo len celkovú ochranu povrchov a nebolo účinné v miestach netesností. Problém by bol odstránený, ak by boli parogenerátory konštruované s dvojitou rúrkovnicou podobne ako ťažkovodné chladiče. Parogenerátory s dvojitou rúrkovnicou sa úspešne použili v jadrových elektrárňach s rýchlym reaktorom v ZSSR.

Požiadavky na čistotu CO_2

Požiadavky na čistotu CO_2 boli veľmi vysoké, lebo CO_2 bol v priamom styku s ťažkou vodou. Hladina D_2O v reaktore sa trvale prefukovala oxidom uhličitým, aby sa znížil obsah vodíka vznikajúceho radiačným

rozkladom D_2O a zabránilo sa vzniku traskavej zmesi. CO_2 bol vedený do okruhu spaľovania traskavej zmesi v množstve 8,5 t/hod. V okruhu pary vody kondenzovali vo vstupnom kondenzátore, čo spôsobovalo vymývanie chemických nečistôt a nerozpustných látok z CO_2. Následne sa na katalyzátore spaľovali organické látky (napríklad olej) obsiahnuté v CO_2 a plynných zlúčeninách ľahkého vodíka. Skondenzovaná voda z okruhu bola zavedená priamo do ťažkovodného okruhu a bola hlavným zdrojom znižovania izotopickej čistoty D_2O. Z toho dôvodu bola predpísaná vysoká čistota CO_2 a teda malá vlhkosť, malý obsah oleja, chemických a mechanických nečistôt.

Jediným dodávateľom CO_2 požadovanej čistoty boli Chemické závody Litvínov˘v Čechách. Veľká vzdialenosť dodávateľa nepriaznivo ovplyvňovala operatívnosť dodávok. Rokovanie s Duslo Šaľa na Slovensku na dodávku CO_2 požadovanej kvality bolo neúspešné.

Všetky ukazovatele kvality dodávaného plynu sa merali vo výrobnom závode a hodnoty boli zaznamenané v protokoloch. Pri vstupnej kontrole v elektrárni sa sústavne meral iba obsah oleja a vlhkosť. Ostatné parametre sa kontrolovali iba výberovo.

Chemický režim okruhu D_2O

Ťažká voda mala mať vysokú izotopickú čistotu, pretože priamo ovplyvňovala zásobu reaktivity aktívnej zóny. Pri znížení izotopickej čistoty D_2O sa zmenšilo možné vyhorenie paliva a zhoršila sa ekonomika prevádzky.

Izotopická čistota D_2O sa v ťažkovodnom okruhu počas komplexných skúšok a energetického spúšťania znižovala. Znižovanie izotopickej čistoty D_2O v ťažkovodnom okruhu prebiehalo v dvoma cestami:

- pri doplňovaní CO_2 do primárneho okruhu sa v ňom nachádzajúca obyčajná voda dostala do okruhu; množstvo H_2O prichádzajúce touto cestou nebolo väčšie ako 5 kg za mesiac,
- rádiolýzou oleja unikajúceho z upchávok pri práci turbokompresorov. Množstvo H_2O, ktoré takto prichádzalo do okruhu sa odhadovalo na $20 \div 25$ kg za mesiac.

Na udržiavanie potrebnej izotopickej čistoty D_2O v hlavnom ťažkovodnom okruhu bola inštalovaná obohacovacia kolóna Sulzer.

Z konštrukčných častí ťažkovodného okruhu najkritickejším materiálom z hľadiska korózie ťažkou vodou bol avial. Podľa technického

projektu bola životnosť avialovej nádoby päť rokov a preto projektové riešenie umožňovalo jej výmenu.

Chladiče D_2O boli vyrobené z nehrdzavejúcej ocele (18/8 CrNi) citlivej na koróziu v prítomnosti chloridov. Podľa projektu bola chladiacim médiom týchto chladičov cirkulačná chladiaca voda primárneho okruhu s relatívne vysokým obsahom chloridov. Súčasne tieto chladiče tvorili jedinú bariéru medzi rádioaktívnou D_2O a životným prostredím.

Znižovanie izotopickej čistoty D_2O	
Obdobie	**Izotopická čistota [%mol]**
Garančné merania dodanej D_2O z ÚJV Řež v r. 1969 a 1970	99,91
D_2O pred nalievaním v decembri 1972	99,90
D_2O po naliatí v decembri 1972	99,87
D_2O po nahriati primárneho okruhu v januári 1973	99,67
Po I. etape energetického spúšťania vo februári 1973	99,58
Po II. etape energetického spúšťania v januári 1974	99,34

Chemický režim chladenia vyhorených palivových článkov

Podľa projektu sa predpokladalo dochladzovanie vyhorených palivových článkov roztokom dvojchromanu draselného ($K_2Cr_2O_7$) s koncentráciou asi 0,5 %. Týmto médiom boli články chladené v dvoch krátkodobých skladoch a tiež v puzdrách v dlhodobom sklade. Podľa projektu boli puzdrá v dlhodobom sklade chladené priamo vodou primárneho cirkulačného okruhu, ktorého odluh bol zavedený priamo do potoka Manivier.

V priebehu prevádzky sa ukázalo, že chladiace médium palivových článkov, roztok dvojchromanu draselného je pre pokrytie palivových článkov (MgBe) relatívne vysoko korozívny, najmä v prítomnosti CO_2, ktorý významne znižoval pH.

Chemické problémy prevádzky

Chemický režim okruhov CO_2

Kvalita dodávaného CO_2

Požiadavky na čistotu CO_2 boli veľmi vysoké, čo vyplývalo z priameho styku CO_2 s ťažkou vodou a veľkej spotreby CO_2 (doplňované množstvo

bolo asi 1 t/deň). Prísne limity boli pre zlúčeniny obsahujúce ľahký vodík. Napríklad maximálny obsah H_2O bol 20 mg/kg, maximálny obsah oleja bol 5 mg/kg, maximálny obsah H_2 bol 2 mg/kg. Maximálny obsah H_2S, NH_3 a ďalších prímesí bol 1 mg/kg. Výrobca, Chemické závody Litvínov, nemal problémy s dodávkou takejto kvality CO_2. Priemerný obsah oleja bol asi 1 mg/kg, obsah vlhkosti asi 15 mg/kg a podobne Jediným problémom bola operatívnosť dodávok vzhľadom na veľkú vzdialenosť dodávateľa. Z hľadiska kontroly chemických režimov jednotlivých technológií plynového hospodárstva – objekt č. 28 neboli významné problémy.

Zloženie CO_2 v primárnom okruhu

Pravidelné meranie obsahu oleja slúžilo aj na hodnotenie spoľahlivosti práce turbokompresorov. Väčšina odberov vzoriek bola z výstupu kompresorov. V priebehu I. etapy energetického spúšťania nebol zistený významný prienik oleja do okruhu. Priemerné hodnoty sa pohybovali v rozmedzí 2 až 5 mg/kg.

Priemerné mesačné hodnoty obsahu oleja v primárnom okruhu v jednotlivých turbokompresoroch v II. etape energetického spúšťania boli ustálené. Vysoká hodnota v júli 1973 bola spôsobená prienikom oleja cez turbokompresor č. 1. V druhej časti II. etapy energetického spúšťania (február – september 1974) bol priemerný obsah oleja od 1,0 do 2,9 ppm.

V období od októbra 1974 do septembra 1976 bol priemerný obsah oleja v primárnom okruhu od 1 do 5 ppm.

Vlhkosť plynu v primárnom okruhu závisela od pracovných podmienok reaktora, okruhov spaľovania traskavej zmesi a okruhu čistenia CO_2.

V období od októbra 1974 do septembra 1976 kolísala priemerná vlhkosť plynu v rozsahu 700 až 1 200 ppm a spravidla bola o 300 až 800 ppm väčšia ako vlhkosť na výstupe z okruhu čistenia CO_2.

Čistenie CO_2

Čistenie CO_2 zabezpečoval okruh čistenia CO_2. Princíp čistenia bol založený na kondenzácii a následnom odparení plynu. Časť neskvapalneného plynu sa viedla do rektifikačnej kolóny, kde sa plynné produkty štiepenia (Xe, Kr, J, oxidy ruténia) oddelili a boli zavedené do odsávacieho systému 0,07 – 0,09 MPa. Zahustená tzv. pulpa sa periodicky odpúšťala do odplyňovača D_2O. V prípade, že tlak v okruhu bol nižší ako 5,5 MPa, plyn sa čistil filtráciou na porolitových filtroch. Nastavenie spoľahlivej prevádzky kondenzačného čistenia bolo náročné.

Chemický režim parogenerátorov

Netesnosti parogenerátorov a ich korózia boli jedným z najväčších problémov prevádzky elektrárne. Podstatou problému netesností boli tlakové požiadavky. Na ochranu primárneho okruhu proti možnému prieniku ľahkej vody do primárneho okruhu a teda do D_2O, musel byť v parogenerátore na strane CO_2 vždy vyšší tlak ako na strane sekundárneho okruhu. Pritom i malé prieniky CO_2 do vodnej strany vytvárali v mieste prieniku veľmi agresívnu nasýtenú kyselinu uhličitú, pôsobením ktorej sa netesnosť postupne zväčšovala.

Po montáži parogenerátorov boli vnútorné povrchy teplovýmenných rúrok chemicky vyčistené a na ich povrchu sa vytvorila magnetitová pasivačná vrstva. Pri odmasťovaní sa táto vrstva porušila a do spustenia elektrárne v parogenerátoroch vzniklo a usadilo sa ako kal veľké množstvo oxidov.

Chemický režim parogenerátorov sa po spustení postupne zlepšoval. V II. etape energetického spúšťania sa postupne začali zvyšovať prieniky CO_2 a pH prehriatych pár bolo od 5,5 do 7. Ku koncu etapy sa hodnota pH pár prudko znížila na 5,0. Priemerný obsah voľného CO_2 v parách pred odstavením bol jednotky až desiatky mg/l. Vysoký obsah CO_2 v parách a kondenzátoch mal za následok zvýšený obsah železa v napájacej vode. Pre vysoký obsah prenikajúceho CO_2 do vodnej strany parogenerátorov bol 20.6.1973 odstavený parogenerátor č.1 a 22.6.1973 bola odstavená celá elektráreň.

Pri opätovnom spustení reaktora po opravách sa zistil postupný pokles hodnoty pH v napájacích nádržiach a vo vode v bubnoch parogenerátorov. Hodnoty poklesli približne na úroveň pH 6. Preto sa začalo s alkalizáciou napájacej vody lúhom sodným.

Po prifázovaní turbín sa napájacia voda trvale alkalizovala a od septembra1973 sa začala alkalizovať para amoniakom. Chemický režim sa v tomto období postupne ustálil.

Podľa merania obsahu celkového CO_2 v pare sa usudzovalo, že prieniky CO_2 na sekundárnu stranu parogenerátorov sa postupne zvyšovali a celkový prienik CO_2 do sekundárnej strany parogenerátorov sa odhadoval asi 5 kg/h. Korozívny účinok prenikajúceho CO_2 sa zavedenou alkalizáciou lúhom sodným a amoniakom zmiernil, ale vplyvom rozkladu uhličitanov bola vo vode vždy určitá koncentrácia CO_2, ktorá bola príčinou trvalej korózie. Skúsenosti ukázali, že parogenerátory tejto konštrukcie a spôsobu výroby neboli vhodné pre trvalú prevádzku.

Ani dávkovaním alkalizačných prísad sa nedal trvale udržiavať chemický režim parogenerátorov, v ktorých pH malo byť v rozsahu 8 až 9. Alkalizáciou bolo možné krátkodobo eliminovať len netesnosti do veľkosti prieniku CO_2 asi 5 kg/hod. Ak vznikla lokálna netesnosť a ak koncentrácia železa vo vode prevýšila limitnú hodnotu, musel sa parogenerátor odstaviť. Pri prieniku CO_2 do parnej strany musel byť parogenerátor odstavený aj z dôvodu zhoršenia vákua.

V jednotlivých parogenerátoroch sa kontrolovali najmä prídavná voda, napájacia voda, kotlové vody, prehriate pary a kondenzáty. U napájacích a kotlových vôd sa pri lokálnej netesnosti zvýšil obsah železa na hodnoty 2 500 až 3 000 mg/l. Priemerný obsah voľného CO_2 v parách sa pohyboval v jednotkách až desiatkach mg/l. Alkalizácia parnej strany parogenerátora dávkovaním amoniaku bola limitovaná hodnotou 4,5 mg/l na obmedzenie rizika korózie kondenzátorov.

Spaľovanie traskavej zmesi

V prevádzke sa ukázalo, že okruh spaľovania traskavej zmesi fungoval skôr ako čistenie CO_2 vypieraním kondenzujúcou D_2O vo vstupnom kondenzátore, než ako rekombinátor D_2 na katalyzátore. Obsah D_2 v CO_2 bol menší ako 0, 03 % oproti projektovej hodnote 4 % a na katalyzátore sa spaľovali prímesi CO_2 obsahujúce ľahký vodík, napríklad olej, ktorý sa dostával do plynového primárneho okruhu cez nedokonalé upchávky turbokompresorov.

Okruh spaľovania traskavej zmesi bol hlavným zdrojom izotopickej degradácie ťažkej vody. Plyn prechádzajúci nad hladinou D_2O v reaktore sa pôsobením vysokého neutrónového toku radiolyticky rozkladal, organické zlúčeniny sa pyrolyticky štiepili a súčasne sa tvorilo mnoho radikálov. Spaľovaním traskavej zmesi radikály rekombinovali a vznikal HDO a celá škála deuterizovaných organických látok. Dominantnými organickými látkami boli kyseliny. pH kondenzátu zo vstupného kondenzátora bolo v rozmedzí 1 až 3. Z kyselín, ktorých koncentrácia sa pohybovala až do cca 10 g/l boli zastúpené najmä prchavé kyseliny: kyselina mravčia, octová, propionová a iné a neprchavé: kyselina šťaveľová, glutárová, jantárová a maleinová.

Do ukončenia prevádzky sa nezistila prítomnosť vyšších mastných kyselín: kyseliny palmitovej a stearovej. Vysoký obsah organických látok v D_2O bol problémom pre izotopické čistenie D_2O na kolóne firmy Sulzer.

Izotopická čistota D_2O

Kritickým parametrom D_2O ovplyvňujúcim fyziku reaktora bolo jej izotopické zloženie. Ťažká voda bola dodávaná zo ZSSR postupne od marca 1968 do apríla 1969. Sumárny vážený priemer dodávky bol podľa protokolov 99,938 ± 0,02 % mol. Po nahriatí primárneho okruhu a ustálení výkonu reaktora bolo izotopické zloženie D_2O 99,67 ± 0,02 % mol (3.1.1973). Ku koncu I. etapy energetického spúšťania bola izotopická čistota 99,58 ± 0,02 % mol (26.2.1973).

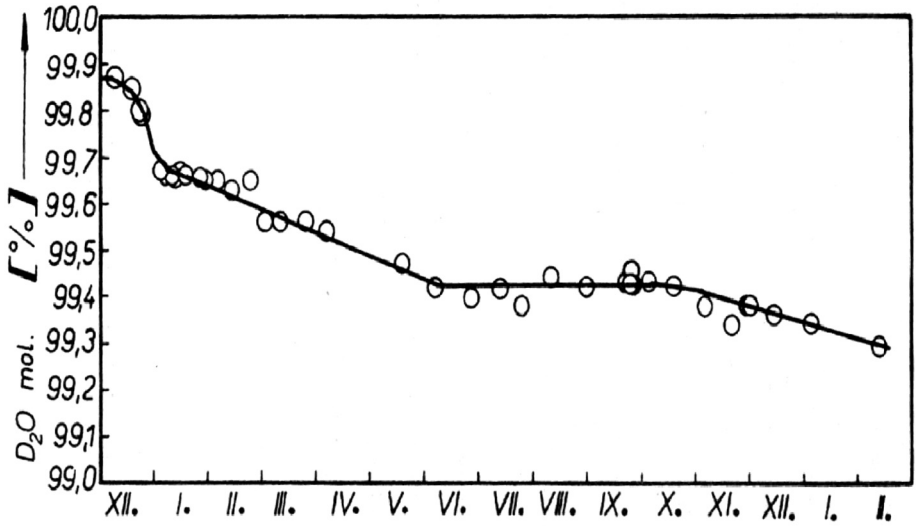
Počas II. etapy energetického spúšťania a práce reaktora sa izotopické zloženie znižovalo s rýchlosťou priemerne 0,03 % mol za mesiac, čo zodpovedalo prieniku asi 25 – 30 kg H_2O do ťažkovodného okruhu za mesiac. Po skončení II. etapy energetického spúšťania bola izotopická čistota 99,34 %mol. Zmenou izotopického zloženia moderátora v reaktore sa v období II. etapy energetického spúšťania znížila zásoba reaktivity reaktora o 0,432 %.

Znižovanie izotopickej čistoty D_2O v ťažkovodnom okruhu prebiehalo v zásade dvoma cestami:

- vnikaním H_2O v kysličníku uhličitom doplňovanom do primárneho okruhu (množstvo H_2O prichádzajúce touto cestou neprevyšovalo 5 kg za mesiac),
- v dôsledku rádiolýzy oleja unikajúceho z upchávok pri práci turbokompresorov. Množstvo H_2O, ktoré takto prichádzalo do okruhu sa odhadovalo na 20 – 25 kg za mesiac.

Nainštalovaná rektifikačná kolóna Sulzer mala zabrániť poklesu izotopickej čistoty. V základnom režime mohla pracovať v rozmedzí koncentrácií D_2O 5 ÷ 99,7 % mol, pričom nastavená koncentrácia výstupného produktu bola 99,8 % mol a odpadový produkt mal koncentráciu asi 1 % mol. Na kolóne bolo možné spracovávať buď D_2O z hlavného ťažkovodného okruhu alebo kondenzáty zo slučky spaľovania traskavej zmesi. Kvalitatívne požiadavky na vodu vstupujúcu do kolóny boli vysoké a voda z okruhu sa musela čistiť v destilačnej stanici D_2O. Pre čistenie kondenzátov zo systému spaľovania traskavej zmesi sa mala vybudovať špeciálna linka na odstraňovanie organických látok.

