

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

ZDRAVOTNĚ SOCIÁLNÍ FAKULTA

**Vyhodnocení efektivity provozu mechanického vysokoteplotního a
vysokotlakého filtru v JE Temelín**

Bakalářská práce

Autor: Luboš Jaroš

Vedoucí práce: ing. Zdeňka Pávková

2010

ABSTRAKT

Evaluation of the efficiency of operation of a mechanical, high-temperature and high-pressure filter in NPP Temelín.

The primary circuit with the VVER1000–320V reactor installed in the nuclear power plant Temelín represents a world-unique technology in terms of reduction of concentration of corrosion products and activated corrosion products by means of mechanical, high-temperature and high-pressure filters. The technology uses continual filtration and its main advantage is cleaning of the primary coolant at operating parameters, i.e. without any adjustments of pressure and temperature of the filtered coolant. The filter is made of especially treated titanium, whose spongy form improves the required interception of undissolved corrosion products and activated corrosion products on its surface. It contributes to limitation of formation of radiation fields and it favorably affects reduction of the effective dose received by the plant's operating personnel.

In my thesis I have monitored behavior of the corrosion products and activated corrosion products intercepted on the mechanical, high-temperature and high-pressure filters. In the evaluation I have focused on efficiency of operation of one of the selected filters in case of changes in physicochemical parameters in the primary circuit during reactor shutdown and on determination of a potential release of corrosion products and activated corrosion products back into the primary coolant and resulting deterioration of a radiation situation in the proximity of the technological equipment before refueling.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích 6. května 2010

.....

Luboš Jaroš

Poděkování

Touto cestou chci poděkovat ing. Zdeňce Pávkové za vedení a ing. Miroslavu Martykánovi za odbornou konzultaci při zpracování této bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD	7
1 SOUČASNÝ STAV	9
1.1 Výklad pojmů	10
1.2 Popis uspořádání primárního okruhu s reaktorem VVER1000–V320	11
1.3 Skutečnosti ovlivňující tvorbu, transport a usazování aktivovaných korozních produktů v primárním okruhu.....	13
1.3.1 Vliv konstrukčních materiálů.....	13
1.3.2 Vliv pasivace.....	14
1.3.3 Vliv chemického režimu primárního okruhu.....	15
1.3.4 Provozní režimy	18
1.3.5 Kontinuální čištění chladiva primárního okruhu mechanickými vysokoteplotními a vysokotlakovými filtry	19
2 CÍL PRÁCE A HYPOTÉZA	22
2.1 Cíl práce	22
2.2 Hypotéza	22
3 METODIKA	23
3.1 Výběr zařízení a odběrových míst	23
3.2 Vzorkování.....	24
3.2.1 Odběr vzorků	24
3.3 Analýza vzorků	25
3.3.1 Měřené kovy	25
3.3.2 Příprava a úprava vzorků	26
3.4 Měřicí přístroje	27
3.4.1 Gamaspektrometrický systém.....	27
3.4.2 Parametry gamaspektrometrických měření	27
3.4.3 Spektrometr ICP- MS	28
3.5 Technologická data	28
3.5.1 Data z kontinuální měření.....	28
3.5.2 Výpočet vysokoteplotního $Ph_{(T)}$	28

4	VÝSLEDKY	29
4.1	Vysokoteplotní pH _(T)	29
4.2	Fyzikálně chemické parametry během odstavování bloku	29
4.3	Výsledky analýz odebraných vzorků	30
4.3.1	Výsledky chemických analýz (ICP-MS)	31
4.3.2	Výsledky radiochemických analýz (Gamaspektrometrie)	35
5	DISKUZE	37
6	ZÁVĚR	40
7	POUŽITÁ LITERATURA	41
8	KLÍČOVÁ SLOVA	43
9	SEZNAM ZKRATEK	44

ÚVOD

Jaderná energetika se od svého začátku neustále zdokonaluje, což směřuje ke zvyšování výkonu, ale zejména k bezpečnějšímu provozování jaderných reaktorů. Stávající technologie primárního okruhu s tlakovodním reaktorem typu VVER1000-V320 použitá na jaderné elektrárně Temelín je již technologie druhé generace. Skládá se z reaktoru s jaderným palivem, cirkulačních potrubí, hlavních cirkulačních čerpadel, parogenerátorů, kompenzátoru objemu a mechanických vysokoteplotních a vysokotlakých filtrů. Celý systém tvoří uzavřený okruh, ve kterém cirkuluje médium nazývané chladivo primárního okruhu tj. upravená čistá voda. Chemické složení molekuly vody umožňuje, aby voda sloužila jako moderátor (zpomalení rychlých neutronů), k chlazení jaderného paliva a díky své vysoké měrné tepelné kapacitě také k přenosu tepelné energie z primárního do sekundárního okruhu přes výměník tepla tzv. parogenerátor. Voda je zároveň rozpouštědlem, čímž negativně ovlivňuje materiálové složení s dopadem na integritu bezpečnostních bariér.

Základním mechanismem tvorby aktivovaných korozních produktů a formování radiačních polí je proces koroze konstrukčních zařízení nejčastěji na vnitřním povrchu primárního okruhu - v parogenerátorech, hlavním cirkulačním potrubí a vně aktivní zóny reaktoru. Během tomto procesu dochází k tvorbě a uvolňování korozních produktů, které se následně vlivem cirkulace chladiva aktivní zónou a působením toku neutronů aktivují. Postupně dochází k jejich transportu a usazování na povrchu jaderného paliva, teplosměnných plochách parogenerátorů a vnitřním povrchu potrubí technologie primárního okruhu, což má za následek vznik nežádoucích radiačních polí v okolí této technologie.⁽¹⁵⁾

Primární okruh s reaktorem typu VVER1000-V320 zahrnuje ve světě jaderné energetiky jedinečnou technologii zaměřenou na snižování koncentrace korozních produktů a aktivovaných korozních produktů mechanickou vysokotlakou a vysokoteplotní filtrací média primárního okruhu (kontinuální mechanické vysokoteplotní a vysokotlaké čištění chladiva primárního okruhu s technologickým značením TC).

Vzhledem k vysokému tlaku a teplotě za podmínek velké radiační zátěže není účinnost této technologie včetně chování zachytávaných korozních produktů na filtrech dosud důkladně popsána. Sledování vzniku aktivovaných korozních produktů, jejich chování v primárním okruhu a zachytávání ve vysokoteplotních a vysokotlakých filtrech včetně usazování na teplosměnných plochách má velkým význam pro hodnocení radiační zátěže na obslužný personál jaderné elektrárny, ale i na pracovníky dodavatelů při údržbě či opravě jaderného zařízení v průběhu odstávky reaktoru.

Pracuji v laboratoři na jaderné elektrárně Temelín a toto téma jsem si vybral ke zpracování ve své bakalářské práci, protože je úzce spojeno s technologií primárního okruhu a zároveň se dotýká i oblasti radiační ochrany.

1 SOUČASNÝ STAV

Jedním z hlavních úkolů při provozování jaderné elektrárny je zajišťování jaderné bezpečnosti, provozní spolehlivosti a minimalizace kolektivních efektivních dávek personálu elektrárny.

Největší podíl na radiační zátěži a hodnotě kolektivní efektivní dávky pracujícího personálu mají radiační pole v okolí zařízení primárního okruhu, které jsou tvořeny radionuklidy vznikajícími v primárním okruhu při provozu bloku. K těmto radionuklidům patří štěpné produkty, aktivované korozní produkty z konstrukčních materiálů primárního okruhu a radionuklidy vznikající aktivací příměsí a nečistot, které se do okruhu primárního okruhu dostávají dávkováním chemikálií.⁽²⁾

Na tvorbě radiačních polí se podílí především aktivované korozní produkty. Jejich mechanismus vzniku spolu s formováním radiačních polí v okolí zařízení primárního okruhu lze stručně popsat jako proces:⁽¹⁵⁾

- koroze konstrukčních materiálů vně aktivní zóny reaktoru, v parogenerátorech a hlavním cirkulačním potrubí a uvolňování korozních produktů do chladiwa primárního okruhu,
- aktivace korozních produktů a vznik aktivovaných korozních produktů:
 - aktivace korozních produktů při průchodu aktivní zónou reaktoru,
 - aktivace korozních produktů usazených na povrchích palivových proutků a vnitřních vestaveb,
 - aktivace samotných konstrukčních materiálů v aktivní zóně reaktoru,
- uvolňování aktivovaných korozních produktů z povrchu palivových proutků a ostatních komponent aktivní zóny reaktoru do chladiwa primárního okruhu,
- transportu aktivovaných korozních produktů spolu s chladivem primárního okruhu a jejich usazování na teplosměnných plochách primárního okruhu.⁽¹⁵⁾

Hlavními zdroji radioaktivity na teplosměnných plochách primárního okruhu jsou především radionuklidy korozních produktů konstrukčních materiálů, jež

v průběhu odstávek tvoří 80 - 90% radiační zátěže obsluhujícího personálu. Nejvýznamnějším radionuklidem v reaktorech typu VVER je Co-58 (poločas rozpadu 71,3 d) vznikající z Ni-58 reakcí (n,p) na rychlých neutronech. Dalšími radionuklidy korozních produktů jsou především Mn-54, Fe-59, Cr-51, Co-60 a Mn-56.⁽¹⁾

Dosahování co nejnižších koncentrací aktivovaných korozních produktů a následně tvorby radiačních polí patří mezi důležité cíle, které vedou k požadované minimalizaci kolektivní efektivní dávky pracujícího personálu v okolí zařízení primárního okruhu, to je ovlivněno zejména:

- výběrem vhodných konstrukčních materiálů přicházející do styku s chladivem primárního okruhu,
- pasivací vnitřních povrchů primárního okruhu,
- udržováním chemického režimu primárního okruhu,
- kontinuálním čištěním chladiva primárního okruhu mechanickými vysokoteplotními a vysokotlakovými filtry.

1.1 Výklad pojmů

Aktivované korozní produkty - korozní produkty, které v sobě nesou radioaktivní nuklid. Vykazují stejné fyzikálně-chemické vlastnosti jako korozní produkty stejného chemického složení. Riziko představují svojí radioaktivitou. V případě jaderné elektrárny s blokem VVER to jsou především radioizotopy prvků Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Zr, Nb, Ag, As, Sb, které představují dominantní zdroje pro radiační zátěž personálu.⁽⁷⁾

DISSER – matematický model transportu korozních produktů.⁽¹⁵⁾

Chemický režim – složení chladicího média primárního okruhu z hlediska vlivu na jadernou bezpečnost, provozní spolehlivost, ekonomiku technologického procesu a na konstrukční materiál zařízení.⁽¹⁾

CHEMIS – databáze sloužící k řízení chemických režimů, monitorování a hodnocení stavu pokrytí paliva, provádění výpočtů definovaných parametrů, evidenci vzorků a analýz a provádění radiochemických měření. Do databáze CHEMIS je možné vkládat data z kontinuálních měření. Výstup dat je nezávislý na způsobu jejich získání tj. kontinuální i laboratorní data se vypisují resp. zobrazují v grafech nebo diagramech stejným způsobem.⁽⁹⁾

Korozní produkty - nežádoucí formy pocházející z koroze konstrukčních materiálů. Vyskytují se v pevné nebo rozpuštěné formě, nerozpuštěné jsou lehce stíratelné, případně pevně ulpívající na povrchu nebo existují v prostředí ve vznosu. Vznikly degradačními korozními procesy konstrukčních materiálů. Korozní produkty podléhají transformacím jako jsou chemické reakce, rozpouštění, srážení, transport, shlukování, rozpad shluků, sorpce či desorpce a transmutace.⁽⁷⁾

Provozní režim – podmínky pro provozování bloku definované tlakem, teplotou a výkonem.⁽¹⁾

Palivová kampaň – časový úsek provozu reaktoru mezi výměnami jaderného paliva.⁽¹¹⁾

Primární okruh – primární (první) okruh slouží k přenosu tepelné energie z aktivní zóny do parogenerátoru. V parogenerátoru se předává teplo sekundárnímu (druhému) okruhu. Jedná se o uzavřený systém, který brání úniku radioaktivity vně tohoto systému. Primární okruh tvoří reaktor, parogenerátor, kompenzátor objemu a cirkulační čerpadla.