Po uvedení obohacovacej kolóny Sulzer v máji 1975 do prevádzky sa podarilo zastaviť pokles izotopickej čistoty D_2O v ťažkovodnom okruhu. V roku 1976 sa práca kolóny stabilizovala, izotopická čistota sa



Histogram izotopickej čistoty v jednotlivých mesiacoch roku 1973

zväčšovala a dosiahla hodnotu 99,26 % mol. Táto hodnota zodpovedala prieniku H_2O do okruhu D_2O asi 0,5 l/deň. Z vlhkosti dodávaného plynu sa do D_2O dostávalo asi 5 kg/mesiac H_2O a z rozložených produktov oleja asi 10 kg/mesiac.

Stanica odstraňovania organických nečistôt

Predpokladaná tvorba organických látok sa v priebehu energetického spúšťania potvrdila. Koncentrácia niektorých organických látok podstatne prevýšila očakávané hodnoty. Zvýšenú tvorbu organických látok možno vysvetliť jednak vyššou úrovňou gama žiarenia v reaktore a ďalej neustálou prítomnosťou stopových a v niektorých prípadoch i vyšších množstiev oleja.

Enormné narastanie množstva organických látok sa zistilo najmä v kondenzátoch okruhu spaľovania traskavej zmesi.

Obsah organických látok sa kvalitatívne a kvantitatívne meral okrem EBO aj v Chemickom ústave UK v Bratislave a na Vysokej škole chemicko – technologickej v Bratislave.

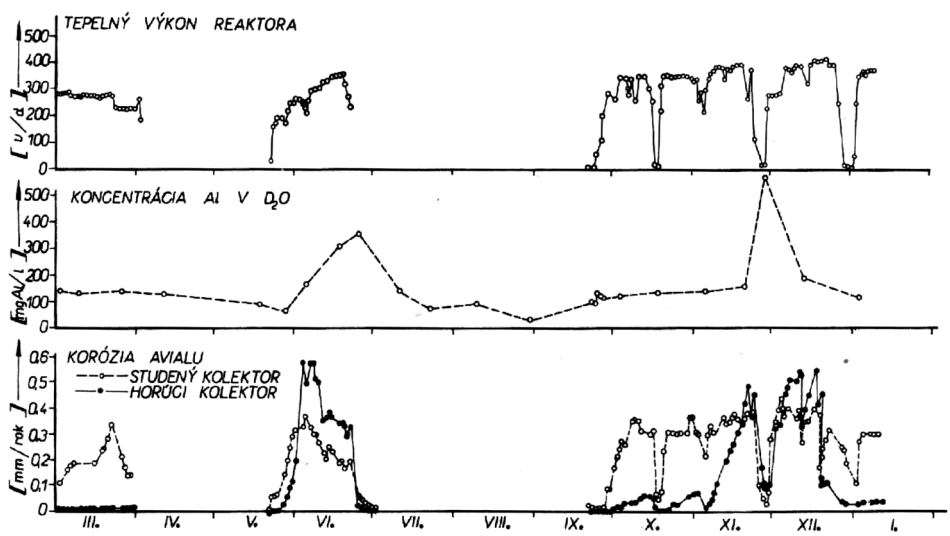
Na odstraňovanie organických látok sa skúšali metódy alkalizácie a následnej destilácie, metóda katalytickej oxidácie v plynnej fáze a čistenie na iontomeničoch. Na základe poloprevádzkových skúšok sa vybrala metóda alkalizácie a destilácie v destilačnej stanici D_2O. Zariadenie bolo vyprojektované, čiastočne vyrobené a dodané, ale po rozhodnutí o skončení prevádzky sa už neinštalovalo.

Korózia avialovej nádoby

Z konštrukčných materiálov ťažkovodného okruhu bola kritickým materiálom zliatina hliníka legovaného ďalšími prímesami (Co, Ni, Cu a iné) – avial, z ktorej bola vyrobená nádoba pre moderátor v reaktore. Podľa koróznych skúšok urobených v EBO a v Škoda Plzeň sa zistila rýchlosť korózie prevyšujúca projektové údaje. Preto sa ešte pred komplexnými skúškami inštalovali do horúceho a studeného kolektora korózne snímače umožňujúce kontinuálne merať koróznu rýchlosť avialu a bol navrhnutý aj inhibítor – deuterizovaná kyselina fosforečná.

Podľa výsledkov merania korózie v období komplexných skúšok a v I. etape energetického spúšťania sa zistilo, že rýchlosť korózie avialu sa zvyšuje s výkonom reaktora. V priebehu II. etapy energetického spúšťania podľa údajov snímačov bola rýchlosť korózie 0,4 až 0,5 mm/rok a vysoká bola aj koncentrácia hliníka v D_2O (570 mg/l). Preto sa začal pravidelne dávkovať inhibítor D_3PO_4.

Korózia avialu sa merala koróznymi snímačmi, meraním koncentrácie hliníka v D_2O a podľa údajov z vyhodnotenia avialových vzoriek a vzoriek tyče systému ochrany a riadenia reaktora. Na základe týchto údajov sa predpokladalo, že stredná korózna rýchlosť vzťahujúca sa na celý avialový povrch je pri prevádzke elektrárne 30 – 50 mikrometrov za rok. Podľa odobratých vzoriek sa zistilo, že rýchlosť korózie je závislá od rýchlosti prúdenia D_2O a najväčšie korózne úbytky majú konštrukčné časti v oblasti spodnej rozdeľovacej dosky (kesónové rúrky).

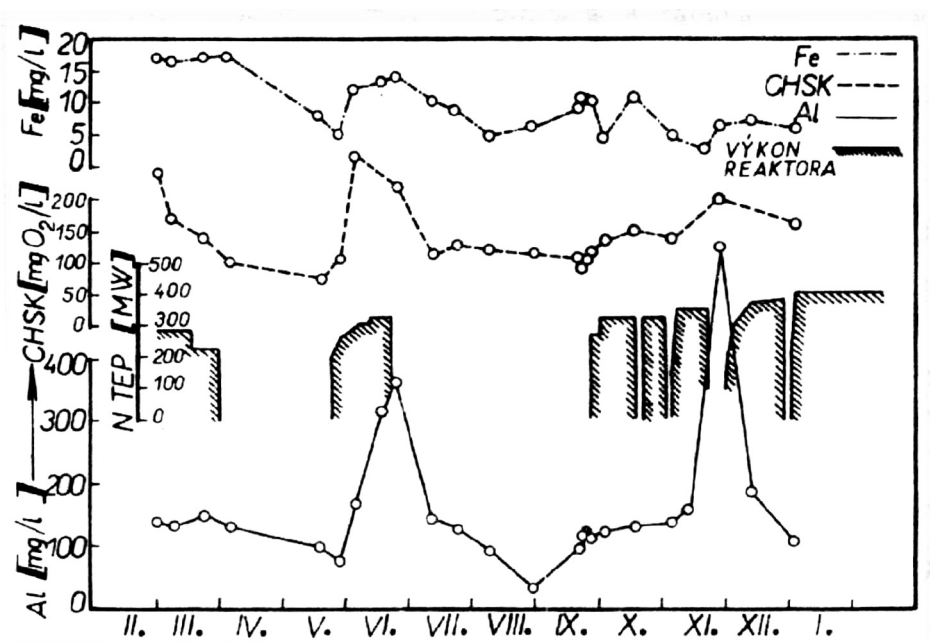


Histogram korózie avialu v jednotlivých mesiacoch roku 1973

Korózia ťažkovodných chladičov

Ťažká voda sa v chladičoch ochladzovala filtrovanou vážskou vodou s obsahom chloridov asi 15 mg/l, ktorá cirkulovala v otvorenom okruhu. Obsah chloridov po zahustení chladiacej vody v okruhu kolísal okolo 40 ÷ 50 mg/l. Podľa projektu sa voda mala upravovať iba dávkovaním hexametafosfátu sodného, ktorý sa ukázal neúčinný a zanášanie výmenných plôch zväčšoval. Teplota teplovýmenných plôch chladičov bola relatívne vysoká (90°C) a bola príčinou vzniku organických látok, ktoré spolu s nerozpustnými látkami tvorili nánosy znižujúce účinnosť chladičov a ktoré boli príčinou štrbinovej korózie rúrok z austenitických materiálov.

Ďalšou príčinou bola chybné zapojenie odvzdušnenia jednotlivých dvojíc chladičov, ktoré spôsobovalo, že chladič s vyššou teplotou nebol celkom zaplnený a na úrovni hladiny bola korózia podporovaná kyslíkom uvoľňovaným odplynením vody pri jej ohrievaní v chladiči. Aby sa zvýšila účinnosť chladičov, začali sa pravidelne chemicky čistiť zo sekundárnej strany. Z používaných kyselín sa ako najúčinnejšia ukázala kyselina citrónová a kyselina mliečna.



Histogram koncentrácie Fe, Al a CHSK v D_2O hlavného ťažkovodného okruhu v jednotlivých mesiacoch roku 1973

Korózii ťažkovodných chladičov a prieniku rádioaktivity do životného prostredia by mohol zabrániť vložený medziokruh chladenia, pretože by sa dal dodržať potrebný chemický režim austenitických ocelí a eliminovať únik rádioaktívnych látok. Dodatočne namontovať medziokruh bolo prakticky nemožné.

Chemický režim vyhorených palivových článkov

Chladenie vyhorených palivových článkov

Na chladenie palivových článkov sa v projekte navrhoval vodný roztok dvojchromanu draselného. Tento inhibítor korózie bol účinný pre oceľové puzdrá palivových článkov, ale bol korozívny pre Mg-Be pokrytie uránových prútikov. V priebehu prevádzky sa ukázalo, že menej korozívny je chroman draselný (K_2CrO_4), pretože pôvodný dvojchroman draselny ($K_2Cr_2O_7$) sa v roztoku menil na chroman draselný na úkor korózie Mg. Koróziu významne zvyšovala prítomnosť CO_2, najmä pri skladovaní palivových článkov v krátkodobých skladoch. Prídavok fluoridu draselného (KF) pri koncentrácii asi 1 g/l znižoval koróziu.

Korózia palivových článkov v krátkodobých skladoch

Pri zavážaní palivových článkov zavážacím strojom do krátkodobých skladov bol palivových článkov chladený pri tlaku plynu 2 MPa a rovnaký tlak sa udržiaval aj v krátkodobom sklade. Po zavezení palivového článku sa tlak CO_2 udržiaval na hodnote asi 0,15 MPa. Pri týchto podmienkach sa významne znížilo pH chladiaceho roztoku a korózia pokrytia uránových prútikov bol približne až 1 mikrometer/h so súčasným vývinom vodíka. Koncentrácia vodíka v CO_2 v krátkodobom sklade bola 3 ÷ 10 %. Nápravnými opatreniami – prefukovaním krátkodobých skladov dusíkom a udržiavaním koncentrácie chromanu draselného v rozsahu 1 ÷ 3 % a fluoridu draselného v rozsahu 0,5 % – sa znížila korózia pokrytia palivových článkov a obsah vodíka v CO_2 sa pohyboval v hodnotách 0,1 ÷ 0,5 %.

Korózia palivových článkov v dlhodobom sklade

Palivové články prevezené z krátkodobého do dlhodobého skladu boli už korózne poškodené a korózia v puzdrách s rovnakých chladivom aké bolo v krátkodobom sklade pokračovala. Následkom korózie sa puzdrá tlakovali a chladiace médium bolo vytláčané do bazénu dlhodobého skladu. Napríklad v máji 1975 bolo v dôsledku tohto procesu zo 162 puzdier úplne prázdnych dvadsať deväť a iba v šesťdesiatich dvoch puzdrách bola nominálna hladina chladiaceho média. Vytláčaním relatívne vysoko aktívneho chromanu draselného do vody bazénu dlhodobého skladu sa zvýšila aktivita tejto vody a bazén musel byť odpojený od chladenia vodou primárneho chladiaceho okruhu. Dovtedy kým sa vyprojektoval a namontoval medziokruh chladenia vody dlhodobého skladu, sa zostatkové teplo z palivových článkov odvádzalo na úkor odparovania vody z hladiny bazénu. Teplota vody v bazéne bola okolo 60°C. Pri tejto teplote sa odparovalo aj chladivo v puzdrách s palivovými článkami. Na zmenšenie odparovania sa na hladinu v puzdre pridával olej s vysokou teplotou varu.

V ďalšej etape sa chroman draselný nahradil organickým chladivom, eutektickou zmesou difenylu a difenyloxidu – dowtermom. Problém s koróziou palivových článkov v puzdrách sa tým celkom neodstránil, pretože palivové články prichádzali korózne napadnuté už z krátkodobých skladov.

Bazén dlhodobého skladu

Vytláčaním chromanového chladiaceho roztoku palivových článkov spôsobeným koróziou a manipuláciami s palivom sa aktivita vody bazénu dlhodobého skladu postupne zväčšovala a bola až okolo 2.10^8 Bq/l. Pri tejto úrovni aktivity boli obmedzené možnosti pobytu obsluhy v dlhodobom sklade a bolo treba aktivitu vody znížiť. Dominantnou aktivitou bolo ^{137}Cs. Na zníženie aktivity vody sa overovali metódy sorpcie na sorbentoch, na ionexoch a spoluzrážanie ferokyanidu meďnatého. Najlepšie výsledky sa získali sorpciou na vločkách ferokyanidu meďnatého a na iontomeničoch.

Pre nedostatok iných možností sa voda z bazénu dlhodobého skladu čistila v technologickom zariadení čistiacej stanice rádioaktívnych vôd, čo spôsobilo celý rad problémov, napríklad:

- provizórne potrubie, ktoré vzniklo prepojením rôznych trás bolo dlhé asi 200 m a napriek tlakovým skúškam a ďalším opatreniam sa

nepodarilo zabrániť úniku týchto vôd do kanalizačných systémov. Následkom toho sa zvýšila aktivita odpadových vôd asi desaťkrát,

- technologické zariadenie čistiacej stanice bolo projektované na príjem vôd, ktorých aktivita mala byť niekoľko MBq/l. Čistením vody, ktorej aktivita bola 200 MBq/l sa podstatne zhoršila radiačná situácia v celom objekte.

V prvej etape čistenia sa aktivita vody znižovala koaguláciou s ferokyanidom draselným a síranom meďnatým. Pretože koagulačný reaktor nebol dostatočne tienený, v druhej etape sa v čistení pokračovalo sorpciou na ionexovej kolóne umiestnenej v miestnosti s dostatočným tienením. Čistenie trvalo približne šesť týždňov a aktivita vody sa znížila asi päťdesiatkrát.

Na základe týchto výsledkov sa rozhodlo doriešiť čistenie vody bazénu dlhodobého skladu samostatným čistiacim okruhom umiestneným v blízkosti skladu. Čistenie sa zrealizovalo až po dvadsiatich rokoch od skončenia prevádzky JE.

Čistiaca stanica aktívnych vôd

Technológiami používanými v čistiacej stanici boli destilácia, koagulácia s filtráciou a sorpcia na ionexoch. Do čistiacej stanice boli zavedené odpadová rádioaktívna voda z hlavného výrobného bloku a voda zo špeciálnej práčovne. Voda mala spravidla nízku aktivitu a na jej vyčistenie postačovala mechanická filtrácia. Len malá časť týchto vôd sa čistila destiláciou.

Problémom rádioaktívnych odpadových vôd z hlavného výrobného bloku v prvých rokoch prevádzky bolo ich nadmerné množstvo. Napríklad do aktívnej kanalizácie boli zavedené aj upchávkové vody z čerpadiel primárneho okruhu. Postupne sa tieto množstvá znižovali a pohybovali sa na úrovni 20 – 40 m^3/deň. I keď tieto množstvá boli asi trikrát väčšie ako sa predpokladalo v projekte, technologické zariadenia v čistiacej stanici rádioaktívnych vôd pracovali spoľahlivo.

Hlavnými problémami tohto objektu boli netesnosti zberných nádrží odpadových vôd a opakované zatopenie spodných podlaží objektu dažďovými prívalovými vodami.

Chladiace okruhy

Už v priebehu jarného obdobia 1973 sa objavila zvýšená tvorba karbonátových usadenín a biologických nárastov na výmenných plochách chladičov oleja, kondenzátorov a ťažkovodných chladičov a ich chladiaci účinok sa zmenšoval. Príčinou usadenín bola pomerne vysoká tvrdosť chladiacej vody a u chladičov s vyššou pracovnou teplotou (chladiče D_2O) aj biologické nárasty.

Na zníženie výskytu mikroorganizmov sa overovali rôzne biocidy typu Lastanox, ktoré boli málo účinné a ekonomicky nevýhodné. Najúčinnejšie bolo chlórovanie vody chlórnanom sodným. Táto úprava sa nedala použiť v chladiacom vežiach primárneho okruhu, pretože by sa zvýšil obsah chloridov a korózia ťažkovodných chladičov.

Na obmedzenie vzniku nerozpustných látok v chladiacej vode sa malo podľa projektu obmedziť dávkovanie hexametafosfátu sodného. Skúsenosti ukázali, že dávkovaný hexametafosfát podporoval vylučovanie hydroxyapatitov s vyššou nerozpustnosťou ako majú samotné uhličitany. Vyzrážaný hydroxyapatit $Ca_5(PO_4)_3OH$ sa tepelne rozkladal a vznikal ťažko rozpustný apatit $Ca_3(PO_4)_2$. Tento problém riešil vypracovaný dodatok projektu, ktorý sa už neuskutočnil.

20. POMOCNÉ OKRUHY REAKTORA

Pomocné okruhy reaktora tvorili tieto systémy:

- chladiaci okruh reaktora,
- okruh spaľovania traskavej zmesi,
- stanica čistenia CO_2.

Chladiaci okruh reaktora

Chladiaci okruh reaktora slúžil na chladenie konštrukčných častí tak, aby ich teplota bola v rozsahu 80 ÷ 120 ^{O}C. Okruh mal kolektor, do ktorého prúdil plyn zo studených častí cirkulačných slučiek primárneho okruhu.

CO_2 z chladiaceho kolektora bol vedený na chladenie telesa reaktora, bočnej tepelnej ochrany a strednej biologickej ochrany, dolnej biologickej ochrany a horúcich nátrubkov reaktora, priestoru pod dnom avialovej nádoby, regulačných tyčí a veka reaktora.

Po ochladení konštrukčných častí sa CO_2 zmiešaval s hlavným prúdom CO_2 a vstupoval do technologických kanálov. Prietoky plynu cez jednotlivé chladiace vetvy sa merali a dali sa regulovať.

Z chladiaceho kolektora bol vedený plyn jednou trasou do kolektora na chladenie palivového článku počas jeho vyťahovania z dochladzovacej zóny reaktora do zavážacieho stroja.

Okruh spaľovania traskavej zmesi

Okruh slúžil na spaľovanie traskavej zmesi – peroxidu D_2O_2 vznikajúceho pôsobením neutrónového a gama žiarenia na molekuly ťažkej vody a na udržiavanie vlhkosti CO_2 v primárnom okruhu. Traskavá zmes bola výbušná pri koncentrácii 12 % D_2 v plyne, povolená koncentrácia bola 3 %. Okruh mal tri rovnaké slučky, z nich dve boli pracovné a jedna v horúcej rezerve. Každá slučka mala vstupný a výstupný kondenzátor, kontaktný aparát a ohrievače plynu.

Traskavá zmes odparená do hornej časti moderátorovej nádoby sa zmiešavala s CO_2. Odtiaľ sa zmes CO_2, peroxidu a ťažkovodnej pary pomocou potrubí odvádzala do vstupného kondenzátora na zníženie vlhkosti a potom do regeneračného ohrievača. Z neho postupovala pri nízkej koncentrácii do parného ohrievača alebo priamo do kontaktného aparátu pri vysokej koncentrácii traskavej zmesi. V kontaktnom aparáte peroxid

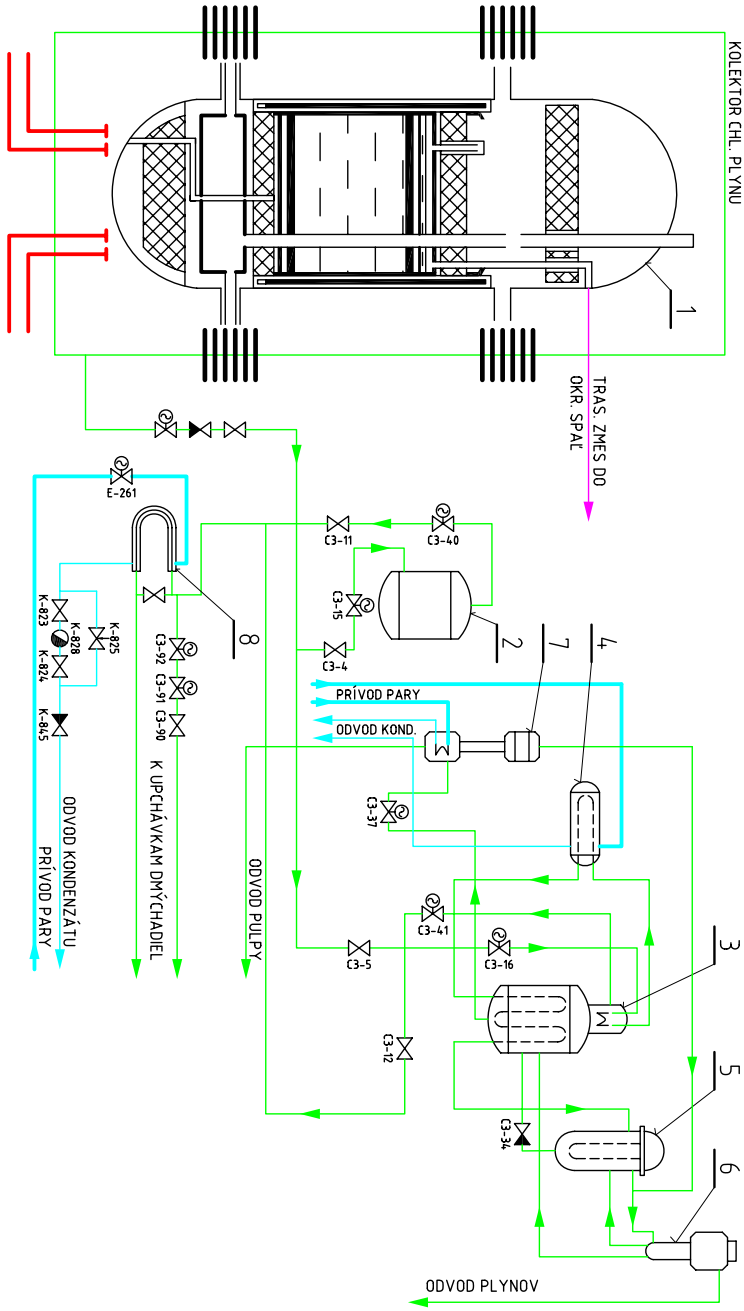


Schéma okruhu spaľovania traskavej zmesi

***Legenda** – 1. reaktor, 2. vstupný kondenzátor, 3. regeneračný ohrievač, 4. pomocný ohrievač, 5. kontaktný aparát, 6. výstupný kondenzátor.*

rekombinoval na paládiovom katalyzátore katalytickým spaľovaním a plyn sa súčasne zohrial zo 125°C na 228°C.

Z kontaktného aparátu postupoval plyn do regeneračného ohrievača a odtiaľ po zohriatí do výstupného kondenzátora, kde sa oddelil CO_2 od D_2O. Plyn bol vedený na satie turbokompresorov a D_2O do horúceho kolektora D_2O.

Stanica čistenia CO_2

Oxid uhličitý cirkulujúci v primárnom okruhu sa neustále znečisťoval produktmi korózie konštrukčných materiálov a rádioaktívnymi látkami, ktoré vznikali aktiváciou látok prechádzajúcich aktívnou zónou a štiepnymi produktmi unikajúcimi cez porušené pokrytie palivových prútikov. Do technologickej schémy primárneho okruhu bol zaradený okruh čistenia CO_2 preto, aby sa nezvyšovala jeho aktivita.

Okruh čistenia CO_2 mal tri slučky, dve pracovné a jednu rezervnú. Režim čistenia bol závislý od tlaku na výtlaku turbokompresorov. Ak bol tlak menší ako 5,5 MPa, plyn sa čistil na porolitových filtroch, kde sa zachytávali pevné častice. CO_2 bol po prefiltrovaní vedený na upchávky turbokompresorov.

Ak bol tlak na výstupe z turbokompresorov väčší ako 5,5 MPa, plyn sa čistil na kondenzačnej stanici. CO_2 sa odoberal na čistenie z kolektora chladiaceho plynu v množstve 12 t/h. Na vstupe do stanice čistenia sa delil do dvoch slučiek v množstve po 6 t/h. CO_2 s teplotou 95 – 105°C vstupoval do predhrievača, kde sa zohrial na 115 – 155°C a odtiaľ vstupoval do rúrkového zväzku odparovača. Tam svojím teplom odparoval kvapalný očistený CO_2. pritom sa ochladil a vstupoval ďalej do kondenzátora, kde sa ešte viac ochladil a skvapalnil pomocou chladiacej vody s teplotou najviac 15 ^{O}C.

Skvapalnený CO_2 sa vracal do medzirúrkového priestoru odparovača, kde sa odparil a súčasne zohrial asi o 2 ^{O}C. Vyčistený plyn bol vedený na satie turbokompresorov, prípadne jeho časť na upchávky turbokompresorov.

Časť plynu z najvyššej časti kondenzátora sa odoberala a viedla na rektifikačnú kolónu, kde sa oddeľovali plynné neskondenzovateľné produkty štiepenia – xenón, kryptón, jód, ruténium a boli vedené do systému odsávania plynového hospodárstva. Skvapalnený CO_2 sa viedol späť do kondenzátora.

V odparovači CO_2 sa jeho odparovaním zhromažďovali nečistoty, ktoré sa odoberali spoločne s kvapalným CO_2 do rektifikačnej kolóny. Neodparené zvyšky s vysokým obsahom D_2O sa viedli periodicky do odplyňovača D_2O.

Na stanici čistenia CO_2 sa mohol čistiť tiež plyn vypúšťaný z primárneho okruhu do plynového hospodárstva. Pre tento účel bolo možné používať počas trvalej prevádzky rezervnú slučku.

Prevádzka

Chladiaci okruh reaktora

V I. etape energetického spúšťania bolo treba predovšetkým nastaviť prietoky CO_2 cez jednotlivé vetvy chladiaceho okruhu. Nastavenie bolo predbežné, pretože pri parametroch I. etapy bol vývin tepla vo všetkých chladených častiach menší ako projektový a prietok sa nedal znížiť jednoduchým spôsobom.

V II. etape energetického spúšťania sa pokračovalo v meraní teplôt chladených častí. Dôležitým výsledkom bolo, že bola dodržaná tepelná symetria reaktorovej nádoby a tak v nej nevznikalo dodatočné napätie. Navrhovalo sa tiež urobiť ďalšie merania, výpočty a úpravy na chladiacom okruhu pred III. etapou energetického spúšťania, pretože zbytočne veľký prietok plynu a tým aj väčšie chladenie znižovali celkovú tepelnú účinnosť elektrárne.

Okruh spaľovania traskavej zmesi

V I. etape energetického spúšťania sa niekoľkokrát zvýšila vlhkosť plynu v primárnom okruhu tým, že v dôsledku rôznych hodnôt tlaku v okruhoch CO_2, D_2O a systému spaľovania traskavej zmesi bola strhávaná ťažká voda z okruhu D_2O priamo na satie turbokompresorov a tým sa zvýšila vlhkosť plynu v reaktore. Pri niektorých prevádzkových režimoch sa zvýšila vlhkosť v primárnom okruhu tým, že do plynového okruhu prenikla voda zo systému spaľovania traskavej zmesi.

Z merania počas II. etapy energetického spúšťania sa zistilo, že traskavá zmes prakticky nevzniká. Voľný vodík bol v CO_2 v množstve menšom ako 0,05 %. Systém spaľovania traskavej zmesi pracoval ako kondenzátor pár D_2O nachádzajúcej sa v plyne v primárnom okruhu. Kondenzovalo aj významné množstva organických kyselín. Analýzou kondenzátu zo vstupného a výstupného kondenzátora sa zistilo, že na

katalyzátore sa spaľujú aj látky obsahujúce ľahký vodík.

Na vstupné a výstupné kondenzátory sa dodatočne namontovali drenážne potrubia s armatúrami s cieľom zlievať kondenzát do osobitných nádob a nevracať ho späť do okruhu D_2O. Umožnilo by to zabrániť rastu koncentrácie organických kyselín v primárnom okruhu a lepšie pozorovať a hodnotiť prácu systému. Zlievanie sa v ďalšej prevádzke osvedčilo.

Vlhkosť plynu na výstupe z systému spaľovania traskavej zmesi bola v rozsahu 400 ÷ 500 ppm, zatiaľ čo v reaktore bola asi o 100 ppm väčšia.

V júli 1974 sa prepojili okruhy systému spaľovania traskavej zmesi a stanice čistenia CO_2. Umožnilo sa tým vedenie CO_2 z výstupu systému spaľovania traskavej zmesi na vstup stanice čistenia CO_2, kde ďalej kondenzovala vlhkosť z plynu. Očakávalo sa, že plyn odvádzaný potom na satie turbokompresorov bude mať menšiu vlhkosť, ako keby sa privádzal priamo z okruhu systému spaľovania traskavej zmesi. Tento predpoklad sa potvrdil a tak sa podarilo odstrániť nežiadúce výkyvy vo vlhkosti plynu.

Stanica čistenia CO_2

Stanica sa uviedla do prevádzky v marci 1974 a jej činnosťou kondenzovala vlhkosť CO_2 idúceho z kolektora chladiaceho plynu. Prevádzka v projektovom režime destilačného čistenia skvapalneného CO_2 bola znemožnená zlou funkciou merania hladiny v kondenzátoroch a v odparovačoch.

Prepojili sa okruhy stanice čistenia CO_2 a systému spaľovania traskavej zmesi. Plyn z výstupu okruhu spaľovania traskavej zmesi išiel na vstup stanice čistenia CO_2, kde znovu kondenzovala voda a znížila sa vlhkosť plynu na satí turbokompresorov.

Rovnako dôležitým hľadiskom, ktoré viedlo k pochybnostiam o prevádzkyschopnosti palivových článkov boli mechanické prímesi častíc ocele, ktoré vznikli nedodržaním montážnej čistoty a následná dlhodobá korózia. Odhadnúť spoľahlivo ich celkové množstvo sa prakticky nedalo. Bolo známe, že spoľahlivá prevádzka palivových článkov si vyžaduje, aby sa takéto oceľové častice (napr. korózne produkty) nezanášali do aktívnej zóny, pretože keď sa zachytili v mriežkach a na mäkkom povrchu palivových prútikov, mohli pri vysokých teplotách vyvolať chemické reakcie.

Úloha teda spočívala v tom, aby sa podľa možností analyzoval plyn,

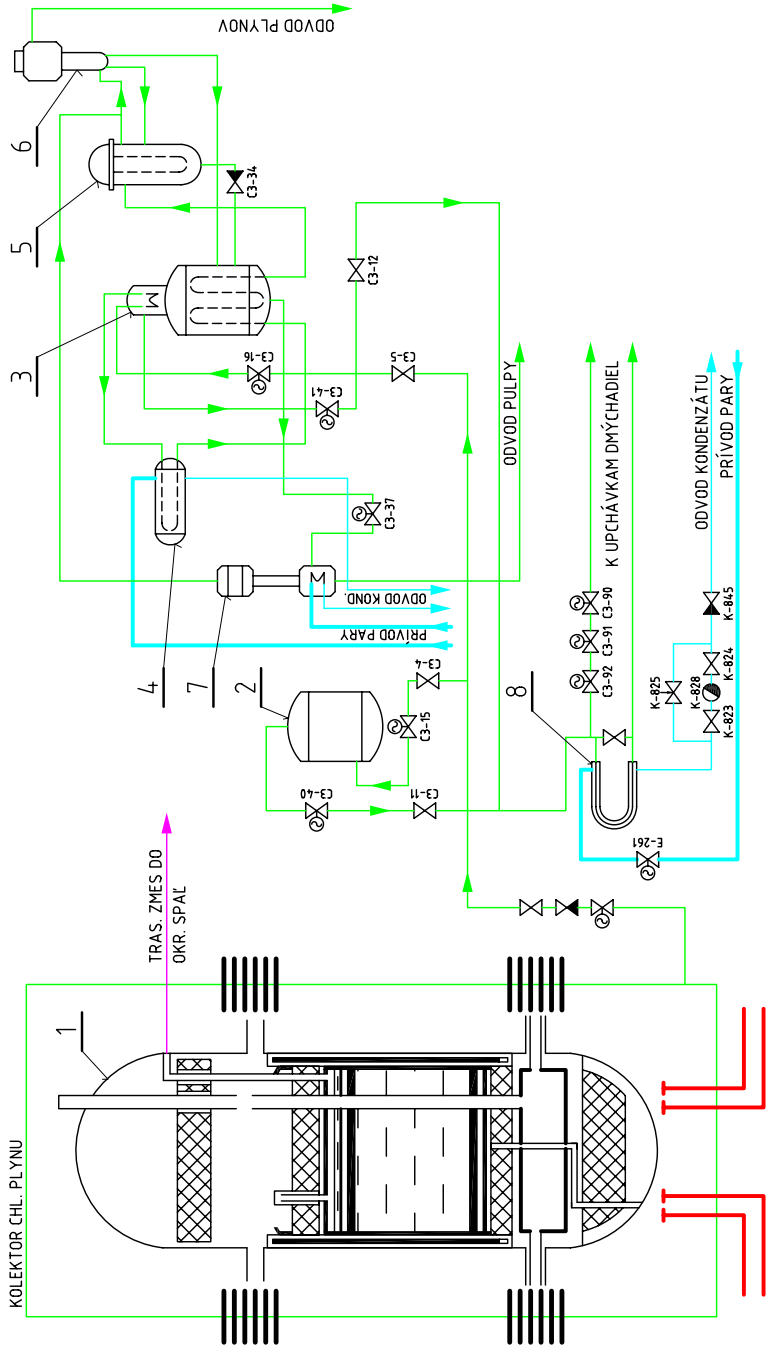


Schéma okruhu čistenia CO_2

Legenda – *1. reaktor, 2. porolitový filter, 3. odparovač, 4. predhrievač, 5. kondenzátor, 6. rektifikačná kolóna, 7. odparovač, 8. ohrievač prečisteného CO_2.*

predovšetkým v podmienkach, kedy mechanické znečistenie okruhu narastalo uvoľnením koróznych produktov pri zmenách prevádzkových teplôt. Pretože neboli k dispozícii východiskové informácie a nebolo možné presne predvídať vývoj udalostí pri uvoľňovaní mechanického znečistenia, prijalo sa viacero opatrení na filtráciu prúdiaceho CO_2 priamo v technologických kanáloch. Uvažovalo sa dokonca o možnom rozšírení systému čistenia CO_2 (filtre, destilácia CO_2), aby bolo možné znížiť znečistenie tohto druhu. Takéto riešenie sa však považovalo za príliš dlhodobé a neperspektívne. Skúsenosť ukázala, že ocenenie rizika spojené s reálnymi mechanickými nečistotami CO_2 bolo správne. Pomocou filtrácie CO_2 v technologických kanáloch sa dosiahla dobrá čistota a tým aj prevádzkyschopnosť aktívnej zóny.

21. VÁŽNE HAVÁRIE V ELEKTRÁRNI A1

Havária s vystrelením palivového článku z reaktora 5. januára 1976

Dňa 5. januára 1976 bola elektráreň v režime dochladzovania po poruche v sieti 220 kV, ktorá vznikla 4. januára 1976 o 11.45 hod. v rozvodni Križovany. Strata napájania dvoch turbokompresorov spôsobila pád havarijných tyčí a odstavenie elektrárne z výkonu 460 MW_{tep}. Vzhľadom na xenónovú otravu nebol reaktor schopný prevádzky do 23.00 hod. nasledujúceho dňa. Zostatkový výkon reaktora v čase vystrelenia článku z kanála H05 (5.1.1976, 11.55 hod.) bol určený na úrovni 0,63 % z výkonu, na ktorom reaktor pracoval pred odstavením, t.j. zostatkový výkon reaktora bol asi 2,9 MW_{tep}.