Radiační pole – mapa prostorového rozložení dávkového příkonu.⁽⁴⁾

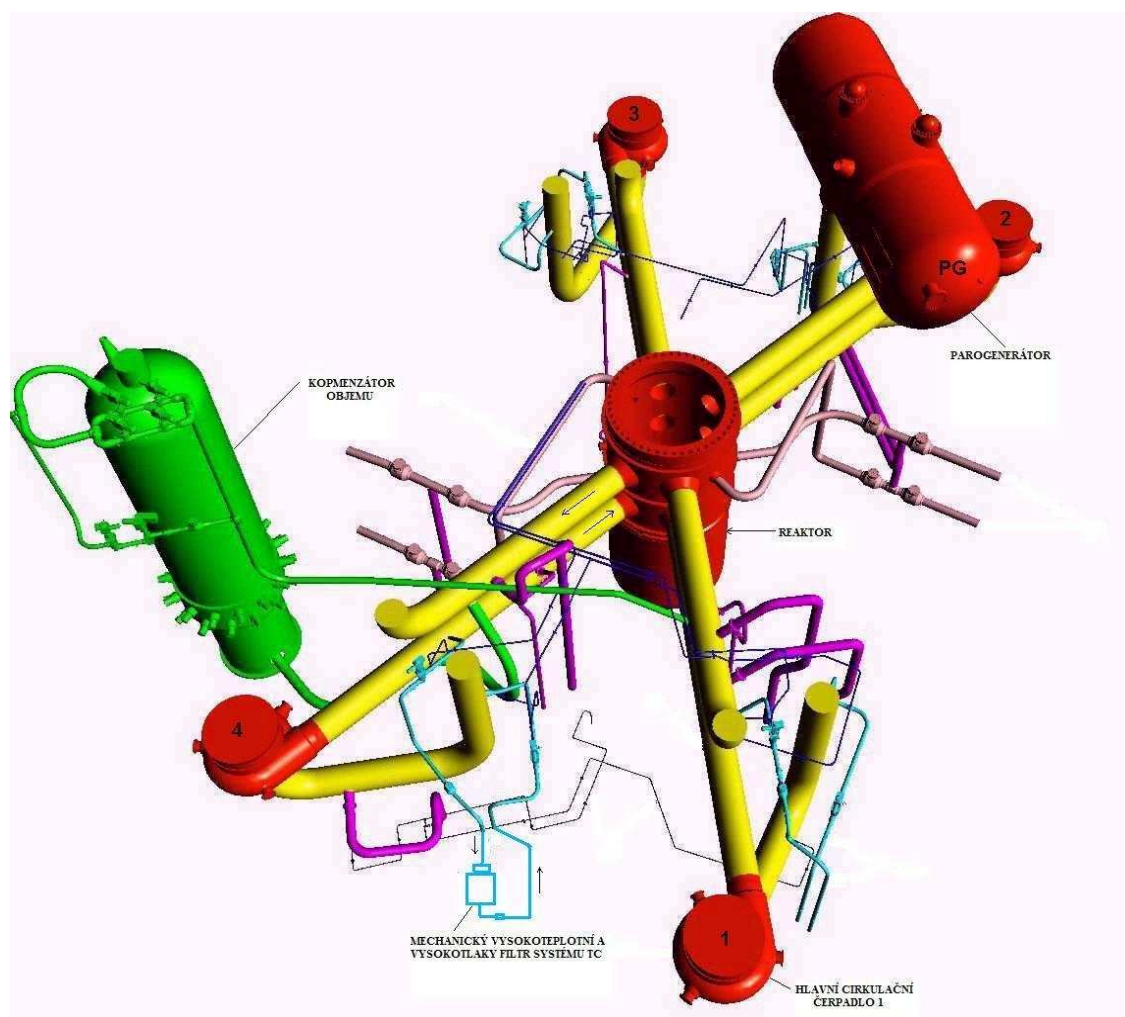
Systém TC – projektové značení technologického systému kontinuálního čištění chladiwa primárního okruhu mechanickými vysokoteplotními a vysokotlakými filtry.⁽¹¹⁾

1.2 Popis uspořádání primárního okruhu s reaktorem VVER1000–V320

Primární okruh reaktoru VVER1000–V320 na jaderné elektrárně Temelín tvoří uzavřený okruh, jehož hlavní částí je tlaková nádoba reaktoru a čtyři cirkulační smyčky. Každá smyčka je složena z výstupní „horké větve“ zaústěné do horizontálního parogenerátoru. Z parogenerátoru pak vyústí zpětná „studená větev“ připojená na hlavní cirkulační čerpadlo a vede zpět do reaktoru. Za každým hlavním cirkulačním

čerpádem je na hlavním cirkulačním potrubí připojen vstup na mechanický vysokoteplotní a vysokotlaký filtr. Přečištěná voda se vrací na sání hlavního cirkulačního čerpadla, tzn. že jednotlivé filtry jsou ve skutečnosti obtoky hlavních cirkulačních čerpadel. K průtoku chladiva primárního okruhu přes tyto filtry je využívána tlaková ztráta jednotlivých hlavních cirkulačních čerpadel.

Obrázek 1. Schéma základních komponent primárního okruhu VVER1000–V320.⁽¹¹⁾



1.3 Skutečnosti ovlivňující tvorbu, transport a usazování aktivovaných korozních produktů v primárním okruhu

1.3.1 Vliv konstrukčních materiálů

Vzhledem k velikosti povrchu zařízení, který je ve styku s chladivem primárního okruhu jsou nejdůležitějšími plochami v primárním okruhu pokrytí paliva a teplosměnné trubky parogenerátorů. Tyto plochy s ohledem na velikost povrchu a zejména extrémní přestup tepla mají největší váhu při posuzování korozních vlastností chladiva a jiných vlastností souvisejících např. s možností tvorby úsad pevných částic na povrchu zařízení, tvorby radiačních polí usazováním aktivovaný korozních produktů apod.⁽¹⁾

Pokrytí paliva a vodící trubky palivových souborů jsou vyrobeny ze slitiny Zircaloy-4 nebo Zirlo dle typu paliva. Jejich hlavní materiál je zirkonium s minimálním obsahem příměsí dalších kovů viz tabulka 1. Distanční mřížky palivových souborů jsou vyrobeny ze slitiny Zircaloy-4. Hlavice a patice palivových souborů jsou z materiálu Inconel.⁽¹⁾

Tabulka 1. Složení příměsí materiálu Zircaloy-4 a Zirlo ⁽¹⁾

Slitina	Příměsy[%]			
	Sn	Fe	Cr	Ni
Zircaloy-4	1,3	0,2	0,1	<0,005
Zirlo	1	0,1	-	-

Tabulka 2. Složení materiálu Inconel ⁽¹⁾

Slitina	Příměsy[%]		
	Fe	Cr	Ni
Inconel	18	19	52

Kromě konstrukčních materiálů jaderného paliva přicházejících do styku s chladivem primárního okruhu reaktoru VVER 1000 – V320 jsou konstrukční materiály tvořené převážně austenitickou nerezavějící ocelí třídy 08Ch18N10T, ze které jsou zhotoveny trubky parogenerátorů, vnitřní vestavby reaktoru a potrubí.⁽¹⁾

Tabulka 3. Složení austenitické oceli ⁽¹⁾

Ocel	Příměsy[%]													Příměsí celkem [%]	Fe [%]
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	W	Cu	Ti			
08Ch18N10T	min	0	0	0	0	0	17	0	9	0	0	0	0	26	74
	max	0,08	0,08	2,00	0,04	0,02	19,0	0,10	11,0	0,20	0,20	0,30	0,40	33,4	66,6

1.3.2 Vliv pasivace

Účelem pasivace vnitřních povrchů zařízení primárního okruhu je vytvoření oxidické korozní vrstvy ochranného charakteru, která má za následek snížení rychlosti koroze konstrukčních materiálů primárního okruhu a snížení rychlosti a množství korozních produktů uvolňovaných do chladiva primárního okruhu, což ve svém důsledku vede ke snížení množství materiálu aktivující se v aktivní zóně reaktoru a podléjícího se na formování radiačních polí v okolí zařízení. ⁽¹⁵⁾

Oxidické vrstvy vzniklé v podmínkách chladiva tlakovodního reaktoru jsou tvořeny ze dvou podvrstev – vnitřní a vnější oxidické vrstvy. Složení a velikost obou vrstev vychází ze závislosti především na charakteru materiálu, povrchovém opracování, chemických parametrech prostředí, teplotě a rovněž koncentraci rozpuštěných korozních produktů v chladivu primárního okruhu. ⁽¹³⁾

Vnitřní oxidická vrstva - vznikla v důsledku koroze základního materiálu. Její vznik je určen rychlostí difúze iontů (Fe, Ni aj.) v krystalické struktuře materiálu. Vnitřní vrstva je kompaktní, soudržná, pseudoformě srostlá s mřížkou kovu, elektricky nevodivá a její vlastnosti jsou rozhodující pro korozní odolnost. Její přítomnost na povrchu materiálu snižuje rychlost koroze a rychlost uvolňování korozních produktů do chladiva. Její složení je závislé na příslušných hydrotermálních podmínkách, je však tvořena především z oxidů spinelovou strukturou a ve vztahu k základnímu materiálu je obohacena o Cr. Poměr hlavních složek Fe:Cr:Ni je povětšinou v rozmezích 10:10:2 až 10:10:1. Typickými složkami v podmínkách tlakovodního reaktoru jsou FeCr_2O_4 , Fe_2CrO_4 , FeCrNiO_4 . ⁽¹³⁾

Vnější oxidická vrstva - vznikla rekystalizací (přesrážením) z vodné fáze. Rychlost jejího vzniku je determinována rozpustností příslušných složek v chladivu a intenzitou procesů přenosu hmoty. Vrstva je méně kompaktní, většinou je pórovitá, méně přilnutá a méně soudržná. Vrstva je ve vztahu k základnímu materiálu obohacena zejména o Fe. Typickou složkou vnější vrstvy v podmínkách tlakovodního reaktoru je magnetit Fe_3O_4 substituovaných ionty Ni^{2+} a Cr^{3+} .⁽¹³⁾

Vznik stabilní pasivační vrstvy na vnitřním povrchu zařízení primárního okruhu vyžadoval, aby prostředí, ve kterém daná vrstva vznikla, bylo z chemického hlediska co možná nejbližší reálným provozním podmínkám, tj. alkalickému redukčnímu prostředí. Pouze tak je možné předejít situacím, kdy při přechodu k provozu bloku může docházet k transformacím pasivační vrstvy a možné ztrátě jejich pasivačních vlastností. S ohledem na tyto skutečnosti byla provedena řízená pasivace během etapy horkých zkoušek před vlastním zahájením provozu reaktoru.⁽¹⁵⁾

1.3.3 Vliv chemického režimu primárního okruhu

Hlavním záměrem udržování chemického režimu primárního okruhu je minimalizace transportních aktivit korozních produktů a snížení tvorby radiačních polí prostřednictvím zajištění a udržování konstantních chemických podmínek v chladivu primárního okruhu v průběhu provozu reaktoru.

Řízení chemického režimu je v úzkém vztahu ke stavu technologie a váže se na podmínky pro provozování bloku definované provozními režimy.⁽¹⁾

1.3.3.1 Vliv pH

Hodnota pH primárního chladiva má vliv na procesy koroze konstrukčních materiálů, uvolňování korozních produktů do chladiva, jejich transport a usazování na površích palivových souborů a na površích vně aktivní zóny reaktoru. Z této skutečnosti vyplývá, že usazování korozních produktů na površích palivových souborů, a tím i proces jejich aktivace a následný vznik radiačních polí, mohou být cíleně ovlivňovány změnami pH. Hodnota pH chladiva může mít vliv na transport korozních produktů v důsledku efektu rozpustnosti (transport v iontové formě), nebo může mít vliv na

velikost a složení části v důsledku změn ve formě korozních produktů uvolňovaných z povrchů (transport ve formě částic).⁽¹⁾

Hodnota pH chladiva je základním ukazatelem při posuzování jeho vlastností a vlivu na řadu dějů v primárním okruhu. Je ovlivňováno všemi látkami, které chladivo obsahuje:

- kyselina boritá je velmi slabou kyselinou, jejíž kyselost, jinými slovy disociační konstanta, klesá se vzrůstající teplotou což vede k nárůstu pH v oblasti vysokých teplot,
- naproti tomu hydroxid draselný je velmi silnou zásadou, která v celém sledovaném rozsahu teplot posouvá pH k vyšším hodnotám.