5. januára bola v programe výmena palivového článku v kanále H05, kde „starý“ PČ dosiahol vyhorenie 5 000 MWd/t. Tento článok bol o 8.35 hod. presunutý do dochladzovacej zóny. O 11.20 hod. sa zavážací stroj č. 1 s novou kazetou automatickým programom spojil s technologickým kanálom H05. Vyhorená kazeta bola vytiahnutá do zavážacieho stroja. Po kontrole tesnosti zátky sa zavážací stroj o 11.45 hod. odpojil od reaktora a presunul sa nad krátkodobý sklad, do ktorého o 11.55 hod. odložil vyhorený palivový článok.

Na reaktore sa v tom čase pripravoval presun nového palivového článku z dochladzovacej do aktívnej zóny. Po pripojení tyče ∅36 mm k tyči ∅20 mm bol palivový článok zdvihnutý žeriavom, aby sa mohol vytiahnuť oporný "C" krúžok, ktorý fixoval osadenie tyče ∅20 mm v jadre tesniacej zátky. Po vykonaní tohto zdvihu sa uvoľnil záver kanála, celý palivový komplet bol vystrelený a z otvoreného technologického kanála začal unikať CO_2 do reaktorovej sály. Trom pracovníkom transportnej technológie, ktorí manipulovali so strojom a žeriavom sa podarilo odísť z reaktorovej sály.

Palivový komplet spojený s tyčou ∅36 mm zavesenou na žeriave narazil na žeriavový most a spadol deformovaný na prekrytie reaktora. Vzápätí bola tlakom CO_2 z kanála vymrštená aj prepúšťacia rúrka. Oxid uhličitý unikajúci z otvoru kanála kritickou rýchlosťou sa expanziou ochladzoval. Počiatočný únik bol odhadnutý na 230 t/hod.

Zmenový inžinier vyhlásil o 11.58 hod. poplach a pracovníkov v reaktorovni vyzval, aby z nej odišli. V časti bloku pôsobila i dozimetrická signalizácia prevýšenia povolených hodnôt kontaminácie vzduchu a dáv-

kového príkonu. Analyzátory CO_2 signalizovali zvýšenú koncentráciu vo vzduchu. Väčšinu pracovníkov na neobvyklú situáciu upozornil hluk unikajúceho CO_2.

Bezprostredne pred haváriou boli registrované takéto hodnoty parametrov v primárnom okruhu:

tlak v primárnom okruhu	4,25 MPa,
tlakový spád na reaktore	0,182 MPa,
teplota na vstupe do reaktora	110°C,

Chladenie reaktora zabezpečovali turbokompresory č. 2 a č. 5 pracujúce na 3 000 ot/min a turbokompresory č.1 a č. 6 na 600 ot/min. Turbokompresor č.1 bol o 11,50 hod. odstavený kvôli odstráneniu netesnosti na olejovom systéme, turbokompresory č. 3 a č. 4 boli od 4.1.1976 v oprave kvôli závade na spojke tachodynama.

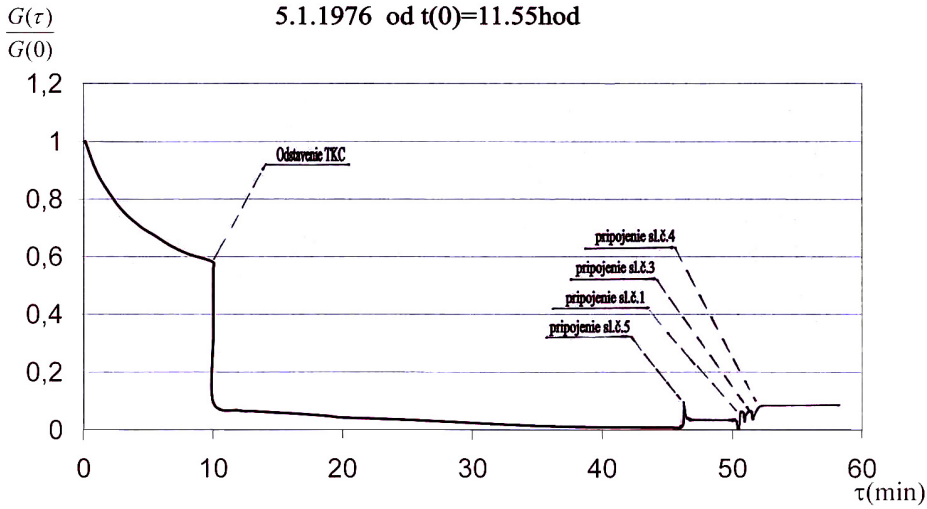
Množstvo unikajúceho chladiva hneď po roztesnení kanálu (11.55 hod.) bolo odhadnuté na približne 70 kg/s. Časový priebeh prietoku cez aktívnu zónu počas havárie bol vypočítaný v analýze. V priebehu štyridsiatich piatich minút od roztesnenia kanála poklesol tlak v chladiacom okruhu na 2 – 3 kg/cm^2. Prietok chladiva cez aktívnu zónu počas prvých desiatich minút od začiatku havárie poklesol asi na 55 % z počiatočnej hodnoty.

Základným úmyslom obsluhy blokovej dozorne posilnenej denným personálom bolo zabezpečiť dochladzovanie reaktora a usilovať o zastavenie úniku plynu z reaktora. Predovšetkým sa od reaktora oddelili slučky nepracujúcich turbokompresorov č. 1, č.3, č.4, aby sa zachovala zásoba CO_2. Na zvýšenie bezpečnosti napájania turbokompresorov operátori spustili dieselgenerátory.

Z obavy pred nedostatočným mazaním vysokotlakových ložísk turbokompresorov č.2 a č. 5 pracujúcich na 3 000 ot/min boli tieto turbokompresory prepnuté na 600 ot/min, pričom turbokompresor č. 5 sa nepodarilo previesť na 600 ot/min a bol dočasne zastavený. Prechod na 600 ot/min spôsobil okamžité päťnásobné zníženie intenzity chladenia aktívnej zóny a rast teploty palivových prútikov.

Od 12.05 hod. bol reaktor chladený turbokompresormi č. 2 a č. 6 na 600 ot/min. Vzhľadom na zastavenie turbokompresora č. 5 bola slučka č. 5 oddelená od reaktora.

Teplota uránu i CO_2 na výstupe z palivových článkov začala rýchlo stúpať. Podľa rýchleho výpočtu sa zistilo, že pri poklese tlaku na atmosférický tlak je možné reaktor dostatočne chladiť aspoň dvoma turbokompresormi pracujúcimi na 3 000 ot/min. Preto bol o 12.15 hod.



Pomerný prietok CO_2 cez reaktor pri prvej havárii

daný príkaz na rozbeh turbokompresora č. 6 opäť na 3 000 ot/min. Pohon turbokompresora však vypol pre závadu v ovládaní. Neúspešné spúšťanie sa opakovalo znova o 12.31 hod. 12.38 hod. a 12.44 hod.

Vzhľadom na stúpajúcu teplotu bola o 12.41 hod. pripojená k reaktoru slučka č. 5, čím tlak v reaktore vzrástol na 0,5 MPa. Pretože slučka sa pripojila zo strany studených sekčných armatúr, prejavilo sa i čiastočné zníženie teploty. V tomto čase už začali pokusy utesniť technologický kanál H05 zavážacím strojom. Utesňovať sa dalo iba priamym ovládaním zavážacieho stroja s odhadom jeho polohy nad reaktorom. Zameriavacia značka bola omývaná unikajúcim CO_2, ktorý vyvolával lom svetla, preto sa poloha nedala určiť presne. Na druhý pokus asi o 12.46 hod. zavážací stroj na otvorený kanál dosadol. Súčasne bola pripojená slučka č. 1 s tlakom 2,5 MPa. S diaľkovým ovládaním studenej sekčnej armatúry boli problémy, preto bola slučka pripojená zo strany horúcej sekčnej armatúry.

Expanziou plynu do komory horúceho plynu sa zmenšil prietok, čo spolu s utesnením kanála H05 spôsobilo stúpanie teploty uránu i teploty CO_2 na výstupe z reaktora. Stúpanie teploty signalizovala varovná signalizácia na mnemotable a zaznamenali ju aj registračné prístroje v blokovej dozorni. Preto sa o 12.47 hod. pripojili ešte slučky č. 3; tlak v reaktore stúpol na 1,05 MPa a o 12.50 hod. bola pripojená slučka č. 4. Tlak v reaktore stúpol na 1,22 MPa.

O 13.04 hod. sa definitívne podarilo spustiť turbokompresor č. 6 na 3 000 ot/min, čím teploty klesli na 115°C. Potrebné manipulácie sa robili

i na ostatných zariadeniach, ktoré prispievali k chladeniu aktívnej zóny reaktora – na parogenerátoroch a okruhu D_2O.

Spustením turbokompresora č. 5 o 13.05 hod. na 3 000 ot/min a turbokompresora č. 1 o 14.00 hod. sa zabezpečilo chladenie aktívnej zóny . Tlak v primárnom okruhu sa doplňovaním udržiaval na 0,9 MPa.

Utesnenie technologického kanála H05 zavážacím strojom sa spočiatku podľa signalizácie hlavice zdalo nedostatočné, ale vo večerných hodinách hlavica sama dosadla a zavedenie nebolo treba korigovať. Tým bola základná odozva na haváriu zvládnutá.

Vystrelený palivový článok z kanála H05 na podlahe v reaktorovej sále

Následky havárie

Pri prvých prehliadkach sa zistilo, že je poškodený vystrelený palivový komplet, z kanála vystrelená a deformovaná bola aj prepúšťacia rúrka a potrhané lano a závesné zariadenie žeriavu.

Meraním teplôt uránu bola zaregistrovaná maximálna teplota 565°C. Systém kontroly tesnosti pokrytia, ktorý pracoval v neštandardnom režime nesignalizoval úniky štiepnych produktov, preto sa usudzovalo, že poškodenie palivových článkov prehriatím nie je veľké. Ako sa neskôr ukázalo, prehriatím sa poškodilo pokrytie viacerých článkov v centrálnej zóne a na vnútornej hranici periférnej zóny.

Počas havárie sa vo väčšine priestorov elektrárne zhoršila radiačná situácia. Prístrojmi KAKTUS s ionizačnými komorami sa o 12.10 hod. zistil príkon dávky gama žiarenia v reaktorovej sále 100 μGy/h, pričom povolená hodnota bola vtedy 27 μGy/h. Asi po jednej minúte sa zvýšila koncentrácia rádioaktívnych plynov v reaktorovej sále na hodnotu $1{,}4.10^{6}$ Bq/m^3; povolená hodnota bola vtedy $7{,}4.10^{4}$ Bq/m^3. Oneskorenie bolo spôsobené transportným časom vzorky do meracej komory. Zvýšené hodnoty koncentrácie rádioaktívnych aerosólov sa neskoršie namerali aj v obslužných chodbách. Koncentrácia prevyšovala vtedy povolenú hodnotu 7,4 Bq/m^3 a dosiahla až $1{,}85.10^{3}$ Bq/m^3.

Ventilačné systémy elektrárne pracovali v riadnom režime a kontaminovaná vzdušná zmes sa odvádzala najmä ventilačným komínom. Rýchlosť emisie rádioaktívnych plynov z ventilačného komína bola vyhodnotená na $1{,}11.10^{11}$ Bq/hod. Celková aktivita výpustí za dvadsaťštyri hodín bola $3{,}37.10^{11}$ Bq rádioaktívnych plynov a $4{,}5.10^{9}$ Bq rádioaktívnych aerosólov. Povolené hodnoty pre vypúšťanie ventilačným komínom vtedy boli $3{,}7.10^{12}$ Bq/24hod pre rádioaktívne plyny a $3{,}7.10^{9}$ Bq/24hod pre rádioaktívne aerosóly.

Vypustené rádioaktívne plyny podľa prepočtu spôsobili maximálnu efektívnu dávku 1.10^{-8} Sv na jedného obyvateľa na území do vzdialenosti 25 km od elektrárne. Vtedy povolená individuálna dávka na jednotlivca z obyvateľov bola 5 mSv/rok.

Povrchová kontaminácia v rozsahu od jednotiek Bq/cm^2 až po hodnoty $1{,}1.10^{5}$ Bq/cm^2 sa zistila v reaktorovej sále. Kontaminácia sa začala odstraňovať bezprostredne po stabilizácii situácie a do 20. januára 1976 bola odstránená natoľko, že ďalšia práca bola možná s použitím normálnych ochranných pomôcok.

Na zistenie stavu paliva v reaktore sa podrobne analyzovali záznamy registračných prístrojov a porovnali sa s vypočítanou rekonštrukciou priebehu prechodového procesu. Ďalej sa využili všetky možnosti prehliadky technologického kanála H05 endoskopom. Stav vystrelenej prepúšťacej rúrky bol vizuálne zistený v horúcej komore a tiež začal program sústavného poradiačného výskumu palivových článkov, počínajúc článkami s najvyšším zvyškovým výkonom.

Príčina havárie

Príčina bola od začiatku jasná. Tesniaca zátka kompletu nemohla byť v technologickom kanáli dobre uzamknutá.

Jednou z príčin mohlo byť cudzie teleso medzi telesom tesniacej zátky a maticou, ktorá tak nemohla dosadnúť na teleso zátky a preto nebol palivový článok dostatočne fixovaný. Pri kontrole tesniacej zátky sa neskôr zistilo, že poistka proti uvoľneniu hlavy závrtnej skrutky s imbusovou hlavou sa sama uvoľnila a vyskočila. Dve z troch týchto poistiek chýbali. Dodatočnou kontrolou ďalších zátok pripravených na zavážanie do reaktora sa zistilo, že aj na ďalších siedmich zátkach boli poistky imbusových skrutiek uvoľnené.

Prvotnú príčinu zlyhania záveru sa nepodarilo jednoznačne zistiť, ale boli prijaté technické opatrenia na vylúčenie hypotetických príčin havárie.

Dôsledky havárie na technologické zariadenie

Z priamych i nepriamych analýz vyplynulo:

1. Po uvoľnení technologického kanála vytekal CO_2 z komory horúceho plynu z počiatočného tlaku 4,25 MPa kritickou rýchlosťou. Počiatočný prietok bol približne 70 kg/s. Tlak v ústí technologického kanála bol na začiatku 2,3 MPa, časť pretlaku sa spotrebovávala na pasívnych odporoch. Maximálny vonkajší pretlak na kesónovú rúrku H05 bol 0,6 ÷ 0,7 MPa pri teplote steny asi 70°C. Z hľadiska mechanického namáhania kesónová rúrka týmto pretlakom nebola preťažená. Vplyvom teplotných zmien pri výtoku a nasledujúcich dilatácií sa nedalo vylúčiť, že steny kesónovej rúrky boli v smere osi krátkodobo namáhaná cez medzu klzu.

2. Dynamickým účinkom prúdu CO_2 bola „vynesená“ prepúšťacia rúrka, ktorá bola pri montáži reaktora uložená v dolnej časti kanála. To malo pri havárii vplyv na rozdelenie tlakov v dolnej časti reaktora medzi komorou horúceho plynu a priestorom pod avialovou nádobou. Vymrštením prepúšťacej rúrky sa otvorilo prúdenie do otvoreného technologického kanála aj z týchto priestorov a predstavovalo zhruba polovicu množstva vytekajúceho CO_2. Vyrovnávanie tlakov medzi priestorom pod avialovou nádobou, technologickým kanálom a komorou horúceho plynu spôsobili tiež clony v „rukávoch“ horúcich nátrubkov reaktora a viedlo k zníženiu namáhania veka komory horúceho plynu dimenzovaného na vonkajší pretlak. Po uvoľnení prepúšťacej rúrky pôsobil na veko komory horúceho plynu počas 3,5 minúty vnútorný pretlak asi 0,01 MPa. Postupne sa nastavil vonkajší pretlak asi 0,04 MPa, takže konštrukčné namáhanie sa neprekročilo.

3. Z priebehu tlakov sa usudzovalo, že ani tlak na dno ťažkovodnej avialovej nádoby nebol väčší ako konštrukčné medze.

4. Intenzívny účinok prúdu CO_2 na prepúšťaciu rúrku spôsobil jej vyrazenie ústím hornej oceľovej rúrky technologického kanála, ktorá v mieste pre dosadnutie hlavice palivového článku vytvára hrdlo ∅116 mm. Prepúšťacia rúrka mala na hornom konci osadenie ∅118 mm s dĺžkou 16 mm, za ktorým bola prinitovaná ako tepelná izolácia rúrka ∅118 mm s hrúbkou steny 3 mm a dĺžkou 72 mm (košieľka). "Osadenie" prepúšťacej rúrky preletelo menším priemerom hrdla technologického kanála a za ním celá prepúšťacia rúrka, avšak košieľka po ustrihnutí nitov v hrdle uviazla. Tento stav sa zistil pri prehliadke endoskopom. Bol to, ako sa neskôr ukázalo, najťažšie riešiteľný následok havárie.

5. Rozdiel vonkajšieho priemeru izolačnej rúrky (košieľky) 118 mm a vnútorného priemeru hrdla kanála 116 mm zodpovedal prekročeniu statickej medze elasticity. Pretože horná rúrka technologického kanála vchádzala práve v oblasti hrdla do avialovej kesónovej rúrky ťažkovodnej nádoby s nulovým rozdielom priemerov, na dĺžke 800 mm sa vzájomne zaklinili.S ohľadom na materiálové vlastnosti avialu a prípustné namáhanie kesónovej rúrky nemohla sa oceľová rúrka vyťahovať silou väčšou ako 3,5 t. Kanál bolo však bezpodmienečne potrebné uviesť do normálneho stavu, pretože stav po vystrelení prepúšťacej rúrky znemožňoval akékoľvek náhradné riešenie.

6. Rozdiely v chladení jednotlivých palivových článkov počas úniku chladiva sa nedali priamo určiť z registrovaných teplôt.