Pro účely sledování a řízení chemických režimů nelze použít hodnot pH, které jsou získávány v laboratoři při analýzách médií primárního okruhu. Teplota takto sledovaných vzorků se pohybuje kolem 25 °C. Mezi touto hodnotou a skutečnou hodnotou pH při podmínkách v primárním okruhu může být rozdíl až několik jednotek. Vezmeme-li do úvahy, že pH je logaritmickou funkcí koncentrace, pak dospějeme k závěru, že zmíněný rozdíl vede až k řádovým chybám při posuzování jednotlivých koncentrací.

Tento fakt vede ke stanovení veličiny nazvané vysokoteplotní $pH_{(T)}$. Tato hodnota pH není v daných podmínkách přímo měřitelná proto se získává složitým výpočtem na základě znalosti koncentrací jednotlivých iontů a teploty na kterou je výsledná hodnota vztažena.

Při provozu reaktoru je pH vztaženo ke střední teplotě chladiva 300 °C (označení „pH₃₀₀“), což je skutečná hodnota chladiva v primárním okruhu. Chemický režim se za provozu reaktoru udržuje v rozsahu hodnot pH_{300} 7,0-7,2.⁽¹⁾

1.3.3.2 Vliv kyseliny borité

Koncentrace kyseliny borité v chladivu se během kampaně řídí požadavky na provoz bloku, a její hodnota se v průběhu palivové kampaně snižuje. Její přítomnost nepříznivě ovlivňuje korozní rychlost konstrukčních materiálů. Z tohoto důvodu je

nezbytně nutné kompenzovat vliv kyseliny borité na pH chladiva. Za tímto účelem jsou v chladivu přítomny další dvě složky, draslík a čpavek, které regulují aciditu kyseliny borité na optimální hodnotu pH.⁽¹⁾

1.3.3.3 Vlivy ostatních parametrů

Rozpuštěný kyslík - nízký obsah kyslíku je potřebný z důvodu zamezení korozního praskání pod napětím a snížení plošné koroze austenitických nerez ocelí. Minimalizace obsahu kyslíku v chladivu primárního okruhu rovněž minimalizuje korozi materiálu pokrytí palivových souborů, zirkoniových slitin. Při provozu reaktoru na výkonu je radiolyticky vzniklý kyslík odstraňován přebytkem vodíku vzniklého radiolýzou amoniaku.

Rozpuštěný vodík - vodík potřebný k udržení požadované koncentrace kyslíku je tvořen rozkladem amoniaku. Rychlost generace vodíku závisí na koncentraci amoniaku v chladivu primárního okruhu a na výkonu reaktoru. Minimální obsah vodíku je limitován z důvodu zajištění maximální povolené koncentrace kyslíku. Maximální koncentrace vodíku je limitována z důvodu možné hydrogenace (křehnutí) slitin Zr a snížení rizika nežádoucího hromadění vodíku v systémech primárního okruhu.

Amoniak - vliv amoniaku na pH je ve sledovaném teplotním rozsahu podobně jak v případě kyseliny borité komplikovanější, neboť se vzrůstající teplotou klesá disociace amoniaku a tedy i schopnost zvyšování pH. Dávkování amoniaku se v reaktorech VVER1000 používá především ke generaci vodíku.

Draslík, lithium, sodík - koncentrace iontů draslíku, lithia a sodíku kompenzuje acidické působení kyseliny borité a udržuje slabě zásaditý charakter chladiva primárního okruhu, což je nejvýhodnější z hlediska minimalizace rychlosti koroze konstrukčních materiálů. Draslík se do chladiva primárního okruhu reaktorů VVER dává jako hydroxid draselný, lithium a sodík se dostávají jako nečistoty nebo vznikají (lithium) v důsledku neutronových reakcí z jiných složek (kyselina boritá).

Koncentrace alkalických iontů těchto úrovní nemají negativní vliv na integritu materiálů primárního okruhu, jejich maximální povolená koncentrace je odvozena od

možného působení na pokrytí palivových souborů především v oblastech zakoncentrování příměsí.

Chloridy - za určitých podmínek mohou porušovat pasivační vrstvu na ocelích obsahujících chrom a převádět povrch do korozně aktivního stavu. Vznikající chlorid chromu hydrolyzuje, čímž uvolňuje iont chloru pro další reakce. Tímto mechanismem probíhá bodová, štěrbinová a mezikrystalická koroze.⁽¹⁾

1.3.4 Provozní režimy

Vyvedení reaktoru na výkonový stav, jeho provoz a odstavení si vyžaduje dodržování předepsaných neutronově fyzikálních a tepelně hydraulických charakteristik, které definují provozní stav technologie. Jejich hodnoty jsou určujícími parametry pro udržování bloku v následujících provozních režimech.⁽⁵⁾

Režim 1 (provoz na výkonu) – základní režim provozu bloku. Do režimu 1 se blok převádí v případě povolení výkonového provozu. Určujícím parametrem je výkon reaktoru 2 %. Část chladiva je odvedena k přečištění v systému TC, kterým protéká objemovou rychlostí 60 – 80 m³h⁻¹ jedním filtrem.

Režim 2 (nevýkonový stav) – po dosažení kritického stavu se reaktor zpravidla stabilizuje na MSKS – minimálním stabilizovaném kritickém stavu.

Režim 3 (horký stav) – stav technologie, který zajišťuje horký podkritický stav reaktoru. Určujícím parametrem je střední teplota primárního okruhu 260 °C.

Režim 4 (polohorký stav) – náhřev primárního okruhu na výchozí parametry umožňující zahájení dosahování kritického stavu reaktoru. Určujícím parametrem je teplota chladiva nad 150 °C. Při teplotě vyšší než 200 °C se připojují mechanické vysokoteplotní a vysokotlaké filtry.

Režim 5 (studený stav) – náhřev bloku na parametry umožňující provedení tlakových zkoušek. Určujícím parametrem je teplota chladiva nad 70 °C.

Režim 6 (odstávka) – odstavný režim bloku pro provedení oprav a kontrol na zařízeních primárního okruhu nebo při odstavení bloku za účelem výměny paliva nebo odstavení v pohavarijních situacích.⁽¹⁾

Tabulka 4. Přehled provozních režimů ve vazbě na provoz mechanických vysokoteplotních a vysokotlakých filtrů ⁽¹⁾

Režim	Název	Tepelný výkon	Střední teplota v I.O ($T_{stř}$)	Připojení filtrů
1	Výkonový provoz	$\geq 2 \% N_{NOM}$	$> 260\text{ }^{\circ}\text{C}$	Ano
2	Nevýkonový stav	$< 2 \% N_{NOM}$	$> 260\text{ }^{\circ}\text{C}$	Ano
3	Horký stav	zbytkový	$\geq 260\text{ }^{\circ}\text{C}$	Ano
4	Polohorký stav	zbytkový	$260\text{ }^{\circ}\text{C} > T_{stř} \geq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	Ano
5	Studený stav	zbytkový	$150\text{ }^{\circ}\text{C} > T_{stř} \geq 70\text{ }^{\circ}\text{C}$	Ne
6	Odstávka	zbytkový	$< 70\text{ }^{\circ}\text{C}$	Ne

1.3.5 Kontinuální čištění chladiva primárního okruhu mechanickými vysokoteplotními a vysokotlakovými filtry

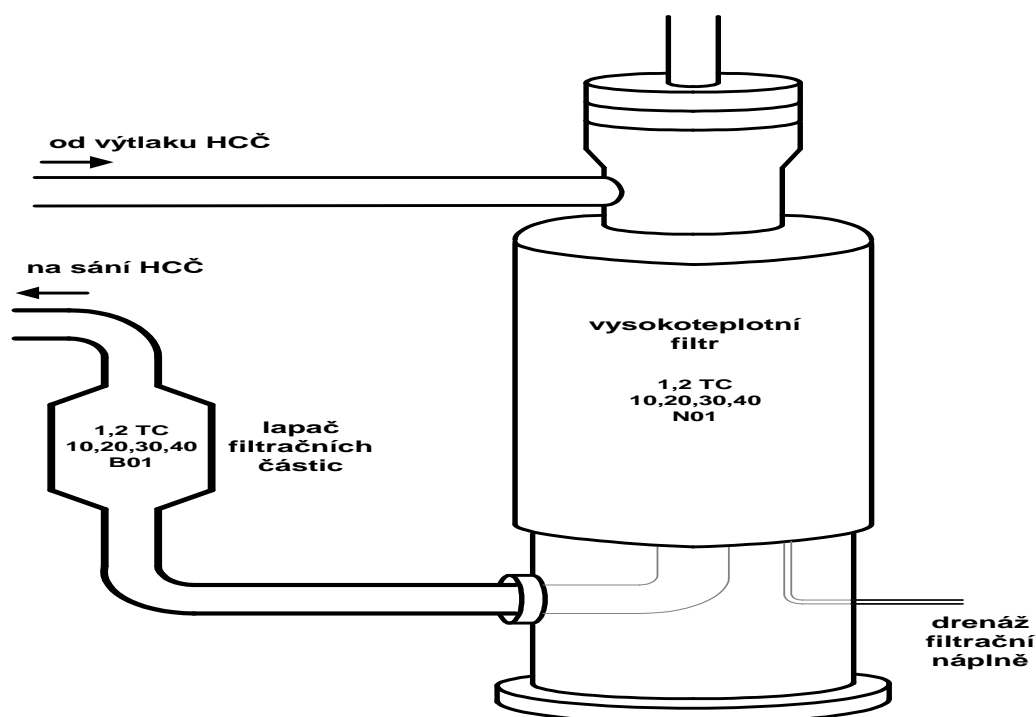
System kontinuálního vysokoteplotního a vysokotlakého čištění chladiva je určen k nepřetržitému čištění chladiva primárního okruhu od nerozpuštěné formy korozních produktů a aktivovaných korozních produktů, a tím snižování aktivity chladiva primárního okruhu. Jedná se o výjimečnou technologii, při které lze provádět čištění za vysokého tlaku a teploty díky filtračnímu materiálu z titanu s houbovitou strukturou.

1.3.5.1 Funkční popis

Chladivo primárního okruhu je přiváděno do každé smyčky tohoto kontinuálního čištění z výtlaku příslušného hlavního cirkulačního čerpadla. Chladivo prochází vysokoteplotním filtrem, který obsahuje titanovou drť, na kterou se fixuje drobná fáze disperzních korozních produktů.

Přečištěné chladivo primárního okruhu se po průchodu filtrem vrací na sání příslušného HCČ. Na vratném potrubí od filtru na sání hlavního cirkulačního čerpadla je instalován záchytný filtr (lapač) pro případné zachycení uniklého filtračního materiálu z filtru, aby se nedostal do primárního okruhu.⁽³⁾

Obrázek 2. Schéma mechanického vysokoteplotního a vysokotlakého filtru systému TC⁽³⁾



1.3.5.2 Technický popis

Filtr typu AFMVT - 1,0 - 16,0 je tvořen válcovým tělesem, které je uzavřeno spodním a horním eliptickým dnem. V horní části je vstupní komora určena pro přívod chladiva primárního okruhu a pro zavážku a vyvážku filtrační náplně zavezené na drenážním systému kloboučkového typu.⁽³⁾

Vlastní vysokoteplotní filtr je uložen v opěrné konstrukci. Filtr je izolován vrstvou tepelné izolace o celkové tloušťce 100 mm. Vnější oplechování tepelné izolace je z nerezového plechu tloušťky 0,5 mm.⁽³⁾

Tabulka 4. Základní technické parametry vysokoteplotního filtru⁽³⁾

Typ filtru	AFMVT - 1,0 - 16,0
Celkový objem filtru	1,45 m ³
Hmotnost prázdného filtru	7840,0 kg
Síla stěny filtru	85,0 mm

Tloušťka tepelné izolace	100,0 mm
Pracovní tlak	15,7 MPa
Maximální pracovní tlak	17,6 MPa
Pracovní teplota	290,0 °C
Maximální průtok chladiva PO	100,0 m ³ .hod ⁻¹
Počet kloboučků	49 ks
Rozměr štěrbin v kloboučku	0,22 - 0,35 mm
Objem náplně (suché)	0,7 m ³

1.3.5.3 Filtrační náplň

Filtrační náplň je speciálně upravený titan vyznačující se svojí vysokou teplotní odolností a houbovitou strukturou, která zvyšuje požadovaný záchyt nerozpuštěné formy korozních produktů a aktivovaných korozních produktů na svém povrchu. Základní technické parametry titanové náplně jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5 . Základní technické parametry filtrační náplně ⁽³⁾

Objem náplně (suché)	0,7 m ³
Materiál náplně	titanová drť s frakcemi 0,63 ÷ 1 mm
Násypná hustota náplně	1,4 g.cm ⁻¹
Měrný povrch náplně	0,6 - 1,8 m ² .g ⁻¹
Velikost pórů náplně	30 - 90 μm
Lineární rychlost filtrace	100 - 150 m.hod ⁻¹

2 CÍL PRÁCE A HYPOTÉZA

2.1 Cíl práce

Ověřit účinnost záchytu aktivovaných korozních produktů a korozních produktů na mechanických vysokoteplotních a vysokotlakých filtrech systému kontinuálního čištění primárního chladiva v důsledku změn fyzikálně-chemických parametrů v systému primárního okruhu. Vytvořit postup pro monitorování a hodnocení aktivovaných korozních produktů a korozních produktů deponovaných na mechanických vysokoteplotních a vysokotlakých filtrech systému kontinuálního čištění primárního chladiva, který se bude používat při dlouhodobém sledování účinnosti těchto filtrů.

2.2 Hypotéza

V průběhu odstavování reaktoru dochází důsledkem změn fyzikálně chemických parametrů k uvolňování aktivovaných korozních produktů a korozních produktů zachycených na mechanických vysokoteplotních a vysokotlakých filtrech do chladiva primárního okruhu.

3 METODIKA

Pro vyhodnocení efektivity provozu mechanického vysokoteplotního a vysokotlakového filtru jsem zvolil metodu vzájemného porovnání:

- koncentrací korozních produktů a aktivovaných korozních produktů na vstupu a výstupu sledovaného filtru a v reaktoru získaných analýzou ručně odebíraných vzorků dle rozpisu v součinnosti s harmonogramem odstávky výrobního bloku za účelem výměny jaderného paliva,
- fyzikálně-chemických parametrů v technologii primárního okruhu získaných z kontinuálních měření.

Pro vyhodnocení byla použita data z průběhu odstávování a dochlazování reaktoru druhého výrobního bloku po páté palivové kampani.

Vyhodnocení efektivity provozu mechanického vysokoteplotního a vysokotlakového filtru předcházelo výběr vhodného zařízení a vzorkování, chemická a radiochemická analýza v laboratoři elektrárny Temelín a sběr dat z měření v technologii.

3.1 Výběr zařízení a odběrových míst

Pro vyhodnocení efektivity jsem vybral jeden ze čtyř mechanických vysokoteplotních a vysokotlakých filtrů, u kterého byl během odstávování bloku co nejdéle maximální možný průtok chladiva primárního okruhu ve stejném směru jako v průběhu kampaně.

Dále jsem při výběru musel zohlednit i omezený výběr vzorkovacích míst s ohledem na aktivitu v primárním okruhu. Tato vzorkovací místa jsou pevně daná a splňují požadavky bezpečného a reprezentativního odběru vzorku. Pro vyhodnocení efektivity provozování jsem zvolil vstup a výstup filtru na druhé hlavní cirkulační smyčce a reaktor k porovnání vzorků z filtru s chladivem primárního okruhu.

Tabulka 6. Vybrané zařízení včetně odběrových míst

Zařízení		Odběrová místa dle CHEMIS	Technologické označení
Reaktor	reaktor horká smyčka	2YC010	2YC10B01
Filtr	vstup	2TC021	2TC020N01 vstup
	výstup	2TC022	2TC020N01 výstup

3.2 Vzorkování

Postup prací jsem předem stanovil v souladu s pracovním postupem chemie pro odběr aktivního vzorku a harmonogramem odstávky. Z tohoto harmonogramu jsem získal informace o časovém průběhu odstavení reaktoru od snižování výkonu reaktoru až po úplné dochlazení a odtlakování primárního okruhu.

Na základě získaných informací jsem vypracoval postup odběru vzorků z reaktoru a mechanického vysokoteplotního a vysokotlakého filtru (vstup a výstup), který probíhal od začátku snižování výkonu reaktoru a byl ukončen odstavením vzorkovaného filtru:

Tabulka 7. Rozpis pro odběr vzorků

Datum a čas	Odběrové místo	CHEMIS	Četnost
8. 5.08	Reaktor	2YC010	1/8 hod
8. 5.08 10:00 - 10.5 08 24:00	Reaktor Filtr – vstup Filtr - výstup	2YC010 2TC021 2TC022	1/hod
11. - 15.5.08	Reaktor	2YC010	1/24 hod

3.2.1 Odběr vzorků

Před odběrem vzorků jsem připravil nové polyetylenové vzorkovnice o objemu 100 ml, které jsem polepil štítky (označení odběrového místa, data a času odběru vzorku) a materiál pro zajištění bezpečného vzorkování (přepravku, ochranné rukavice).

Pro sledování aktuálních údajů v technologii primárního okruhu během vzorkování jsem připravil graf s technologickými parametry (teplota, tlak) v databázi

CHEMIS. Současně jsem ověřil funkčnost programu IAPWS-TVVP pro přepočet objemu vzorku vztaženého k aktuální teplotě a tlaku v technologii primárního okruhu.

V místě odběru vzorků jsem provedl kontrolu funkčnosti odběrových tras a zabezpečil měření radiační situace pracovníky radiační kontroly provozu. Po vyhodnocení bezpečné radiační situace jsem pro zajištění reprezentativního odběru vzorku odpustil z odběrové trasy předepsaný drenážní objem. Po domluvě s vedoucím reaktorového bloku jsem ponechal tyto trasy po dobu vzorkování otevřené.

Vzorkování probíhalo podle předem vytvořeného rozpisu. Po odběru vzorků jsem na vzorkovnice dopsal datum a přesný čas odběru vzorku. Vzorky jsem po každé odebrané sérii dopravil do laboratoře k analýzám. V laboratoři jsem také vzorky elektronicky zaevidoval do CHEMIS. Zároveň s odběrem vzorků jsem v průběhu dochlazování prováděl v grafu v CHEMIS i odečet aktuální hodnoty tlaku a teploty chladiva primárního chladiva v jednotlivých odběrových místech. Hodnoty jsem použil pro výpočet objemu odebraného vzorku, který jsem zadával jako jeden z parametrů měření do modulu Spektro v CHEMIS.

Na vzorkování se s výraznou pomocí podíleli i kolegové ze skupiny laboratoře, kteří mi při odběru vzorků pomáhali.

3.3 Analýza vzorků

Ve vzorcích byli provedeny chemické a radiochemické analýzy. Ihned po odběru jsem ve vzorcích měřil aktivitu celkových kovů. Potom jsem ve vybraných vzorcích filtrací oddělil rozpuštěnou a nerozpuštěnou formu kovů. V průběhu následujícího týdne jsem v takto upravených vzorcích měřil aktivitu rozpuštěných a nerozpuštěných kovů. V nefiltrovaných vzorcích jsem prováděl měření aktivity celkových kovů po sedmi dnech (snížení minimální detekované aktivity díky rozpadu krátkodobých izotopů a tím přesnější měření aktivit měřených kovů).

Po ukončení radiochemických analýz jsem předal vzorky k chemické analýze celkových a rozpuštěných kovů na pracoviště ICP-MS.

3.3.1 Měření kovy

Ve vzorcích se analyzovaly následující prvky a izotopy:

ICP-MS - Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zr, Nb, Ag, Sb.,

Gamaspektrometrie - ^{51}Cr , $^{54,56}\text{Mn}$, ^{59}Fe , $^{58,60}\text{Co}$, ^{95}Zr , ^{95}Nb , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{122}Sb a ^{124}Sb .

Rozsah analýz byl zvolen na základě rozsahu analýz korozních produktů a aktivovaných korozních produktů prováděných standardně v laboratořích jaderné elektrárny Temelín. Analyzované kovy a jejich izotopy odpovídají materiálovému složení zařízení primárního okruhu.

3.3.2 Příprava a úprava vzorků

Vybrané vzorky jsem přefiltroval ve skleněném filtračním zařízení s elektrickou vývěvou přes membránový filtr Pragopor 6 s velikostí pórů 0,4 μm . Rozpuštěné korozní produkty jsem filtroval do 100 ml polyetylenových vzorkovnic a pak okyselil 1 ml koncentrované HNO_3 .

Filtry s nerozpuštěnou formou korozních produktů byly na pracoviště ICP-MS rozloženy v koncentrované HCl a doplněny do 25 ml odběrných baněk.

Tabulka 8. Přehled forem měřených vzorků

			Gamaspektrometrie				ICP-MS	
Datum a čas	Odběrové místo	Interval odběru	Me(c)	Me(r)	Me(c) po 7dnech	Me(n)	Me(c)	Me(r)
8.5.08	2YC010	1/8h	x		x		x	
8.5.08 10:10 - 10.5.08 9:00	2YC010	1/h	x		x		x	
8.5.08 10:15 - 10.5.08 9:00	2TC021	1/h	x		x		x	
8.5.08 10:15 - 10.5.08 9:00	2TC021	1/h	x		x		x	
8.5.08 12:10 - 10.5.08 8:00	2YC010	1/4h	x	x		x		x
8.5.08 12:10 - 10.5.08 8:02	2TC021	1/4h	x	x		x		x
8.5.08 12:10 - 10.5.08 8:02	2TC021	1/4h	x	x		x		x
10.5.08 - 15.5.08	2YC010	1/24h	x		x		x	

3.4 Měřicí přístroje

3.4.1 Gamaspektrometrický systém

K analýze aktivovaných korozních produktů jsem použil gamaspektrometrický systém firmy Canberra s polovodičovými germaniovými detektory a vyhodnocovacím programem GENIE-ESP.

Tabulka 9. Parametry gamaspektrometrického systému ⁽⁸⁾

Parametry přístroje	Hodnoty
Energetické rozlišení detektorů	1,8 – 2,0 keV pro energii ⁶⁰ Co 1332,48 keV
Rozsah měření	energetický interval 59,5 – 1836 keV, objemová aktivita radionuklidů 10 ⁰ – 10 ⁷ Bq/l.

3.4.2 Parametry gamaspektrometrických měření

Analýza gamaspektrometrickým systémem vyžadovala pro každý vzorek specifické nastavení měřících parametrů a dodržování měření jednotlivých odběrových míst na stejném detektoru (měřící trase). Objem jsem získal výpočtem z aktuálních hodnot teploty a tlaku v odběrovém místě v době odběru.

Tabulka 10. Parametry zadávané pro nastavení měření

Popis	Reaktor	Filtr vstup/výstup
Odběrové místo dle CHEMIS	2YC010	2TC021 2TC022
Charakter vzorku dle CHEMIS	chladiivo v I.O.	chladiivo v SVO1
Geometrie	L100	
Množství vzorku	Tabulka 11.	
Trasa	CHL1	CHL2
Doba měření	20 min	
Poznámka	teplota [°C] tlak [MPa]	

Tabulka 11. Množství vzorku v závislosti na teplotě a tlaku chladiva primárního okruhu

Teplota [°C]	Tlak [MPa]	Množství [l]
320	15,7	0,147
280	15,7	0,131
280	12,5	0,132
250	8,5	0,124
220	5,7	0,119
180	2,6	0,113
140	1,4	0,108
120	1,4	0,106
100	1,4	0,104
80	1,4	0,103
60	1,4	0,102
35	0,1	0,100

3.4.3 Spektrometr ICP- MS

Koncentrace korozních produktů byly stanovovány pomocí hmotnostního spektrometru s indukčně vázanou plazmou typu Agilent 7500 v laboratoři AAS, ICP-MS.⁽¹⁰⁾

3.5 Technologická data

3.5.1 Data z kontinuální měření

Hodnoty výkonu reaktoru, tlaku, teploty a koncentraci kyseliny borité jsem získal z kontinuálních měření připojených přímo na zařízení primárního okruhu, odkud jsou výsledky vyvedeny pomocí aplikace TEDIS do CHEMIS.

3.5.2 Výpočet vysokoteplotního $pH_{(T)}$

Hodnoty vysokoteplotního $pH_{(T)}$ vypočetly pomocí výpočtového kódu DISER v ÚJV Řež. Výpočet byl proveden na základě hodnot koncentrací alkalických iontů, kyseliny borité a teploty získaných z kontinuálních měření během odstavení reaktoru a dochlazování primárního okruhu.