7. Termočlánky vstavané do časti uránových prútov ukázali teploty maximálne 565°C, avšak pri zmenách a neustálených pomeroch prúdenia sa musel predpokladať silný posuv maxima ku koncu prútov, respektíve do oblastí maximálnych zostatkových výkonov. Teploty na výstupe zo šiestich palivových článkov boli vo väčšine prípadov väčšie ako rozsah registrácie 500°C a to asi počas piatich minút.

8. Asi desať minút potom ako v prevádzke na 600 ot/min zostali turbokompresory č. 2 a č. 6, t.j. asi v čase od 12.20 hod., nastavil sa trvalý, lineárny nárast meraných teplôt v palivových prútikoch s gradientami v rozmedzí 0.19 až 0.292°C/s. Veľkosť gradientu

nárastu teplôt uránu závisela od zostatkového výkonu palivového článku. Lineárny nárast meraných teplôt uránu pokračoval asi až do 12.40 hod., kedy sa vplyvom pripojenia turbokompresora č. 5 skokovo zmenilo znamienko gradientu z nárastu na pokles meraných hodnôt teploty uránu, čo bol evidentne aj začiatok obnovovania režimu dostatočného chladenia paliva v reaktore.

9. Z analýzy havárie vyplynulo, že v kritickej fáze priebehu havárie, t.j. asi dvadsať minút pred utesnením kanálu, prebiehal relatívne rovnomerný odvod tepla z paliva, ale chladenie paliva nebolo dostatočné na odvedenie celého zostatkového výkonu, najmä z palivových článkov s vyšším zostatkovým výkonom. V žiadnom prípade sa však palivo netavilo.

10. Extrapoláciou sa dalo odhadnúť maximum teploty plynu na 570°C. S rešpektovaním teplotechnických podmienok jednotlivých kanálov, zo vzťahu záznamu teploty uránu a extrapolovanej teploty CO_2 na jednom z článkov a zo zostatkových výkonov jednotlivých palivových článkov sa vypočítalo, že teplota tavenia pokrytia paliva (asi 650 ^{oC}) sa dosiahla (aj s uvážením chyby pri stanovení vypočítanej hodnoty), alebo prekročila na veľkej skupine asi tridsiatich štyroch palivových článkov z centrálnej oblasti aktívnej zóny. Preto sa urobila poradiačná analýza najviac namáhaných článkov, ktorá uvedené výpočty potvrdila. Na vnútorných radoch palivových článkov, kde pri zníženom chladení boli najmenej priaznivé podmienky odvodu tepla sálaním, sa pokrytie čiastočne roztavilo. Roztavený horčík stekal po prútoch, avšak v pásme tavenia zostal v tenkej vrstve lipnúť na uráne a zamedzil uvoľňovaniu štiepnych produktov z paliva vyhoreného nad projektovú hranicu. Aj po určení „hranice“ palivových článkov s porušeným pokrytím sa s veľkou pravdepodobnosťou očakával zvýšený výskyt porúch ďalších článkov pri porovnaní s predchádzajúcou prevádzkou.

11. Pri prehliadke vytipovaných palivových článkov v horúcej komore elektrárne A1 sa potvrdilo, že natavenie pokrytia palivových prútikov nebolo v mieste maximálneho výkonu, ale bolo presunuté tak, ako to predpokladali výsledky termohydraulických analýz, teda v smere prúdenia chladiva. Ďalej sa spozorovalo, že na uránovom jadre palivových prútikov zostal tenký povlak pokrytia.

12. Z oblasti palivových prútov s porušeným pokrytím sa odobrali vzorky na ďalšie poradiačné materiálové skúmanie v horúcich komorách v ÚJV Řež. Tieto prehliadky potvrdili, že štiepne produkty sa počas havárie zachytili v palive a významným spôsobom nezvýšili aktivitu chladiva v primárnom okruhu nad úroveň, ktorá existovala v reaktore počas prevádzky pred haváriou.

Riešenie následkov havárie na technologickom zariadení

Časť palivových článkov mala po havárii natavené pokrytie a musela sa z reaktora vyviezť. Hneď, ako bolo možné znížiť tlak CO_2 v reaktore na tlak atmosférický, začala prehliadka technologického kanála. Oprava nebola možná bez demontáže pohyblivých častí technologického kanála. Kanál sa však nedal demontovať, pretože bol zakliesnený a dvíhanie pomocou ručného mechanizmu pri použití dynamometra neumožňovalo demontáž povolenou silou. Výpočtom predĺženia technologického kanála v závislosti od sily zdvihu sa zistilo, že zakliesnenie musí byť na dolnom konci technologického kanála v oblasti avialovej nádoby a že preto nie je možné použiť väčšiu silu bez rizika poškodenia kesónovej rúrky.

Endoskopom sa zistilo, že kanál ani avialová rúrka nie sú poškodené, ale v oblasti, kde vonkajšia rúrka technologického kanála zasahuje do hornej časti kesónovej rúrky avialovej nádoby je zakliesnená vonkajšia časť prepúšťacej rúrky technologického kanála.

Oprava nebola možná bez demontáže technologického kanála a demontáž nebola možná bez jeho uvoľnenia z kesónovej rúrky avialovej nádoby. Výrobca aj prevádzkový personál navrhovali rôzne techniky uvoľnenia rozbrúsením, rozrezaním, stenčením hrúbky steny.

Nakoniec sa použil postup, pri ktorom sa zakliesnená časť prepúšťacej rúrky v hĺbke 12,2 m zachytila rozpínacím mechanizmom upevneným na tyči zavesenej na žeriave s dynamometrom. Rozpínací mechanizmus bol utesnený tak, že sa vytvorilo provizórne dno zakliesnenej rúrky. Špeciálnym prípravkom bol potom do miesta zakliesnenia periodicky nalievaný tekutý dusík. Na dynamometri bolo povolené predpätie, takže vždy po naliatí dusíka sa rúra posunula vyššie. Po odparení dusíka sa rúrky opäť zakliesnili, pretože technologický kanál sa zohrieval ťažkou vodou (v avialovej nádobe) cez kesónovú rúrku. Po opakovaných krokoch sa zakliesnená košieľka prepúšťacej rúrky uvoľnila a technologický kanál bolo možné demontovať.

Celý kanál sa znova preveril a hoci sa nenašli žiadne poškodenia, rozhodlo sa reaktor prevádzkovať v budúcnosti bez palivového článku zavezeného do H05. Do H05 sa namontovala nová prepúšťacia rúrka a aby sa znížil pretlak zo strany D_2O na kesónovú rúrku, bola do prepúšťacej rúrky vložená špeciálna zátka skonštruovaná a vyrobená v elektrárni.

Reaktor bolo po tejto oprave možné znovu spustiť a bol v prevádzke až do druhej vážnej havárie vo februári 1977.

Havária s deštrukciou palivového článku v reaktore 22. februára 1977

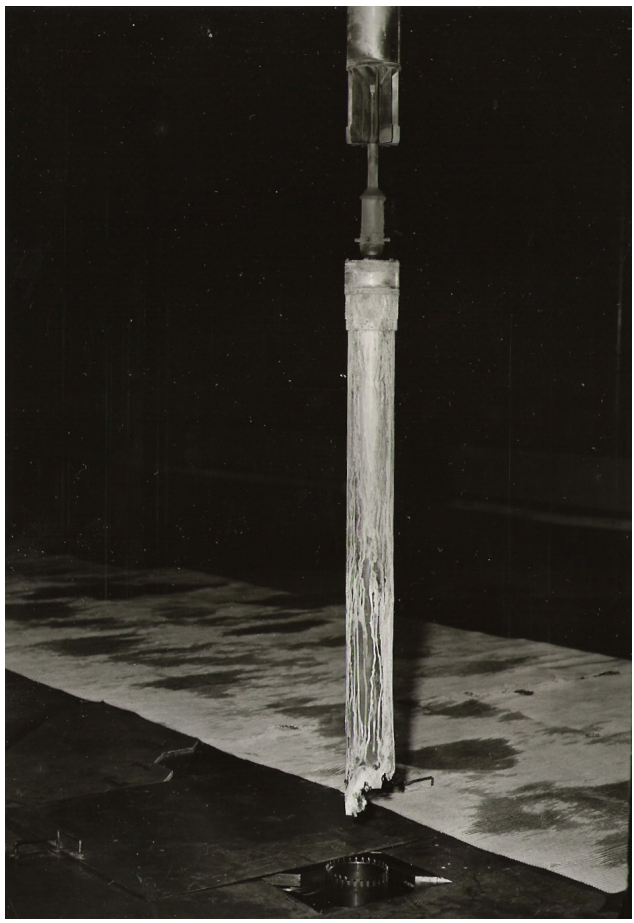
Dňa 22. februára 1977 začala v odpoludňajších hodinách plánovaná výmena vyhoreného palivového článku v reaktore v technologickom kanále C05. Výmena prebiehala pri prevádzke reaktora. V čase výmeny paliva bol elektrický výkon 93 MW. Výmena zavážacím strojom prebehla normálne. Nasledovalo spustenie palivovej kazety zo zóny dochladzovania do aktívnej zóny reaktora. Pri tejto operácii, ktorá začala o 18.13 hod. sa palivový článok prehrial. Následne vplyvom vysokej teploty nastala jeho deštrukcia, ktorá spôsobila poškodenie „kesónovej“ rúrky ťažkovodnej nádoby. Vznikla veľká netesnosť a ťažká voda začala prenikať do plynovej časti primárneho okruhu. Obsluha okamžite odstavila reaktor a urobila operácie na obmedzenie dôsledkov havárie. Vedúci zmeny postupoval podľa havarijného plánu.

Monitorovaním radiačnej situácie sa zistilo, že únik rádioaktívnych látok do okolia nebol významný. Dochladzovanie reaktora bolo bezpečne zaistené a postupne boli obmedzené možnosti ďalšieho rozvoja havárie.

Príčina havárie

Z prvých rozborov priebehu havárie, z údajov meracích prístrojov a z výpovedí personálu sa nedala jednoznačne zistiť príčina. Pri neskoršej analýze sa zistilo, že vo vnútri zátky spodného dielu palivového článku, ktorá sa nachádzala nad kazetou, zostalo z montáže zabudnuté vrecko so silikagélom, ktorý slúžil ako ochrana proti vlhkosti pri skladovaní.

Pri operácii v rámci kompletnej montáže palivového článku sa vrecko roztrhlo a silikagél sa vysypal čiastočne do vnútra palivového článku, čiastočne aj mimo neho. Pracovníci montáže síce pinzetou a vysávačom čiastočne odstránili zrnká silikagélu, ale neskontrolovali, či bol odstránený úplne.



Časť roztaveného palivového článku po vytiahnutí z reaktora

Silikagél, ktorý zostal v kazete, výrazne zmenšil prietokový prierez a tým obmedzil jej chladenie plynom. Pracovníci nedocenili možnosť vniknutia silikagélu do palivovej kazety a hlavne následky. Udalosť nezaznamenali do príslušných protokolov z medzioperačnej a výstupnej kontroly.

Nikto zo skupiny pracovníkov montáže, ktorí o udalosti vedeli, neupozornil pracovníkov prevádzky na to, čo sa stalo pri montáži. Odovzdávací protokol bol podpísaný so záverom, že kazeta je spôsobilá na zavezenie do reaktora.

Ďalšiu chybu urobil zmenový prevádzkový personál. Vedúci operátor, ktorý riadil operáciu zasúvania kazety do aktívnej zóny, nevzal do úvahy závislosť teploty na zasúvanej kazete a potrebnej zmeny výkonu, aby dodržal predpísanú teplotu pri zasúvaní. Po zasunutí kazety do ak-

tívnej zóny dal vedúci operátor pokyn na zvyšovanie výkonu reaktora. Dovolil, aby bolo rozpojené kontinuálne meranie teploty kazety a aby sa skončili všetky potrebné práce na reaktore spojené s výmenou paliva.

Tým, že sa teplota nekontrolovala a operátor reaktora zvyšoval výkon, palivový článok sa prehrial a jeho vysoká teplota spôsobila poškodenie rúrky ťažkovodnej nádoby. Ťažká voda vnikla do plynovej strany primárneho okruhu. Všetky nasledujúce operácie po havárii boli racionálne a správne.

Haváriu nespôsobila chyba technologického zariadenia alebo jeho iné zlyhanie, ale postupné zlyhanie ľudského faktora. Porušili sa prevádzkové predpisy a chyby urobili aj pracovníci pri rozhodovaní.

Následky havárie

Prienik ťažkej vody v množstve asi dvadsaťjedna ton do plynového okruhu a na palivové články v reaktore a porušenie ich pokrytia spôsobili vysokú kontamináciu plynovej časti primárneho okruhu a najmä parogenerátorov. Preniknutá ťažká voda spôsobila poškodenie prakticky všetkých palivových článkov. Preto sa rozhodlo postupne vyviezť z reaktora všetko palivo a uložiť ho v dlhodobých skladoch.

Palivo bolo silne poškodené, odlupovalo sa z neho pokrytie a tým sa zvyšovala aktivita. V primárnom okruhu sa hromadili toxické prvky plutónium, berýlium a urán. Množstvo uvoľneného pokrytia bolo odhadnuté na 150 kg s predpokladanou mernou aktivitou $3{,}7.10^{11}$ až $3{,}7.10^{12}$ Bq/kg a minimálne 100 kg uránu s vyhorením 1 000 až 2 000 MWd/t s mernou aktivitou asi $3{,}7.10^{13}$ Bq/kg a s obsahom plutónia 1,5 g/kg. Celková aktivita rádioaktívnych produktov uvoľnených s pokrytím do primárneho okruhu bola odhadnutá na $5{,}5.10^{14}$ Bq a s uránom na $3{,}7.10^{15}$ Bq a bolo uvoľnených asi 150 g plutónia. Treba zdôrazniť, že toto uvoľnenie nastalo v dôsledku porušenia pokrytia palivových elementov bez významného uvoľnenia do pracovného alebo životného prostredia, pretože dochladzovanie reaktora bolo zabezpečené a integrita primárneho chladiaceho okruhu zostala v podstate zachovaná.

Vplyvom nasledujúceho dochladzovania a zmien v technologickej schéme elektrárne postupne prenikali rádioaktívne látky z primárneho do sekundárneho okruhu, dokonca až do chladiacich veží. Boli prijaté technologické opatrenia na zníženie takéhoto prieniku na minimum a pre maximálne možné riedenie vody v odpadovom kanáli. Zmeny v schéme ťažkovodných okruhov zabránili ďalšiemu uvoľňovaniu trícia do odpadových vôd.

Rozptýlenie štiepnych produktov v primárnom okruhu spôsobilo výrazné zhoršenie radiačnej situácie z hľadiska vonkajšieho žiarenia. Príkon dávky na potrubiach primárneho okruhu vzrástol z hodnôt okolo 400 μGy/h na hodnoty 16 mGy/h až 50 mGy/h na sacom potrubí turbokompresorov a na potrubí primárneho okruhu miestami až na 3 Gy/h. Podobné zvýšenie nastalo na všetkých pomocných okruhoch turbokompresorov vrátane olejového hospodárstva. Významne sa zhoršila situácia v parogenerátoroch, kde sa dovtedajšia hodnota 1 až 2 mGy/h zvýšila až na stovky mGy/h, čo prakticky znemožnilo, aby sa naďalej mohli opravovať parogenerátory. Po vyvezení paliva z reaktora a skončení dochladzovania reaktora sa situácia stabilizovala.

Počas prvých dvoch dní po udalosti boli výpuste z ventilačného komína dva až trikrát väčšie ako denné limity. Aktivita vypúšťaných odpadových vôd však za prvý týždeň po udalosti prekročila povolené hodnoty až 5 000-násobne.

Výpuste rádioaktívnych látok ventilačným komínom a do odpadového kanála.					
Dátum	**22.2.**	**23.2.**	**24.2.**	**25.2**	**26.2.**
Aktivita vzácnych plynov [Bq/24h]	$2{,}74.10^{12}$	$6{,}93.10^{12}$	$1{,}3.\ 10^{12}$	$1{,}48.\ 10^{12}$	$0{,}79.\ 10^{12}$
Aktivita aerosólov [Bq/24h]	$1{,}48.10^{10}$	$1{,}66.10^{10}$	$1{,}06.\ 10^{10}$	$0{,}96.\ 10^{9}$	$0{,}37.\ 10^{8}$
Aktivita vypustenej vody [Bq]	$2{,}97.\ 10^{12}$	$1{,}18.\ 10^{11}$	$2{,}18.\ 10^{11}$	$1{,}44.\ 10^{11}$	$1{,}44.10^{11}$

V čase havárie pracovalo na zmene štyridsaťdeväť pracovníkov, z toho jedenásť v exponovaných miestach sekundárneho okruhu. Najväčší dávkový príkon v mieste pohybu pracovníkov sekundárneho okruhu bol pri nádrži napájacej vody a to 5 mGy/h, priamo na povrchu nádrže 17 mGy/h. Odhadovalo sa, že čas expozície neprevýšil u jednotlivcov dve hodiny.

Všetci prítomní užili antidotum KI – ASB (jodid draselný + aktivovaný síran bárnatý) a osemdesiati pracovníci boli v závodnom zdravotníckom stredisku boli vyšetrení na:

- aktivitu jódu v štítnej žľaze,
- aktivitu trícia v tele,
- celkovú beta-aktivitu moču,
- gama-spektrometrickú analýzu moča.

Prítomnosť ^{131}I bola zistená v štítnej žľaze šiestich pracovníkov, dávkové úväzky boli od 0,25 mSv do 1,4 mSv. Dávkové úväzky z trícia boli u štyroch najviac exponovaných jedincov od 0,1 mSv do 0,4 mSv. U ostatných sledovaných to nebolo viac ako 0,1 mSv. U žiadneho pracovníka teda neboli prekročené povolené hodnoty ožiarenia.

Rádiologická situácia v životnom prostredí v okolí elektrárne sa oproti hodnotám pozadia nezmenila, s výnimkou situácie na vypúšťacom kanáli odpadových vôd do riečky Dudváh. Rádioaktívne látky sa usadzovali na dne kanála a v riasach.