4 VÝSLEDKY

4.1 Vysokoteplotní pH_(T)

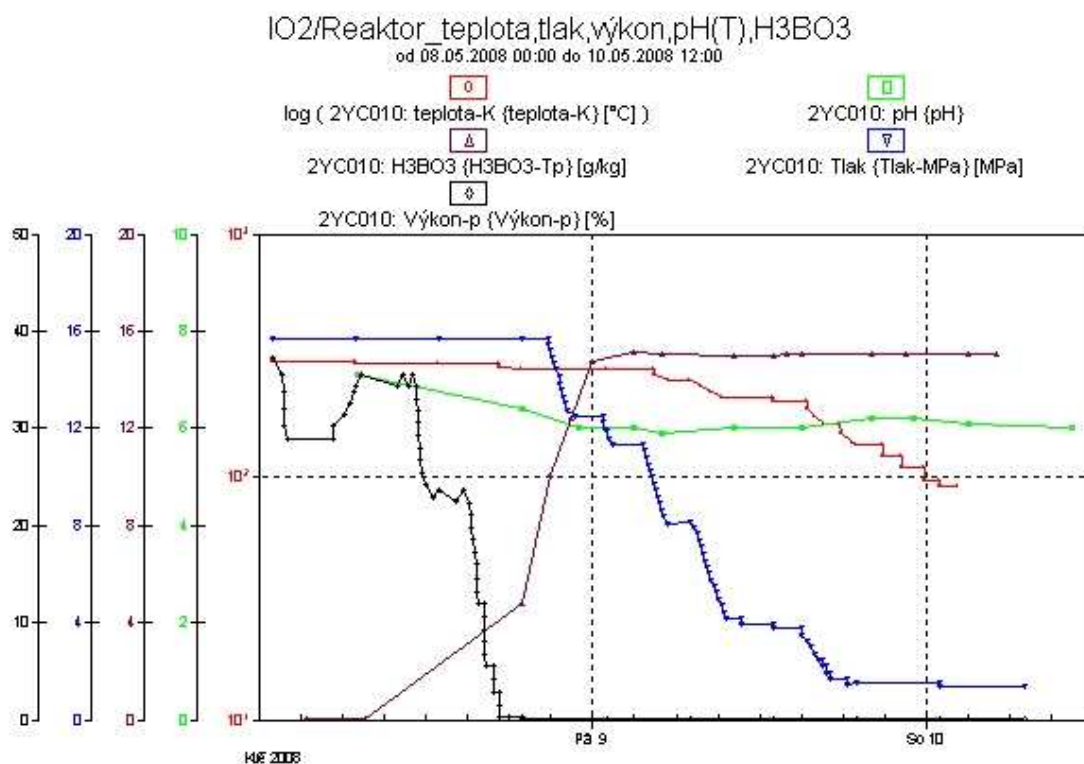
V tabulce 13. jsou uvedeny hodnoty vysokoteplotního pH(T) vypočteny v ÚJV Řež pomocí výpočetního kódu DISER.

Tabulka 13. Vysokoteplotní pH_(T) a vstupní hodnoty pro výpočet ⁽¹⁵⁾

Čas	K	Na	Li	NH4	H3BO3	teplota	pH _(T)
	[mg.l ⁻¹]				[g.kg ⁻¹]	[°C]	
8.5.2008 07:40	1,9	0	0,05	17,3	0,01	294,2	7,11
8.5.2008 19:00	3,4	0	0,08	10,4	4,78	280	6,43
8.5.2008 22:30	2,1	0	0,068	8,5	12,39	277,4	5,96
9.5.2008 03:00	2,7	0	0,08	7,3	15,10	277,4	5,95
9.5.2008 05:00	3	0	0,08	7,5	15,05	251,2	5,92
9.5.2008 10:05	3	0	0,05	7,1	15,00	211,5	6,00
9.5.2008 15:00	3,7	0	0,13	6,7	15,05	204,3	6,04
9.5.2008 20:00	4,1	0	0,095	5,4	15,05	135,6	6,15
9.5.2008 22:30	3,4	0	0,08	5,5	15,05	109,2	6,12
10.5.2008 03:00	3,4	0	0,05	5,5	15,05	90,7	6,08
10.5.2008 10:30	2,5	0	0,083	5,7	15,05	75,1	6,03

4.2 Fyzikálně chemické parametry během odstavování bloku

Odstávka výrobního bloku začala 8.5.2008 11:00 snížením výkonu reaktoru. Současně se začala zvyšovat koncentrace kyseliny borité na hodnotu odstavné koncentrace 15 g.l⁻¹ což mělo za následek snížení vysokoteplotního pH(T) , které kleslo z hodnoty 7,11 na cca 6,0. Po odstavení reaktoru se v primárním okruhu postupně začal snižovat tlak z 15,7 MPa na tlak atmosférický a současně klesala teplota z 320 °C na hodnotu 35 °C. Změny hodnot fyzikálně-chemických parametrů jsou uvedeny v grafu 1.



Graf 1. Průběh výkonu, $\text{pH}_{(T)}$, H_3BO_3 , teploty a tlaku během odstavování bloku

4.3 Výsledky analýz odebraných vzorků

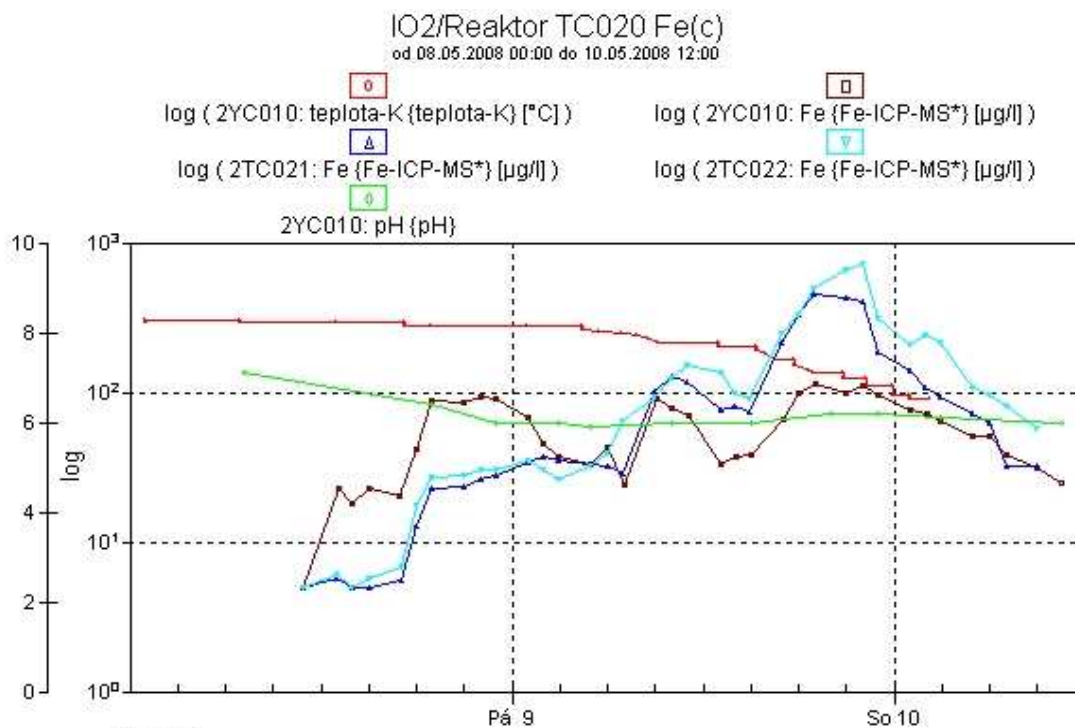
Pro interpretaci a následné vyhodnocení byly vybrány pouze ty grafy, které zobrazují analýzy s hodnotami vyššími, než je mez detekce. Na každém grafu jsou zobrazeny hodnoty na vstupu a výstupu mechanického vysokoteplotního a vysokotlakého filtru a v reaktoru. Zároveň jsou pro porovnání se stavem technologie zobrazeny hodnoty pH a teploty (z důvodu přehlednosti grafu jsou uvedeny pouze tyto dva parametry).

Průběhy hodnot z jednotlivých odběrových míst jsou v grafech zobrazeny ve stejném měřítku tak, aby byl na první pohled patrný rozdíl mezi vstupem a výstupem z mechanického vysokoteplotního a vysokotlakého filtru.

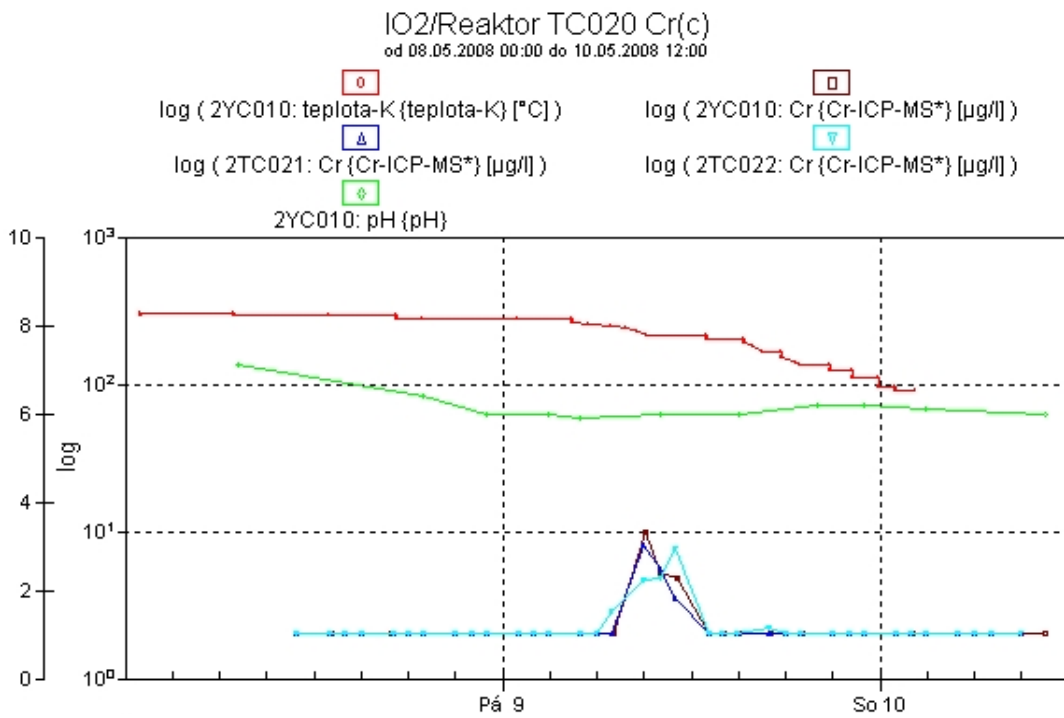
Tabulka 14. Přehled jednotlivých grafů

Naměřený kov	Graf	Gammaspektometrie			ICP-MS	
		Celkový	Rozpuštěný	Nerozpuštěný	Celkový	Rozpuštěný
		Me(c) po 7 dnech	Me(r)	Me(n)	Me(c)	Me(r)
Fe	Graf 2				x	
Cr	Graf 3				x	
Cr	Graf 4					x
Ni	Graf 5				x	
Ni	Graf 6					x
Mn	Graf 7				x	
Mn	Graf 8					x
Fe,Cr,Ni,Mn	Graf 9				x	
Mn-54	Graf 10	x				
Mn-54	Graf 11		x			
Mn-54	Graf 12			x		

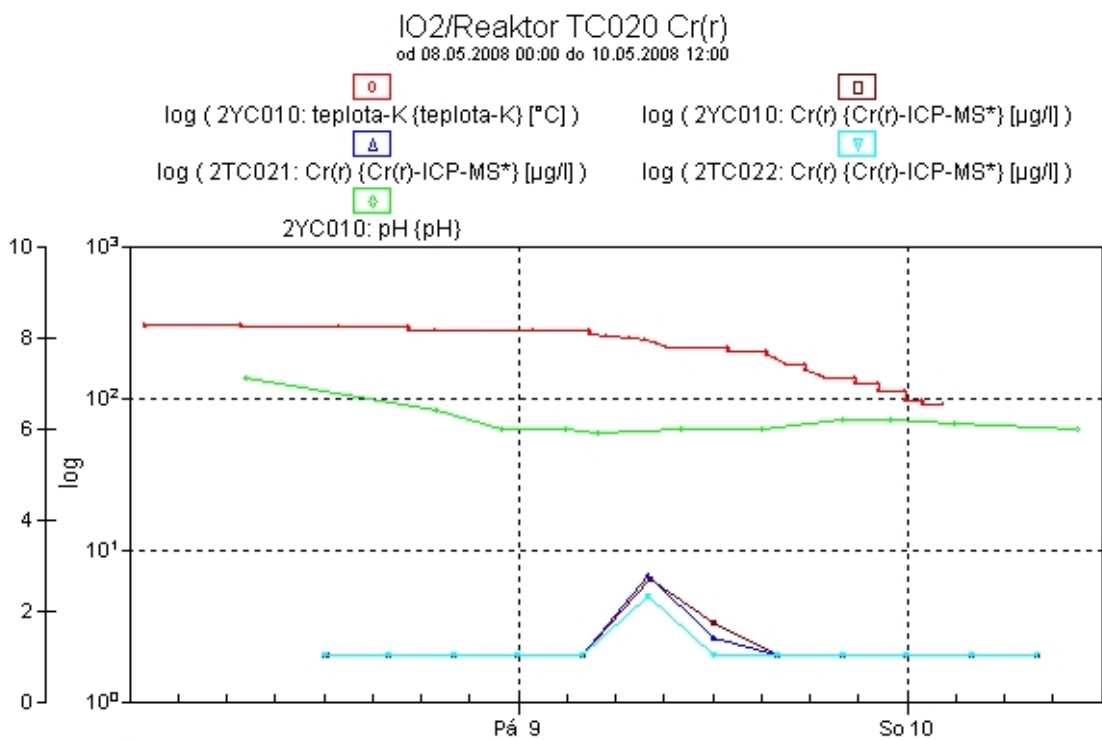
4.3.1 Výsledky chemických analýz (ICP-MS)



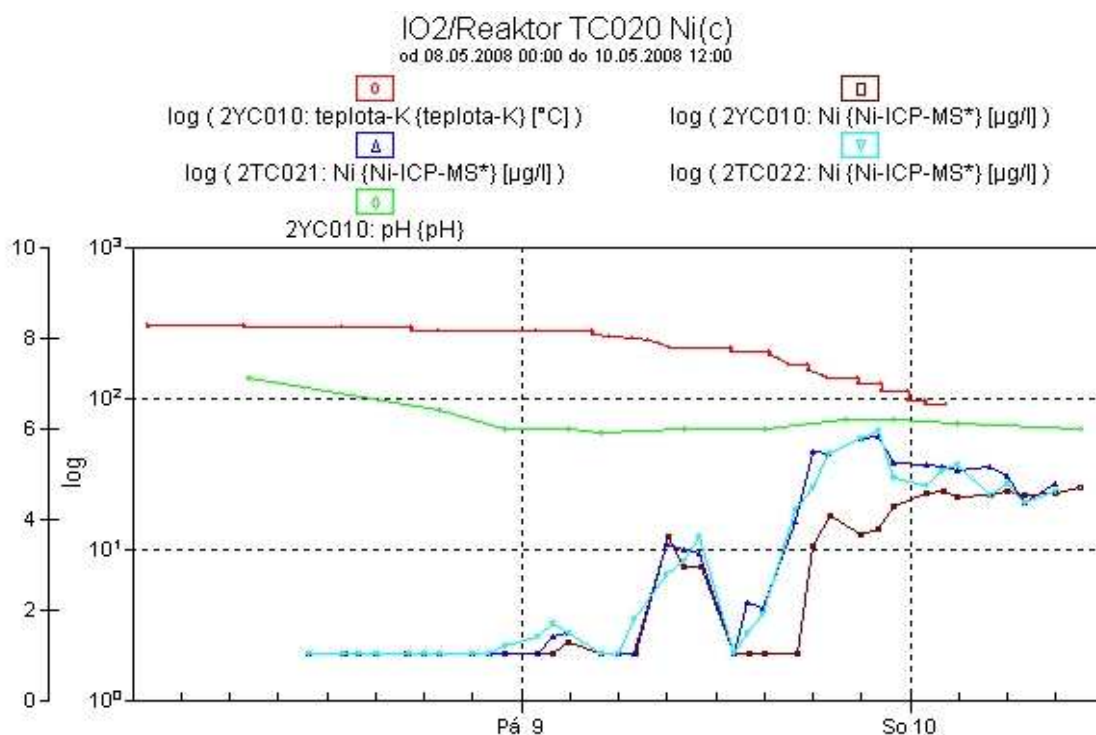
Graf 2. Fe_celkové/ICP-MS - reaktor, vstup/výstup filtru



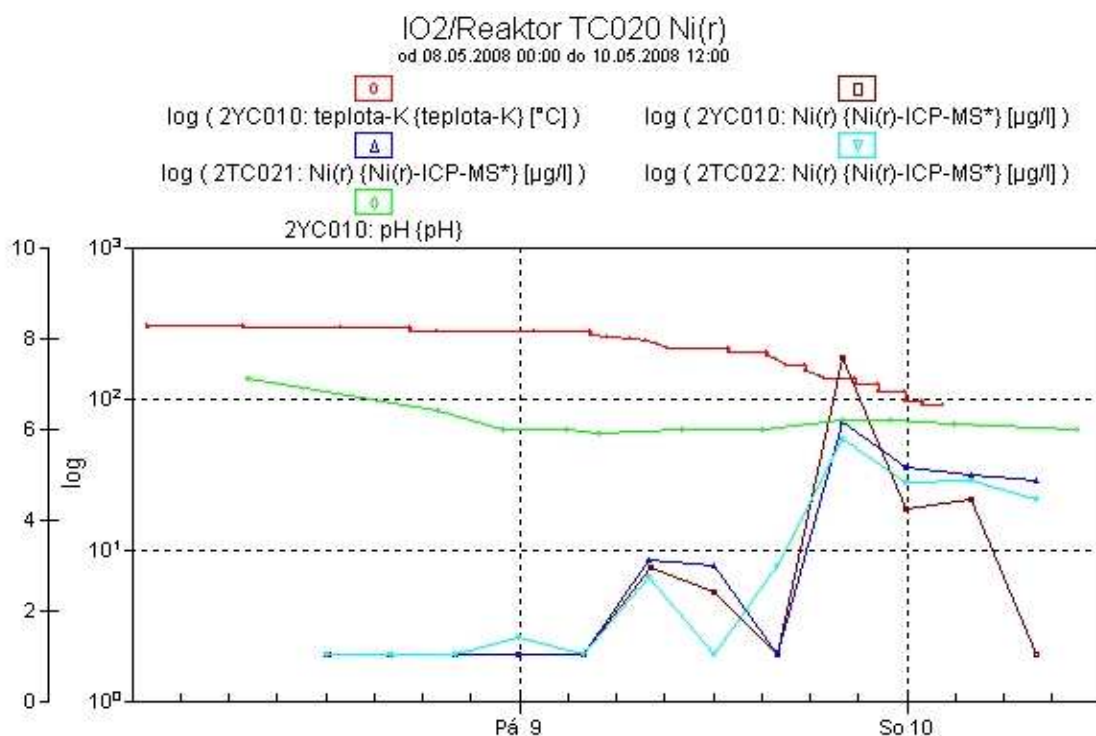
Graf 3.Cr_celkový/ICP-MS - reaktor, vstup/výstup filtru



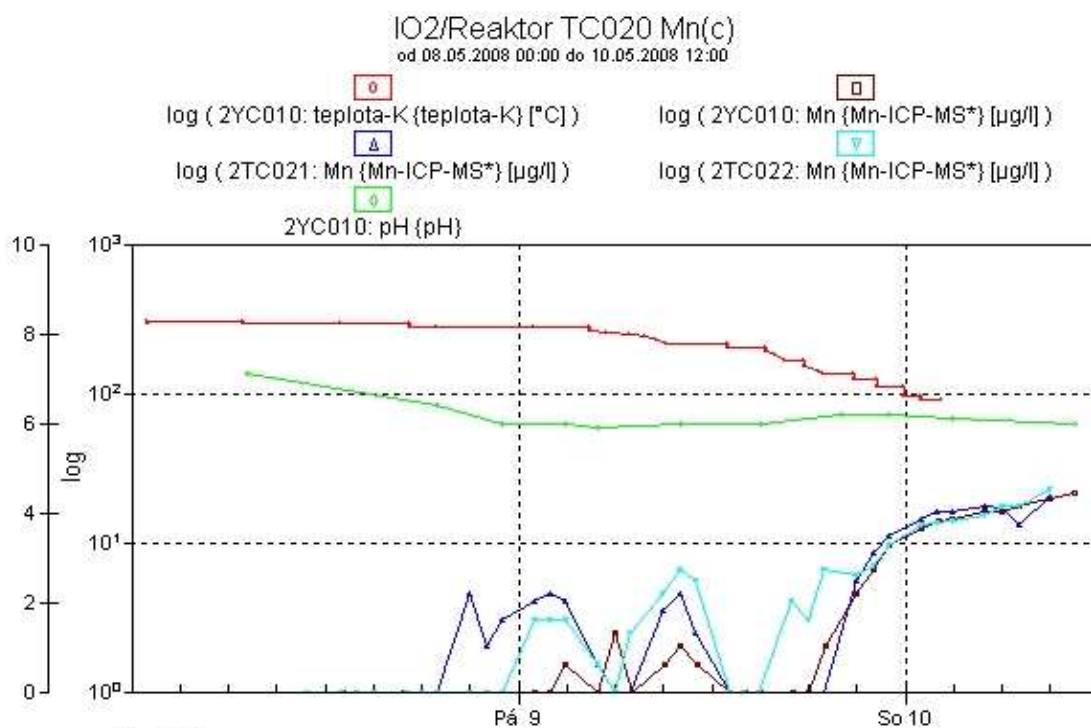
Graf 4. Cr_rozpuštěný/ICP- MS- reaktor, vstup/výstup filtru



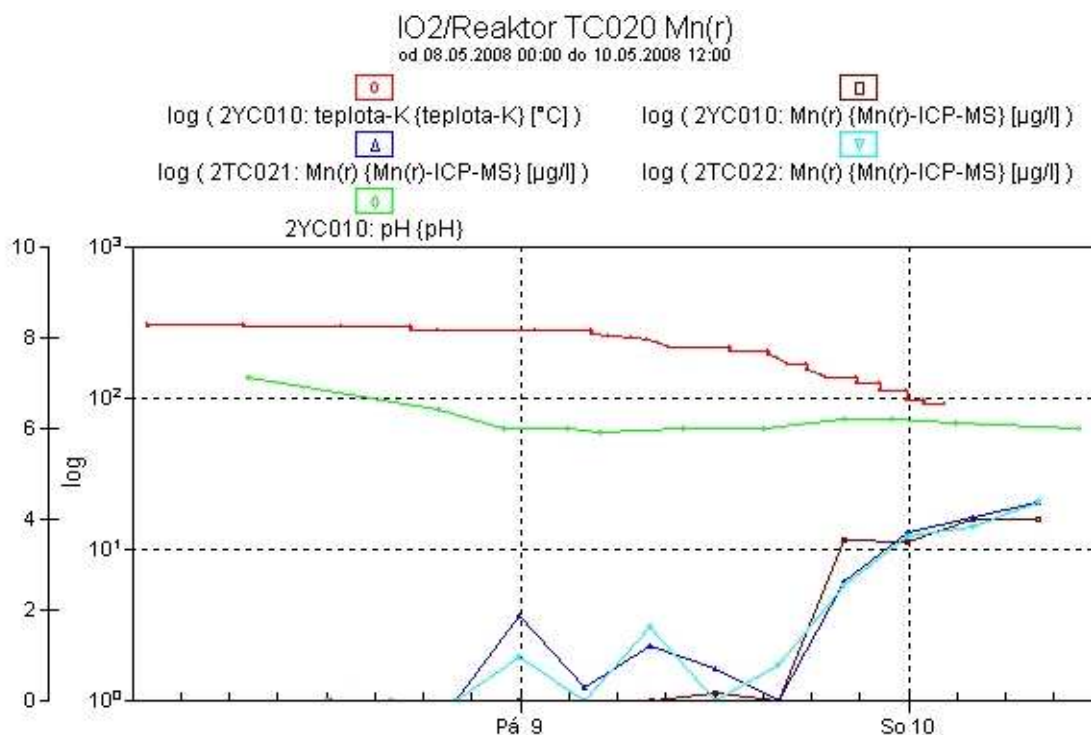
Graf 5. Ni_celkový/ICP- MS- reaktor, vstup/výstup filtru