Podľa výpočtov bola u najviac ožiareného jedinca z obyvateľstva v mieste maximálnej prízemnej koncentrácie v dôsledku atmosférického spadu dávka na štítnu žľazu $0{,}34.10^{-6}$ mSv a celotelová dávka z vonkajšieho ožiarenia $0{,}01.10^{-6}$mSv. Tieto hodnoty boli podstatne menšie ako vtedy platné limity. Meranie pozadia priamo v mieste vypočítanej maximálnej prízemnej koncentrácie neukázalo žiadne zvýšenie oproti normálnym hodnotám. Dávkové príkony pozadia boli od 0,12 μGy/h do 0,16 μGy/h.

Vo viacerých článkoch v novinách a časopisoch sa objavili skreslené, neúplné a dokonca aj nepravdivé informácie a haváriách A1. Často sa uvádzalo najmä porovnanie s haváriou v Černobyle. Fakty však hovoria o niečom inom. Nehľadiac na úplne odlišnú konštrukciu JE Černobyľ a JE A1, podstatný rozdiel je v charaktere udalosti. V A1 nenastala neriadená štiepna reakcia, pretože reaktor bol odstavený a palivové články, hoci nedostatočne, ale predsa len boli chladené. Dobrú predstavu o možných následkoch dáva porovnanie veľkosti únikov rádioaktívnych látok. V tabuľke sú porovnané veľkosti únikov rádioaktívnych látok pri iných známych haváriách jadrových elektrární vo svete a množstva rádioaktívnych

Porovnanie únikov rádioaktívnych látok pri haváriách [Bq]						
Rádionuklid/Zdroj	Černobyľ	Skúšky jadrových zbraní	Windscale	TMI	Havária 1976	Havária 1977
					A1 [1])	A1 [2])
^{137}Cs	$8{,}9.10^{16}$	$1{,}5.10^{18}$	4.10^{13}	Nemerané	–	$1{,}7.10^{9}$ [3])
^{134}Cs	$4{,}8.10^{16}$	$< 1{,}5.10^{15}$	1.10^{12}	Nemerané	–	Nemerané
^{90}Sr	$1{,}3.10^{15}$	$1{,}3.10^{18}$	$2{,}2.10^{11}$	Nemerané	$1{,}85.10^{9}$	Nemerané
^{133}Xe	$4{,}2.10^{19}$	2.10^{21}	$1{,}4.10^{16}$	$3{,}7.10^{17}$	$2{,}2.10^{12}$	$1{,}06.10^{13}$
^{131}J	$1{,}3.10^{18}$	$7{,}8.10^{20}$	6.10^{14}	$0{,}001.10^{12}$	$3{,}7.10^{9}$	$4{,}2.10^{9}$
^{75}Zr	–	–	–	–	–	Nemerané
^{144}Ce	–	–	–	–	–	$7{,}6.10^{9}$

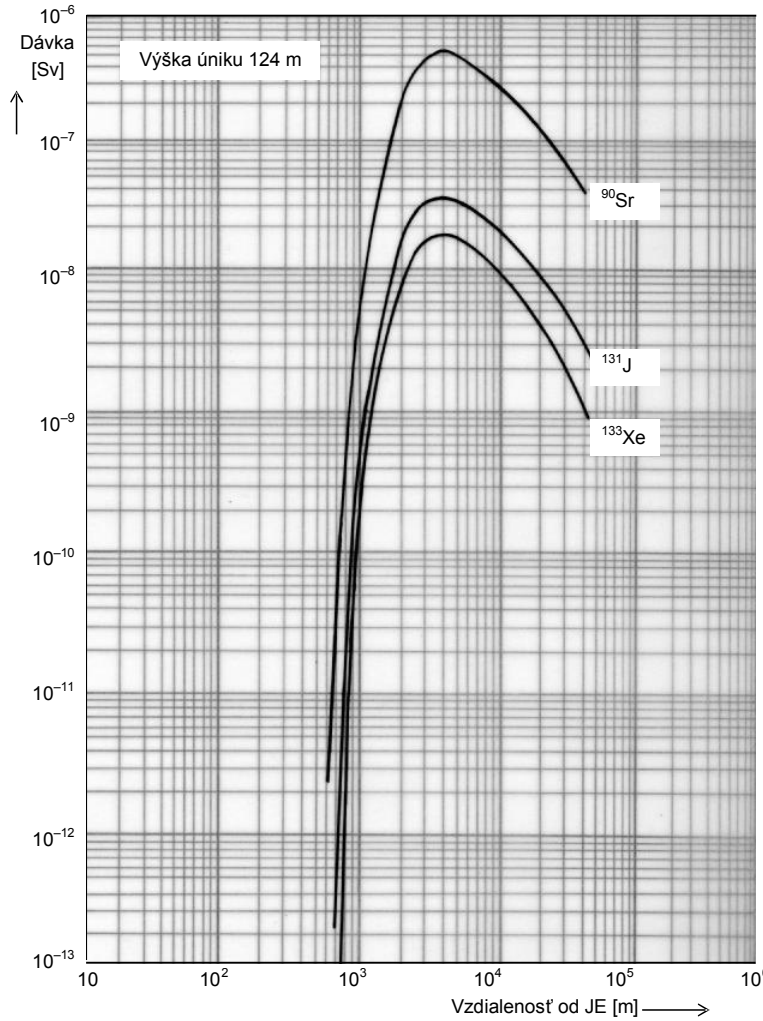
Vysvetlivky.–

[1]) Zdroj – Správa: I. Kubík, E. Hladký, Výskumný ústav energetický: Zhodnotenie radiačných následkov úniku ra-produktov do okolia po havárii A1, 1976.

[2]) Úniky za prvé štyri dni. V ďalších dňoch boli úniky podstatne menšie.

[3]) Odhad z pomeru k ^{131}J podľa analýzy filtrov z ventilačného komína.

Zdroj – Správa o radiačnej situácii v elektrárni A1 v dňoch 22.2. – 4.3.1977. Správa vymenovanej komisie, Jaslovské Bohunice 14.3.1977.

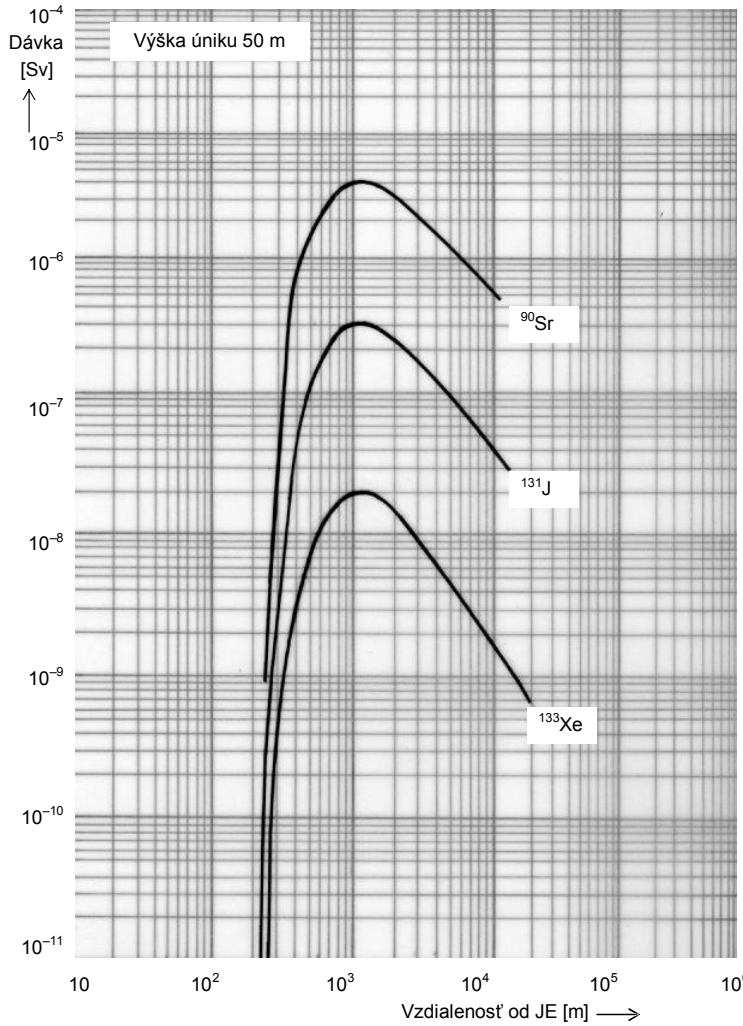


Graf dávok v okolí z výpočtu pre únik vo výške 124 m – havária 5. 1. 1976

látok uvoľnených pri výbuchoch jadrových zbraní. Z údajov v tabuľke je úplne jasné, že veľkosť únikov z havárií v A1 bola podstatne menšia ako napríklad v Černobyli.

Následky havárie na technologické zariadenie

Následky havárie boli zisťované postupne, pričom zistenie poškodenia PČ a avialovej nádoby trvalo najdlhšie. Vďaka vypusteniu D_2O do vysokotlakých nádrží, zdrenážovaniu primárneho okruhu a kondenzácii z plynu bolo stratených asi 5 % D_2O (t.j. cca 3 673 kg), pričom 70 % obsahu si zachovalo pôvodné izotopické zloženie.



Graf dávok v okolí z výpočtu pre únik vo výške 50m – havária 5. 1. 1976

Najvážnejším následkom havárie bola strata celej palivovej náplne. Bolo zistené úplné porušenie pokrytia na palivových prútoch na vstupnej strane do palivových článkov. Preto bolo rozhodnuté vyviezť celú náplň. Táto operácia trvala do 26. júna 1977.

28. júna pri prehliadke havarovanej kesónovej rúrky špeciálnym endoskopom zo susedných kanálov kompenzačných tyčí bolo zistené, že kesónová rúrka C05 bola prepálená. Palivový komplet bol z kanála vytiahnutý žeriavom. Komplet zátok bol bez porúch. Z vlastného palivového článku bol vytiahnutý asi 1 300 mm dlhý kus, v dolnej časti značne zdeformovaný, na konci nerovno upálený. Tento palivový článok bol

prehliadnutý v horúcej komore. Horné časti prútov zostali zachované, dištančné mriežky boli upchaté koróznymi produktami pokrytia z ostatných PČ zanesených cirkulujúcou zmesou CO_2 s D_2O.

Korózne produkty boli zafarbené na čierno, pravdepodobne koróznymi produktmi uránu. Medzi týmito koróznymi produktami boli zistené zvyšky silikagélu, čiastočne spečené do výšky 150 mm nad prvou vrstvou dištančných mreží. Silikagél zostal biely, okrem spečenej hmoty boli nájdené aj jednotlivé granule. Silikagél bol preukázaný aj spektroskopickým rozborom v laboratóriu VÚJE. Spečenie silikagélu svedčilo o pravdepodobnej teplote ~ 1 400°C. Uránové prútiky pod touto distančnou mrežou boli prehriatím a koróziou premenené prakticky na prach.

Ďalšia časť havarovaného palivového článku bola nájdená v podobe kompaktnej taveniny s výškou asi 400 mm v hrdle oceľovej rúrky technologického kanála v mieste jej zaústenia do hornej časti kesónovej rúrky. Kesónová rúrka v strednej časti aktívnej zóny bola voľná. Dolná časť bola vyplnená pórovitými zvyškami oxidovaných uránových prútov, ktoré sa cez lapač samovoľne vysypávali do komory horúceho plynu. Vonkajšia rúrka lapača palivového článku bola na svojom mieste v prepúšťacej trúbke. Funkčná časť lapača sa nenašla, zrejme sa vytavila spolu s uránom. Na dne komory horúceho plynu bola stuhnutá mláka lesklého kovu, pravdepodobne z materiálu pokrytia palivových článkov.

Stav vlastnej kesónovej rúrky bol zistený endoskopom. Celá rúrka si zachovala svoj valcový tvar, iba medzi kótami 1 800 až 2 100 mm odo dna avialovej nádoby bolo zistené neveľké zväčšenie jej priemeru. Jej vonkajší povrch bol zbavený koróznych nánosov, ktoré boli viditeľné na ostatných rúrkach. Medzi kótami 1 180 až 1 796 mm odo dna avialovej nádoby bol zistený rad otvorov v smere osi rúrky. Okraje otvorov boli nerovné, mali charakter trhlín a niektoré natrhnuté okraje boli vychýlené na stranu ťažkej vody. Iba v jednom mieste bol okraj otvoru vychýlený dovnútra (zrejme výtokom ťažkej vody do kanála). Poškodenie vonkajším pretlakom bolo vylúčené.

Riešenie následkov havárie na technologické zariadenie

Konštruktéri ŠKODA navrhli opravu vyrezaním havarovanej kesónovej rúrky, vyformovaním otvorov v dne avialovej nádoby a diaľkovým zavalcovaním novej kesónovej rúrky do dna avialovej nádoby. Technológia bola aj čiastočne odskúšaná, ale pretože československý jadrový program sa preorientoval na tlakovodné reaktory, bolo rozhodnuté neobnovovať prevádzku reaktora A1.

22. NETESNOSTI PAROGENERÁTOROV

Analýza príčin vzniku netesností parogenerátorov

Stále sa opakujúce netesnosti parogenerátorov a zhoršujúce sa podmienky pre opravy boli dôvodom pre rozhodnutie vyrezať jeden U-článok z parogenerátora a urobiť jeho podrobné hodnotenie. Vzhľadom na dávkové príkony bol vybraný parogenerátor č. 5 a U-článok z nízkotlakého prehrievača, druhej sekcie. Na tomto článku bola dovtedy tieto zásahy:

- 9. 4. 1975 bola zaslepená rúrka č. 3 pre netesnosť
- 24. 12. 1976 bol parogenerátor odstavený na odstránenie netesností na rúrkovnici od vstupnej komory. Pôvodné zvary na rúrkovnici boli odfrézované a boli navarené nové vlásenky. Pretože aj po tejto oprave boli zistené netesnosti a preto boli zaslepené rúrky č. 1, 2, 7 a 12.

Počet odpracovaných hodín parogenerátora č. 5							
Rok	**1972**	**1973**	**1974**	**1975**	**1976**	**1977**	**Spolu**
Odpracované hodiny	153	4 335	5 246	1 927	4 073	0	15 734

Od roku 1972 do roku 1976 bol parogenerátor odstavený tridsaťsedem krát pri odstávkach elektrárne, alebo na opravy. Počas prevádzky bolo vyrezaných spolu 45 medzikusov a bolo zistených päťdesiat jeden netesných vláseniek. Podobný stav bol aj na ostatných parogenerátoroch.

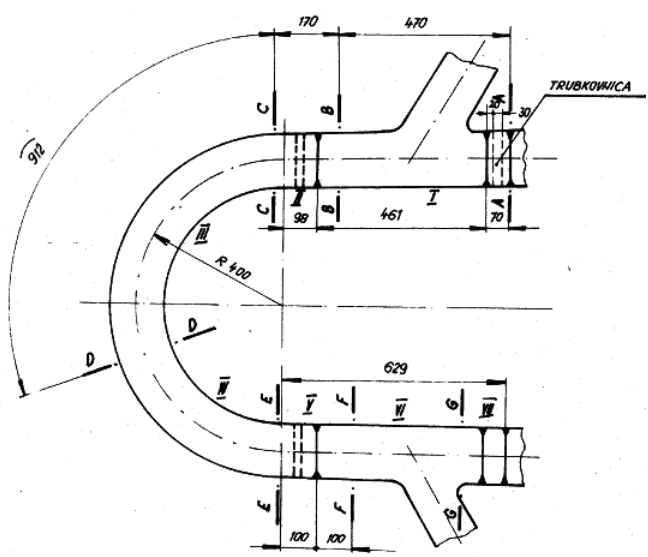


Schéma rezania U – článku parogenerátora

Prehľad počtu netesností parogenerátora č. 5									
Rok	**Druh netesnosti**	**Umiestnenie netesností**							Spolu
		EKO	NTO I°	NTO II°	NTPR	**STOh**	**STOd**	**STPR**	
1973	vyrezané medzikusy	-	4	2	6	1	4	4	21
	vlásenky	-	3	1	8	3	4	-	19
1974	vyrezané medzikusy	-	-	-	-	-	-	-	-
	vlásenky	-	-	-	-	-	-	-	-
1975	vyrezané medzikusy	2	1	2	7	3	-	-	15
	vlásenky	8	1	5	10	1	-	-	25
1976	vyrezané medzikusy	-	-	-	9	-	-	-	9
	vlásenky	-	-	-	7	-	-	-	7

Vysvetlivky: EKO – ekonomizér, NTO I° – nízkotlaký ohrievač 1. stupňa, NTO II° – nízkotlaký ohrievač 2. stupňa, NTPR – nízkotlaký prehrievač, STOh – stredotlakýohrievač, STOd – stredotlaký odparovač, STPR – stredotlaký prehrievač

Pred vyrezaním vybraného U-článku bol celý priestor medzi rúrkami zaliaty parafínom, aby sa zachoval stav. Po vyrezaní sa merali vnútorné rozmery teplovýmenných rúrok a z nich sa počítali hrúbky stien

Pred rezaním U-článku na ďalšie kontroly sa meralo rozloženie rádioaktivity po jeho dĺžke. Najväčšia aktivita bola nameraná na hornej polovici U-článku vo vzdialenosti asi 40 mm od rúrkovnice oproti spojovacej rúrke.