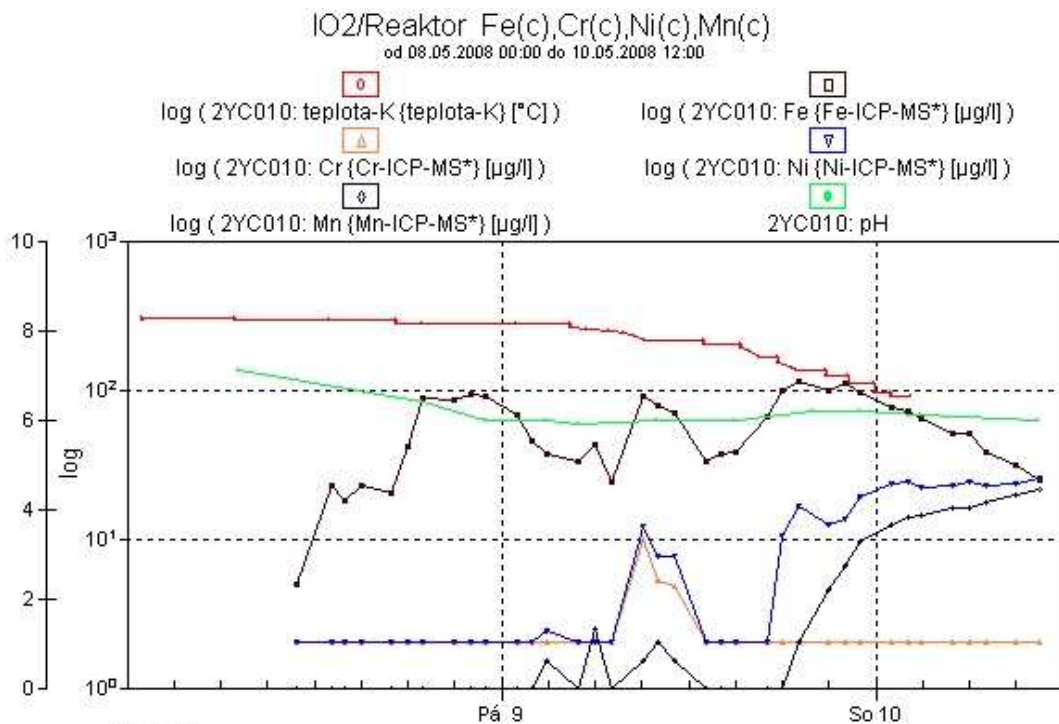
Graf 6. Ni_rozpuštěný/ICP- MS- reaktor, vstup/výstup filtru



Graf 7. Mn_celkový/ICP-MS- reaktor, vstup/výstup filtru

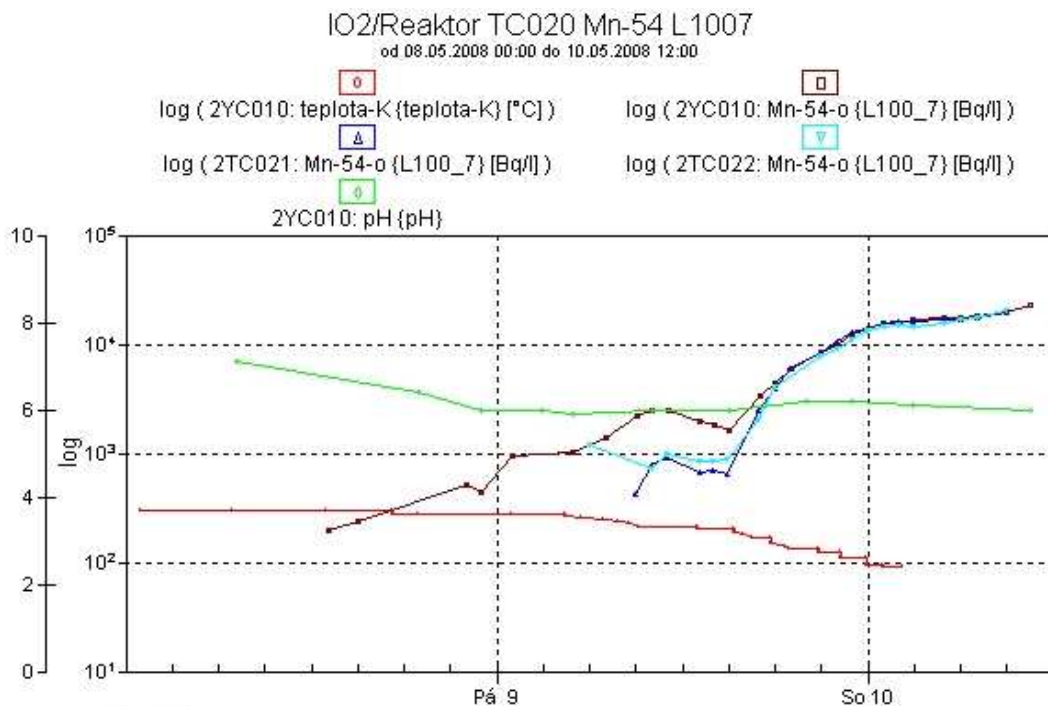


Graf 8. Mn_rozpuštěný/ICP-MS- reaktor, vstup/výstup filtru

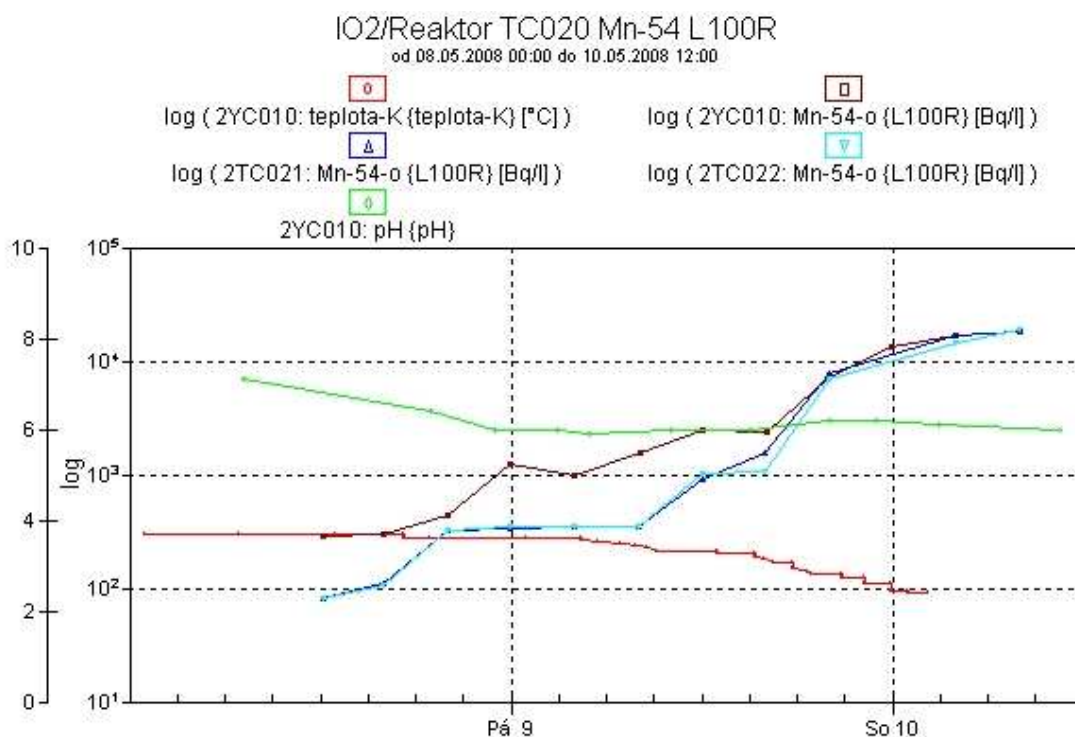


Graf 9. Fe,Cr,Ni,Mn_celkové/ICP-MS- reaktor

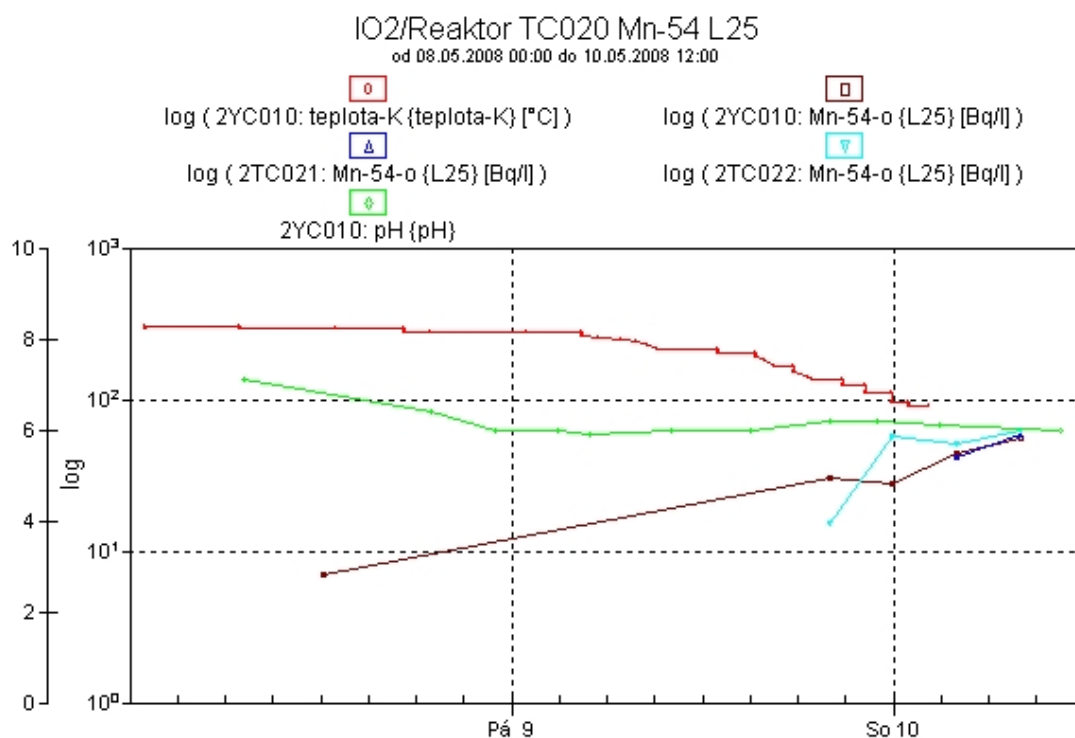
4.3.2 Výsledky radiochemických analýz (Gamaspektrometrie)



Graf 10. Mn-54_celkový/gamaspektrometrie- reaktor, vstup/výstup filtru



Graf 11. Mn-54_rozpuštěný/gamaspektrometrie- reaktor, vstup/výstup filtru



Graf 12. Mn-54_nerzpuštěný/gamaspektrometrie- reaktor, vstup/výstup filtru

5 DISKUZE

Smyslem této práce bylo sledovat chování aktivovaných korozních produktů a korozních produktů v technologii primárního okruhu při změně fyzikálně chemických parametrů a na jejich základě vyhodnotit efektivnost provozování mechanického vysokoteplotního a vysokotlakého filtru. Za tímto účelem byly shromážděny dostupné podklady, které se tvorbou a chováním korozních produktů nějak zabývají. Dále byla provedena příprava monitorovacího testu, jehož cílem bylo získání dostatečného množství dat potřebných ke konečnému vyhodnocení. Naplánovaný test zahrnoval zabezpečení optimálního průběhu odběru vzorků z technologie primárního okruhu a mechanického vysokoteplotního a vysokotlakého filtru a jejich následných analýz. Test se konal v průběhu odtavování reaktoru na druhém výrobním bloku jaderné elektrárny Temelín na konci páté palivové kampaně. V této době probíhalo na elektrárně mnoho dalších činností souvisejících s odstávkou. Výsledkem důkladné přípravy testu bylo úspěšné zvládnutí a nenarušení součinnosti ostatních prací na elektrárně.

Součástí přípravy bylo důležité správně vybrat zařízení na kterém se test prováděl, vytvořit rozpis ručních odběrů vzorků a určit jejich rozsah analýz. Vybraný filtr na druhé cirkulační smyčce byl dle plánu odstaven jako poslední ze všech filtrů a tak se podařilo odebírat vzorky až do úplného dochlazení chladiva v primárním okruhu. K úspěšnému monitorování bylo také důležité dodržet i časový rozpis odběru vzorků, který byl závislý především na dodržení harmonogramu odstávky. Jelikož se nestala žádná neočekávaná situace která by posunula činnosti související s odstávkou reaktoru, vypracovaný rozpis se podařilo úspěšně zachovat. Zvládnuta byla i četnost odběrů vzorků. Volba intervalu jednou za hodinu se ukázala jako optimální, protože se podařilo zachytit průběhy chování aktivovaných korozních produktů a korozních produktů v závislosti na změnách fyzikálně-chemických parametrů v primárním okruhu.

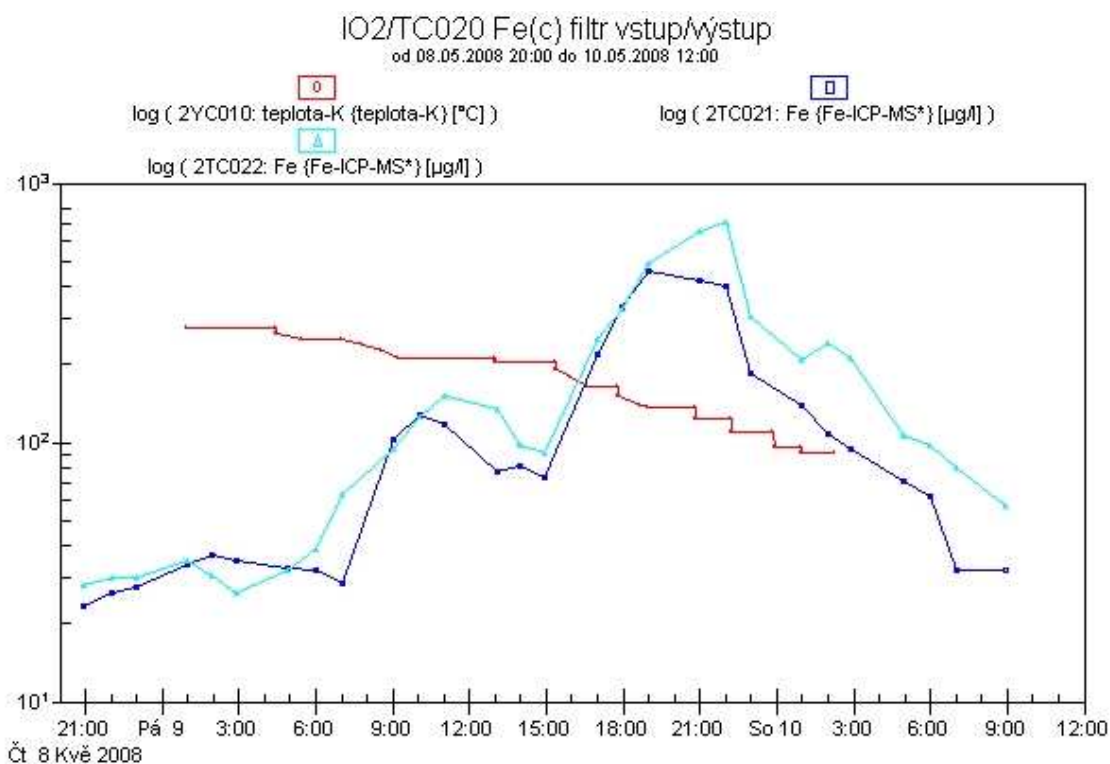
Vyhodnocení naměřených výsledků předcházelo vytvoření samostatných grafů pro každý z měřených kovů dále rozdělených po jednotlivých parametrech. Grafy mají jednotný formát se stejným barevným rozlišením podle odběrových míst a jsou ve stejném časovém rozsahu. Předlohy všech grafů jsou uloženy pro další použití v CHEMIS.

V kapitole 4.3.1. jsou zobrazeny grafy koncentrací kovů analyzovaných pomocí spektrometru ICP-MS. Ukázalo se, že ze všech sledovaných kovů byly naměřeny hodnoty nad mezí stanovitelnosti u těch kovů, které mají v konstrukčních materiálech primárního okruhu nejvyšší hmotnostní zastoupení. Nejvyšších koncentrací dosahovalo Fe, které se začalo uvolňovat do chladiva primárního okruhu z povrchů technologie primárního okruhu bezprostředně po snížení hodnoty $\text{pH}_{(T)}$. Při poklesu $\text{pH}_{(T)}$ na hodnotu 6 se začaly uvolňovat do chladiva primárního okruhu i kovy Cr, Ni, Mn. V důsledku snižování teploty začalo další uvolňování Fe, Ni, Mn do chladiva primárního okruhu. Celý průběh je zobrazen v grafu 9.

Při důkladnější analýze výskytu forem Fe, Cr, Ni a Mn v chladivu primárního okruhu bylo zjištěno, že je koncentrace celkové formy identická s koncentrací rozpuštěné formy. Tedy všechny sledované prvky se vyskytují v chladivu primárního okruhu během odstavování bloku v rozpuštěné formě.

Při interpretaci naměřených hodnot koncentrací v jednotlivých odběrových místech byla zjištěna u Fe a Ni anomálie. Oba prvky měly v chladivu primárního okruhu vstupujícího do mechanického vysokoteplotního a vysokotlakého filtru výrazně vyšší koncentrace než chladivo primárního okruhu v reaktoru. Pro objasnění této anomálie je nutné při opakování tohoto testu rozšířit rozsah vzorkovacích míst o systém technologie čištění drenážních vod primárního okruhu.

U Fe byly naměřeny maximální hodnoty koncentrací na vstupu filtru $453 \mu\text{g.l}^{-1}$ a na výstupu filtru $650 \mu\text{g.l}^{-1}$. Nárůstem hodnot koncentrací na výstupu z filtru oproti vstupu bylo prokázáno, že u Fe docházelo k rozpouštění a jeho uvolňování z mechanického vysokoteplotního a vysokotlakého filtru do chladiva primárního okruhu, viz Graf 13.



Graf 13. Fe_celkové/ICP-MS – porovnání vstup/výstup filtru

Z výsledků radiochemických analýz pomocí gamaspektrometrie bylo zjištěno, že Mn-54 je jediným izotopem, na základě jehož aktivity je možno sledovat vliv změny fyzikálně-chemických parametrů na rozpouštění aktivovaných korozních produktů. V kapitole 4.3.2. jsou uvedeny grafy všech měřených forem Mn-54. Průběh aktivit celkové i rozpuštěné formy Mn-54 je stejný jako průběh analytické koncentrace Mn v celkové i rozpuštěné formě. U nerozpuštěné formy Mn-54 je stanovení aktivity ovlivněno zbytkovým množstvím kapaliny ze vzorku, které ulpívá na membránovém filtru po jeho filtraci. Jelikož se rovněž jedná o velmi nízké hodnoty aktivity, není možno využít výsledky nerozpuštěné formy Mn-54 k diskusi a závěrům. U ostatních izotopů jsou naměřené aktivity pod úrovní minimální detekovatelné aktivity.

Vyhodnocením výsledků Mn-54 ze všech odběrových míst se nepotvrdilo rozpouštění tohoto izotopu z mechanického vysokoteplotního a vysokotlakého filtru.

6 ZÁVĚR

Na základě analýz v odebraných vzorcích podle navrženého a realizovaného monitorovacího programu byla ověřena efektivnost provozování mechanického vysokoteplotního a vysokotlakého filtru 2TC20N01 v době odstavování reaktoru.

Vyhodnocením naměřených výsledků byla potvrzena hypotéza. V průběhu odstavování bloku dochází v důsledku změn fyzikálně-chemických parametrů technologie primárního okruhu k uvolňování železa z mechanického vysokoteplotního a vysokotlakého filtru do chladiva primárního okruhu.

Za účelem komplexnějšího hodnocení chování aktivovaných korozních produktů a korozních produktů v technologii primárního okruhu při odstavování nebo najíždění reaktoru rozšířit rozsah vzorkovacích míst o systém technologie čištění drenážních vod primárního okruhu.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- 1) 2TC013. *Celoblokový provozní předpis, Vodocemický režim primárního okruhu*, Jaderná elektrárna Temelín, ČEZ a.s., 2006.
- 2) 2TL001. *Limity a podmínky, Základní provozní předpis*, Jaderná elektrárna Temelín, ČEZ a.s., 2006.
- 3) 2TS122. *Systémový provozní předpis, Provozní předpis pro systém kontinuálního čištění chladiva primárního okruhu*, Jaderná elektrárna Temelín, ČEZ a.s., 2008.
- 4) Activity transports mechanisms in water cooled reactors. In *Coolant technology of water cooled reactors*. Vinna, IAEA, October 1992. TECDOC-667.
- 5) Corrosion in the primary coolant systems of water cooled reactors. In *Coolant technology of water cooled reactors*. Vienna , IAEA, September 1992. IAEA TECDOC-667.
- 6) ČEZ_ME_0540r04. *Odběr/analýza vzorku na ETE*. Jaderná elektrárna Temelín, ČEZ a.s., leden 2009.
- 7) ČEZ_ME_666r01. *Monitorování tvorby aktivovaných korozních produktů v technologii PO na ETE*. Jaderná elektrárna Temelín, ČEZ a.s., červen 2008.
- 8) ČEZ_PCH041r02. *Stanovení Celkové aktivity gama*, Jaderná elektrárna Temelín, ČEZ a.s., srpen 2007.
- 9) ČEZ_PCH588r00. *CHEMIS*, Jaderná elektrárna Temelín, ČEZ a.s., srpen 2007.
- 10) ČEZ_PP_750r00. *Pracovní postup pro obsluhu a údržbu přístroje, ICP-MS Agilent 7500*. Jaderná elektrárna Temelín, ČEZ a.s., listopad 2005.
- 11) HLAVÁČOVÁ, J. *CHemie JE VVER 1000*. BRNO , ČEZ a.s., květen 2002.
- 12) Martykán, M. Jaderná elektrárna Temelín, 2010 (e-mail)

- 13) Monitorování tvorby aktivovaných korozních produktů na 1.bloku JE Temelín v průběhu 1.kampaně, ÚJV Řež a.s., 2004. ÚJV Z 1061
- 14) Primary Water Chemistry and High Temperature Filtration System Experience at Temelin VVER 1000 NPP. In *International Conference On Water Chemistry Of Nuclear Reactor System*, Berlin, 2008. TB430-08.
- 15) Realizace programu E038 při horkých zkouškách na 2.bloku JE Temelín, *Monitorování parametrů vodo-chemického režimu a vyhodnocení vzorků pasivační vrstvy*, ÚJV Řež a.s., 2002. ÚJV Z 796.
- 16) Vonková,K. ÚJV Řež, 2010 (e-mail)

8 KLÍČOVÁ SLOVA

Aktivované korozní produkty, chemický režim, korozní produkty, mechanická vysokoteplotní a vysokotlaká filtrace, pasivace, radiační pole.

9 SEZNAM ZKRATEK

9.1 Použité zkratky:

AFMVT	Aktivní filtr mechanický vysokoteplotní tlakový
ETE	Elektrárna Temelín
HCC	Hlavní cirkulační čerpadlo
CHEMIS	Chemický informační systém
ICP-MS	Indukčně vázaná plazma – hmotnostní detektor
I.O.	Primární okruh
JE	Jaderná elektrárna
Me(c)	Metal (kov) celkový
Me(r)	Metal (kov) rozpuštěný
Me(n)	Metal (kov) nerozpuštěný
SVO	Systéma vodoočistky, Systém vodního čištění
VVER	Vodo-Vodjanyj Energetičeskij Reaktor, Vodo-vodní energetický reaktor
L100	Celková aktivita ve vzorkovnici o objemu 100ml
L100_7	Celková aktivita po 7dnech ve vzorkovnici o objemu 100ml
L100R	Aktivita rozpuštěných izotopů ve vzorkovnici o objemu 100ml
L25	Aktivita nerozpuštěných izotopů v odměrné baňce o objemu 25ml