Výsledky prvej vizuálnej prehliadky

Po vyrezaní a vynesení U – článku z parogenerátora sa pri prvej vizuálnej prehliadky zistilo:

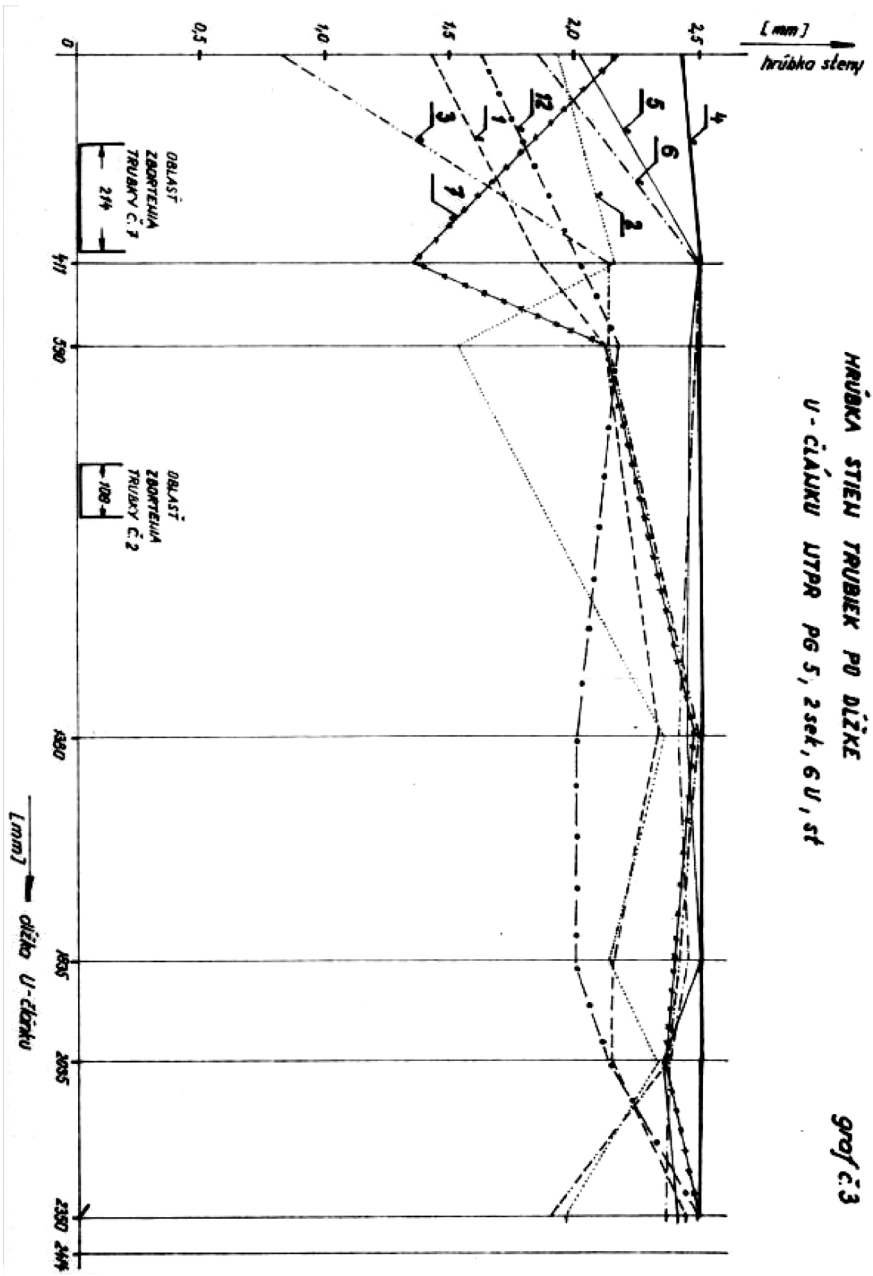
Z oboch strán rúrkovnice sú zaslepené rúrky č. 1, 2, 3, 7 a 12.

Na rúrkovnici výstupných komôr je hrubá vrstva oxidov železa a v úrovni vodorovných osí rúrok č. 17 až 19 boli viditeľné stopy vody, ktorá zostala v priestore medzikusa po vypustení parogenerátora.

Rovnaký stav povrchu bol aj na vnútornom povrchu medzikusa a rúry ∅ 100. Rúrkovnica spodnej časti U-článku bola pokrytá tenkou koróznou vrstvou.

Vnútorný povrch spojovacej rúry ∅ 133 bol pomerne čistý, pokrytý veľmi tenkou koróznou vrstvou.

Stav hornej a dolnej rúrkovnice je na fotografiách 01, 02. Na fotografii 07 je pohľad na výrez č. I po stiahnutí obalovej rúry. Na fotografii 15 je pohľad na rúrkovnicu zo strany plynu. Nie je viditeľné poškodenie.



Hrúbky stien teplovýmenných rúrok

Vizuálna prehliadka obalovej rúry ∅159 a spojovacej rúry ∅133

Po vybratí teplovýmenných rúrok boli podrobne hodnotené jednotlivé výrezy obalovej rúry. Zistilo sa, že obalová rúra ∅159 bola na vnútornej strane pokrytá veľmi jemnou vrstvou oxidov železa, bez príznakov lokálneho poškodenia. Poškodenie nebolo zistené ani na zvaroch.

Podobný stav bol na spojovacej rúre ∅133. Meraním hrúbky rúr sa nezistilo zmenšenie vplyvom korózie. Plošná korózia väčšieho rozsahu bola zistená na vnútornej strane medzikusa a rúre ∅108, v ktorej bola pracovná látka voda, prípadne para. Celkove bol hodnotený stav týchto rúr ako dobrý.

Po tejto prehliadke sa urobila kontrola uloženia rúrok v dištančnom elemente. Nezistilo sa žiadne poškodenie, ktoré by spôsobili tepelné dilatácie, alebo kmitanie rúrok.

Vizuálna kontrola vonkajšieho povrchu teplovýmenných rúrok

Vizuálna kontrola sa robila po jednotlivých výrezoch. Na výreze č. I bol vonkajší povrch veľmi dobrý s jemným koróznym povlakom. Zistilo sa, že je poškodená rúrka č. 7. Bola zbortená vo vzdialenosti 188 mm od rúrkovnice. Dĺžka poškodenia bola 214 mm v dvoch častiach. V prvej, dlhej 214 mm bola jednoduchá preliačina, v druhej 90 mm dlhej dvojitá preliačina. V mieste preliačiny bola rúrka výrazne zoslabená koróziou. Úbytok hrúbky bol väčší ako 1,6 mm. Stav rúrky je na fotografii 11.

Vo výreze č. III bol vonkajší povrch rúrok veľmi dobrý, podobne ako vo výreze č. I. Zistená bola preliačená rúrka č. 2 vo vzdialenosti 727 mm od hornej rúrkovnice. Dĺžka preliačiny bol 108 mm. V preliačenej časti boli dve trhlinky, prvá vo vzdialenosti 61 mm od začiatku preliačiny bola dlhá asi 3 mm, druhá bola 73 mm od začiatku preliačiny a bola dlhá asi 2 mm.

Z charakteru trhliniek sa usudzovalo, že vznikli pri deformácii rúrky. Pohľad na rúrku je na fotografii 20. V ostatných výrezoch neboli zistené poškodenia rúrok.

V ostatných výrezoch sa nezistilo poškodenie rúrok.

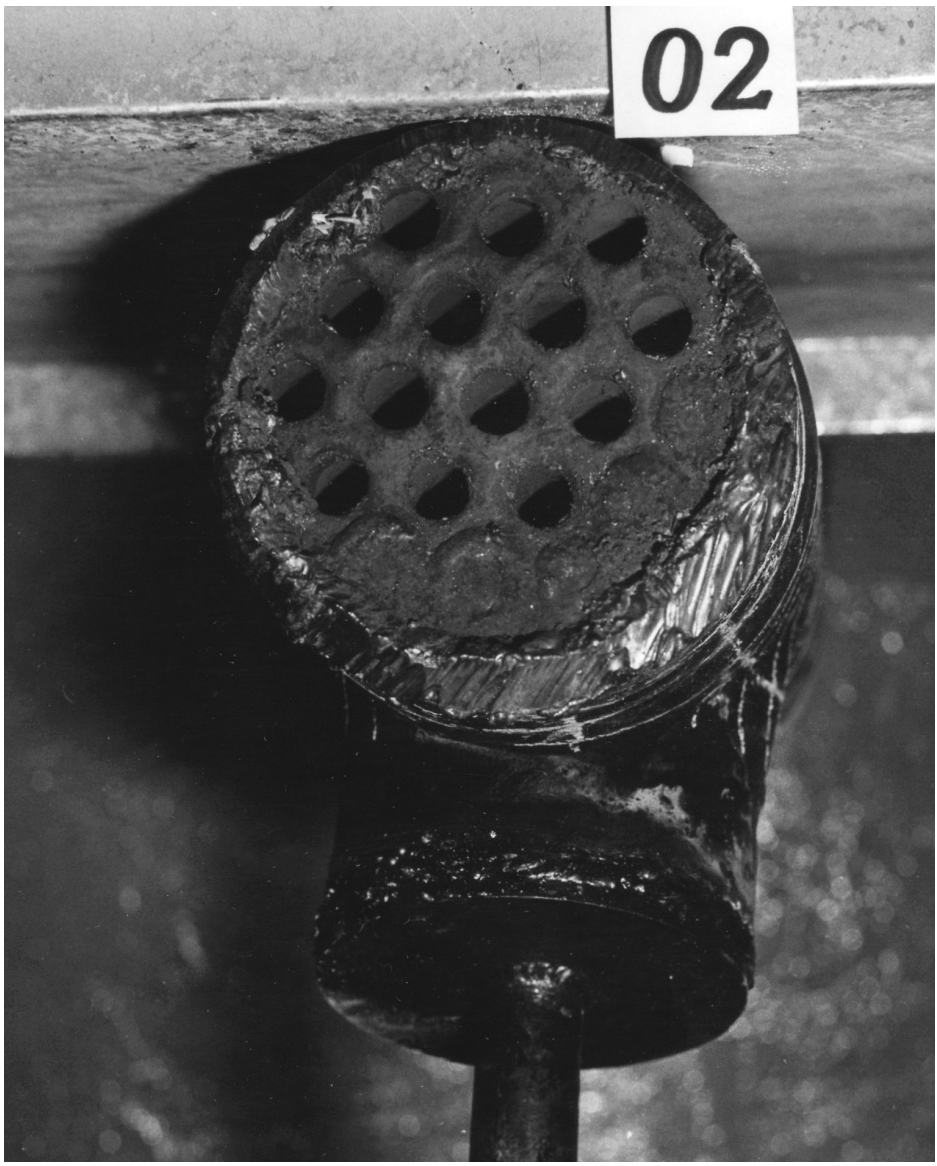
Celkové hodnotenie stavu

Príčinou porúch parogenerátorov boli netesnosti na zvaroch rúrky – rúrkovnica, prienik CO_2 na sekundárnu stranu a vznik korozívneho prostredia. Preliačiny na rúrkach boli spôsobené zoslabením rúrok.

Zdrojom žiarenia v nánosoch na rúrkach a rúrkovniciach boli štiepne produkty uránu. Korózne produkty sa na primárnej strane U-článku usadzovali v priestore hornej rúrkovnici oproti spojovacej rúre. Usudzovalo sa, že netesnosť na jednom zvare rúrka – rúrkovnica spôsobila koróziu a zoslabenie susediacich rúrok. Trhliny na rúrke č. 2 vznikli prekročením medze pevnosti pri deformácii.

Po skončení plánovaných kontrol bol navrhnutý program ďalšieho hodnotenia, vrátane návrhu na vyrezanie viacerých U-článkov z rôznych miest po celej výške parogenerátora. Po rozhodnutí o ukončení prevádzky elektrárne A1 sa však v kontrolách a hodnotení stavu parogenerátorov nepokračovalo.

Pohľad na hornú rúrkovnicu U - článku

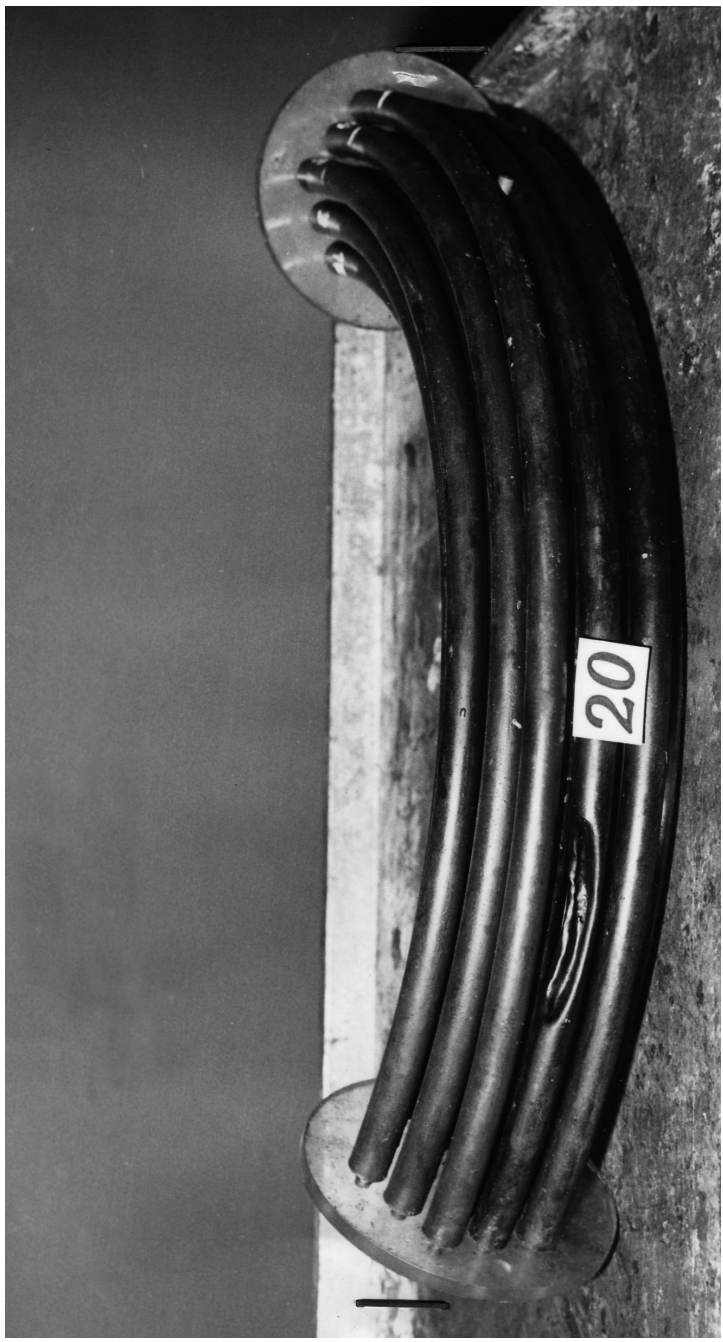


Pohľad na dolnú rúrkovnicu U - článku

Pohľad na výrez č. I po stiahnutí obalovej rúry. V dolnej časti sú usadeniny štiepnych a koróznych produktov.

Detail poškodenej rúrky č. 7

Pohľad na rúrkovnicu zo strany plynu. Nie je viditeľné poškodenie.



Celkový pohľad na rúrky výrezu č. III – je vidieť preliačinu na rúrke č. 2

VYSVETLIVKY:

ČSKAE Československá komisia pre atómovú energiu, predchodca dnešného Úradu jadrového dozoru Slovenskej republiky

ČSR Česko-Slovensko, (často písané aj ako Československo) bol štát v strednej Európe v rokoch 1918 - 1992 (okrem rokov 1939 - 1945). V skratke sa označoval aj Č-SR. Názov sa v období 11.7.1960 - 28.3. 1990 zmenil na Československá socialistická republika/Československo; zaužívaná skratka bola ČSSR. V roku 1990 sa názov zmenil na Česko-slovenská federatívna republika v krátkom tvare Česko-Slovensko. Zaužívaná skratka bola ČSFR.

EBO Elektráreň Bohunice

EGÚ Tanvald Energetický ústav; výskumný ústav v Tanvalde, Česká republika

HREX Hromadný experiment. Súbor testov na overovanie vlastností rôznych typov palivových článkov

HWGCR Jadrová elektráreň s reaktorom v ktorom je moderátorom ťažká voda a chladivom plynný CO2.

IBZKG Prvá brnenská – závod Klementa Gottwalda, podnik v Brne, Česká republika

ITEF Institut teoretičeskoj i eksperimentalnoj fiziky (v ZSSR); výskumný ústav teoretickej a experimentálnej fyziky

KPO Kontrola porušenia obalu; systém na kontrolu porušenia tesnosti pokrytia palivových prútikov

LOCA Havária so stratou chladiva (z anglického Loss Of Coolant Accident)

LOTEP Leningradskoje otdelenie teploelektroprojekta, projektový ústav v Leningrade, ZSSR

SUZ Sistema upravljenija i zaštity, systém riadenia a ochrany reaktora

ŠKODA – ZJS **Škoda** – závod jadrového strojárenstva, podnik v Plzni, Česká republika

ŠKODA – ZVJE **Škoda** – Závod na výstavbu jadrových elektrární, podnik v Plzni, Česká republika

ÚJV Ústav jadrového výskumu

VTI Vsesajúznyj teplotechničeskij institut (v ZSSR); celozväzový výskumný ústav teplotechnický

ZSSR Zväz sovietskych socialistických republík, skrátene aj Sovietsky zväz (po rusky Sojuz sovetskich socialističeskich respublik), bol zväzový štát vo východnej Európe a severnej časti Ázie existujúci v rokoch 1922 až 1991.

DOSLOV

O pomerne krátkej prevádzke jadrovej elektrárne A1 rozhodli v sedemdesiatych rokoch dve závažné prevádzkové udalosti, ktoré boli síce zvládnuté, avšak pre tých menej informovaných, no s výraznou fantáziou, dali podnet na vytvorenie divokých legiend o tom „ako buchlo áčko". V knihe sú vysvetlené obe udalosti, ktoré mali za následok vážne poškodenie technológie. Prvá prevádzková udalosť, pri ktorej bol vystrelený čerstvo zavezený palivový článok do reaktorovej sály, unikol chladiaci plynu, čiastočne bolo poškodené pokrytie paliva, kontaminovaný bol primárny okruh, hlavne parogenerátory, sa odohrala v januári 1976 a znamenala polročnú rekonštrukciu. Druhá prevádzková udalosť, pri ktorej následkom zníženia prietoku chladiaceho plynu bol prehriaty jeden palivový článok a nastala deštrukcia palivového kanálu, sa stala 22. februára 1977. Bola zhodnotená ako udalosť 4. stupňa podľa medzinárodnej klasifikácie udalostí INES (International Nuclear Events Scale) a znamenala následné ukončenie prevádzky. O definitívnom vyradení z prevádzky sa rozhodlo v Uznesení Vlády ČSSR 135/1979 v roku 1979.

Kniha neoslavuje ľudí, ani dobu, ale popisuje zariadenie od jeho výstavby, cez spúšťanie, necelých päť rokov prevádzky, až po jeho odstavenie. Elektráreň je dnes v etape vyraďovania. Pretože je vyraďovaná tzv. „zhavarovaná" jadrová elektráreň, je finančná i časová náročnosť vyššia, ako sa predpokladá napríklad pri elektrárni V-1, ktorá je v súčasnosti v etape ukončovania prevádzky.

Kniha sa nezaoberá problematikou vyraďovania elektrárne A1. Táto činnosť nie je ukončená a dnes ju realizuje špecializovaná štátna organizácia JAVYS, a.s. a financuje Národný jadrový fond SR v zmysle zákona č.238/2006 Z.z. a jeho následných noviel. Pre úplnosť je však potrebné dotknúť sa i tejto oblasti.

V prvých dvoch desaťročiach po rozhodnutí o vyraďovaní, kedy bola elektráreň A1 súčasťou štátneho podniku Slovenské elektrárne, a.s., sa proces vyraďovania musel vyrovnávať s viacerými problémami. Neexistovali ani predbežné plány pre vyraďovanie JE A1. Problematický bol neštandardný inventár rádioaktivity, ktorý bol spôsobený najmä udalosťou v roku 1977, tiež vlastnosťami vyhoreného paliva a spôsobom jeho skladovania. Neexistoval systém financovania vyraďovania, neboli žiadne skúsenosti s vyraďovaním jadrových zariadení u nás. Prvá ucelená dokumentácia pre vyraďovanie JE bola vypracovaná až v roku 1992. Uznesením vlády SR č. 227/92 bola prijatá koncepcia a harmonogram

vyraďovania JE z prevádzky. Uzneseniami vlády SR č. 266/93, č. 524/93, č. 877/94 a č. 649/95 bol tento harmonogram vrátane komplexného postupu odsúhlasený.

Základným špecifikom vyraďovania jadrovej elektrárne A1 je netypický postup vyraďovacích prác. Hlavné dôvody tohto postupu vyplynuli z havárie v primárnom okruhu v roku 1977 spojenej s poškodením jadrového paliva, prácami pri odstraňovaní havárie a z vplyvu poškodeného paliva na systémy skladovania a manipulácie. Samotnému procesu vyraďovania predchádzalo relatívne dlhé obdobie od ukončenia prevádzky.

V roku 1994 bol vypracovaný a Uznesením vlády SR č. 649/1995 schválený prvý projekt, ktorého cieľom bolo do konca roka 2007 dosiahnuť radiačne bezpečný stav v JE A1. Koncom roka 1997 bol projekt vecne, termínovo a finančne prehodnotený. V zmysle dikcie príslušných ustanovení v tom čase platného Atómového zákona č. 130/1998 Z. z. a jeho vykonávacej vyhlášky bola etapa uvedenia do radiačne bezpečného stavu premenovaná na I. etapu vyraďovania. Stav na konci I. etapy bol nanovo charakterizovaný takto: (i) vyhorené palivo používané v reaktore JE A1 bude vyvezené mimo územia SR, (ii) kvapalné RAO s vysokými objemovými aktivitami budú spracované alebo bezpečne preskladnené, (iii) ostatné kvapalné, vlhké ako kaly a sorbenty a pevné RAO budú upravené do matrice vhodnej pre konečné uloženie a uložené v RÚ RAO, alebo v prípade nemožnosti uloženia bezpečne skladované, (iv) dlhodobý sklad vyhoreného paliva bude prázdny, dekontaminovaný a suchý, (v) určené priestory a zariadenia budú dekontaminované, (vi) zdroje potenciálneho ohrozenia životného prostredia budú definitívne odstránené, (vii) neprevádzkované technologické zariadenia a stavebné konštrukcie budú uvedené do takého stavu, aby do realizácie nasledujúceho stupňa vyraďovania nedošlo k nekontrolovateľnému úniku aktivity do okolia.

Určujúcim pre stanovenie priorít v postupnosti vyraďovania jednotlivých prevádzkových súborov a nakladania s RAO v JE A1 je plnenie požiadaviek jadrovej a radiačnej bezpečnosti. Ďalšie plánovanie činností vyraďovania JE A1 vychádza z koncepcie kontinuálneho variantu vyraďovania a detailizuje činnosti pre jednotlivé etapy vyraďovania, začínajúc II. etapou z celkovo piatich etáp. Predpokladané ukončenie vyraďovania JE A1 podľa tohto variantu by malo byť v roku 2033.

Vladimír Slugeň

O autoroch podkladov a spracovateľoch

Bošanský Milan (*1937), absolvent Elektrotechnickej fakulty SVŠT v Bratislave (1960) a postgraduálneho štúdia na ČVUT Praha (1972). Od r. 1961 pracoval v Elektrotechnických závodoch Praha ako projektant. Od r. 1962 pracoval v elektrárni Nováky ako vedúci bloku a neskôr ako zmenový inžinier. Od r. 1967 začal pracovať v JE Bohunice najskôr ako zmenový inžinier poverený zvláštnymi úlohami pri spúšťaní. Od r. 1972 bol vedúcim výroby a údržby JE A1, od r. 1980 bol zmocnenec generálneho riaditeľa GR SEP a od r. 1989 vedúci strediska zahraničných špecialistov pre JE v Československu. V r. 1992 sa vrátil do A1 do funkcie vedúceho útvaru hospodárstva pevných rádioaktívnych odpadov, neskôr bol vedúcim odboru jadrového paliva. Od r. 1997 je na dôchodku a pracuje vo vlastnej firme so zameraním na jadrovú energetiku.

Bařinka Antonín (*1936), absolvent VUT Brno, fakulty elektrotechnickej (1971) a postgraduálneho štúdia na SVŠT Bratislava (1977) v oblasti výstavba a prevádzka jadrových elektrární. Od r. 1971 pracoval v PAL Magneton vo Valašských Kloboukoch. Od r. 1971 pracoval v EBO ako vedúci inžinier automatík. Spolupracoval s Energoprojektom a VZÚP Příbram na dopracovaní algoritmov a príprave vykonávacích projektov automatov dochladzovania v rámci prípravy a realizácie projektu „Konečná koncepcia dochladzovania elektrárne A1“. Bol autorom viacerých technických riešení, okrem iného spolupracoval aj na zaistení zdroja pre skratové skúšky elektrárne V1. Od r. 1978 pracoval v Škoda Praha ako koordinátor montáže a spúšťania V1 a pri výstavbe a spúšťaní V2 ako vedúci odboru spúšťania GDT Škoda Praha. Neskôr viedol spúšťanie a dokončovanie medziskladu vyhoreného paliva v EBO a prípravu spúšťania 1. a 2. bloku EMO. V súčasnosti je na dôchodku.

Feik Karol (*1942), absolvent Fakulty technickej a jadrovej fyziky ČVUT v Prahe (1967). V r. 1976 ukončil postgraduálne štúdium dozimetrie a použitia rádionuklidov na tej istej fakulte. Od r. 1967 pracoval v JE Bohunice ako elektroník. Od r. 1973 bol vedúcim odboru dozimetrie, neskôr hlavným inžinierom. V r. 1987 až 1988 bol námestníkom riaditeľa pre radiačnú bezpečnosť a riadenie akosti. V rokoch 1988 až 1992 pracoval v Atómovej elektrárne Mochovce ako námestník riaditeľa pre jadrovú bezpečnosť a riadenie kvality. Od roku 1993 bol vedúcim odboru jadrovej bezpečnosti a od roku 1997 bol vedúcim odboru dozoru nad bezpečnosťou a ekológie. Špecializoval sa na ochranu pred žiarením, havarijné plánovanie a ekológiu JE. Je spoluautorom vynálezu a priemyselného vzoru dozimetrickej kazety pre osobnú filmovú dozimetriu. Od r. 2003 je na dôchodku.

Jozef Dopjera (*1945), absolvent Fakulty výroba, rozvod a využitie elektrickej energie SVŠT v Bratislave (1968). Po skončení vysokej školy začal pracovať v Elektroporceláne v Čabe pri Nitre. Od r. 1970 pracoval v JE Bohunice vo viacerých funkciách. Po skončení prevádzky A1 pracoval ako vedúci oddelenia, ktorého náplňou bolo uvádzanie nových blokov do prevádzky – V1 a V2 J. Bohunice, JE Mochovce, JE Dukovany. Od r. 1981 pracoval vo VÚJE Trnava s hlavným zameraním na riešenie a budovanie integrovaných overovacích systémov elektrických zariadení. V posledných rokoch pracuje na riešení výmeny elektrických ochrán a vybudovaní diagnostických systémov na všetkých štyroch prevádzkovaných elektrických blokoch JE, vrátane vlastnej spotreby a nadväzností na elektrizačnú sústavu. Spolupracoval na riešení bezpečnostného konceptu časti elektrodostavby 3. a 4. bloku JE Mochovce.

Juraj Kmošena (*1940), absolvent Fakulty technickej a jadrovej fyziky ČVUT v Prahe (1965). Od r. 1965 pracoval v Energetickom ústave, od r. 1968 v JE Bohunice ako vedúci oddelenia fyziky, neskôr bol vedúcim odboru režimov, námestníkom riaditeľa pre prevádzku, riaditeľom EBO (1991 – 1992), námestníkom riaditeľa pre bezpečnosť (1993 – 1994). Od r. 1994 pracoval na generálnom riaditeľstve Slovenských elektrární ako vedúci odboru jadrovej energetiky, od

r. 1996 do konca roku 2003 bol riaditeľom odboru prevádzky JE. Od roku 2005 je dôchodca, od roku 2004 pracuje na čiastkový úväzok pre VÚJE Trnava ako konzultant.

Ladislav Konečný (*1943) Po absolvovaní Vysokej školy chemicko-technologickej v Prahe, špecializácia technológia jadrových palív a rádiochémia (1965) nastúpil do Atómových elektrární Jaslovské Bohunice, kde postupne pôsobil vo funkciách vedúci rádiochemických laboratórií, vedúci oddelenia dekontaminácie a vedúci oddelenia pre prípravu technológií na spracovanie rádioaktívnych odpadov. Od roku 1993 do roku 2008 pracoval v Úrade jadrového dozoru Slovenskej republiky ako riaditeľ odboru rádioaktívnych odpadov a vyraďovania. Podieľal sa na tvorbe legislatívy v oblasti rádioaktívnych odpadov a vyraďovania. Od októbra 2008 pracuje v spoločnosti AMEC Nuclear Slovakia ako špecialista pre nakladanie s rádioaktívnymi odpadmi.

Jozef Mádel (*1940), absolvent Elektrotechnickej fakulty SVŠT v Bratislave (1969). Od r. 1969 pracoval v JE Bohunice. Bol vedúcim odboru merania a regulácie A1, V1, V2. Od r. 1984 pracoval v JE Mochovce ako námestník riaditeľa pre údržbu, od r. 1990 bol vedúcim technického odboru. Koordinoval projekt prípravy pracovníkov prevádzky, neskôr sa venoval príprave údržby. V r. 1993 založil vlastnú firmu, ktorá mala účasť na realizácii technológií súvisiacich s likvidáciou elektrárne A1 a tiež likvidovala jej niektoré časti.

Vincent Petényi (*1941), absolvent Fakulty technickej a jadrovej fyziky ČVUT v Prahe (1967). V r. 1967 – 1976 pracoval v JE Bohunice ako technik. Od r. 1977 bol delimitovaný do VUJE Trnava, v rokoch 1977 – 1981 bol vedúcim oddelenia reaktorovej fyziky, vedúcim odboru reaktorovej fyziky 1981 – 1992 a námestníkom riaditeľa 1992 – 1994. V rokoch 1994 – 2000 pôsobil ako inšpektor jadrovej bezpečnosti na ÚJD SR. Od roku 2000 do súčasnosti pracuje vo VUJE, a. s. ako špecialista.

Štefan Rohár (*1941), absolvent Fakulty technickej a jadrovej fyziky ČVUT v Prahe (1964). V r. 1964 až 1976 pracoval v JE Bohunice ako technik a vedúci oddelenia reaktorovej fyziky. Od r. 1977 bol vedúcim odboru výskumu fyziky a techniky jadrových reaktorov vo VÚJE Trnava, námestníkom riaditeľa pre spúšťanie a prevádzku JE (1981 – 1991) a vedúcim vedeckým pracovníkom (1992 – 1993). Bol vedeckým vedúcim spúšťania všetkých blokov VVER 440/V213 v Bohuniciach a v Dukovanoch. V r. 1993 – 2000 bol hlavným inšpektorom Úradu jadrového dozoru SR. V rokoch 2000 až 2003 bol technickým poradcom pri spúšťaní JE Temelín. Teraz pracuje vo VUJE, a.s. na úlohách súvisiacich s dostavbou JE EMO 34.

Ľudovít Tomík (*1935), absolvent Vysokej školy chemicko-technologickej v Prahe (1960). V r.1961 až 1995 pracoval v JE Bohunice ako vedúci oddelenia resp. cechu chémie zodpovedný za chemické režimy JE, nakladanie s rádioaktívnymi odpadmi a dekontamináciu. V r. 1995 – 2001 pracoval v ÚJD SR v odbore rádioaktívnych odpadov a vyraďovania JE ako inšpektor a v r. 2001 – 2009 v AllDeco resp. AMEC s.r.o. ako špecialista pre dekontamináciu a úpravu rádioaktívnych odpadov.

Jozef Vrbenský (*1927), absolvent Hutníckej fakulty Uralského polytechnického inštitútu v Jekaterinburgu (1952). Po absolvovaní školy pracoval v Strojárskych a metalurgických závodov v Dubnici nad Váhom a od r. 1956 bol riaditeľom Strojární Prakovce. Od začiatku zamestnania vo Výskumnom ústave zváračskom v r.1959 pracoval vo viacerých oblastiach rozvoja zváračskej vedy a techniky. Prispel k osvojeniu technológií a zváracích materiálov pre výrobu tlakovej nádoby reaktora a ďalších komponentov A1 a pri výrobe a montáži zariadení JE V1 a V2 v Bohuniciach, v Dukovanoch a v Temelíne.

Bol členom zváračskej komisie Československej komisie pre atómovú energiu a vedúcim expertnej skupiny československých zváračov pre tvorbu normatívnej technickej dokumentácie pre zváranie v jadrovej energetike v rámci združenia INTERATOMENERGO a členom komisií pre hodnotenie výsledkov prevádzkových kontrol JE EBO a Dukovany. Je

zostavovateľom série bezpečnostných návodov a smerníc (BNS) ÚJD SR. Po odchode do dôchodku v rokoch 1992 až 2000 pracoval ako poradca a expert vo viacerých inštitúciách.

Ján Žembera (*1940), absolvent elektrotechnickej fakulty SVŠT Bratislava (1963), postgraduálneho štúdia ASR (1978) a postgraduálneho štúdia Prevádzka jadrových elektrárni (1982). V r. 1963 – 1966 pracoval vo Výskumnom ústave mechanizácie a automatizácie ako výskumný pracovník. Od r. 1966 pracoval v EBO ako majster, neskôr ako vedúci opráv systému riadenia a ochrany reaktora a ďalej ako vedúci oddelenia merania a regulácie. Od r.1979 bol vedúcim oddelenia údržby zariadení radiačnej kontroly EBO. Od r. 2000 je na dôchodku.

Literatúra:

[1] Správa o I. etape energetického spúšťania, I. a II. diel. (Súhrnná spoločná československo-sovietska správa o príprave a vykonaní energetického spúšťania.) J. Bohunice, marec 1973.

[2] Energetické spúšťanie Atómovej elektrárne A1 II. etapa od 1. marca 1973 do 31. januára 1974. (Súhrnná spoločná československo – sovietska správa). Jaslovské Bohunice, marec 1974.

[3] Prevádzka atómovej elektrárne A1 v období 1.2.1974 – 30.9.1974. (Súhrnná československo – sovietska správa). Atómové elektrárne Bohunice, Jaslovské Bohunice, november 1974.

[4] Prevádzka A1 v období 1.10.1974 – 30.9.1976. (Súhrnná československo – sovietska správa). Atómové elektrárne Bohunice, Jaslovské Bohunice, december 1976.

[5] Kačmáry, Š.: Popis atómovej elektrárne a jej okruhov. Skriptá pre prípravu pracovníkov. Atómové elektrárne Bohunice, Jaslovské Bohunice, 1968.

[6] Ševčík, A.: Hlediska při výběru typu první jaderné elektrárny v ČSSR. Zborník referátov z konferencie Uvedenie elektrárne A1 do prevádzky. SVTS, Bratislava 1974.

[7] Wagner, K.: Regulace a ovládaní reaktoru KS150. Zborník referátov z konferencie Uvedenie elektrárne A1 do prevádzky. SVTS. Bratislava 1974.

[8] Mičánek, Z.: Pomocné okruhy reaktoru elektrárny A1. Zborník referátov z konferencie Uvedenie elektrárne A1 do prevádzky. SVTS, Bratislava 1974.

[9] Grujbár, V., Tomík, Ľ., Konečný, L., Klíma, P., Čepček, Š., Hudec, L., Koštial, J.: Správa o kontrole U–článku PG–5, 6U, 2 sek, St. Atómové elektrárne Bohunice, júl 1977.

[10] Křížek, V.: Parogenerátory pro československou jadernou elektrárnu A1. Zborník referátov z konferencie Uvedenie elektrárne A–1 do prevádzky. SVTS, Bratislava 1974.

[11] Vrbenský, J.: Výstavba A1 a jej vplyv na rozvoj náuky o materiáloch a technológie zvárania. Príspevok pre knihu, 2009.

[12] Vrbenský, J., Zeke, J., Bečka, J.: Utilization of electroslag welding in the production of steel pressure vessels for nuclear reactors. Atomic Energy Review, Vol. 8. No4, 1970, IAEA, Viedeň, 1970.

[13] Hezoučký, F. a kol.: Dve vážne havárie na jadrovej elektrárni A1. Bezpečnost jaderné energie 16 (54), 2008 č. 9/10.