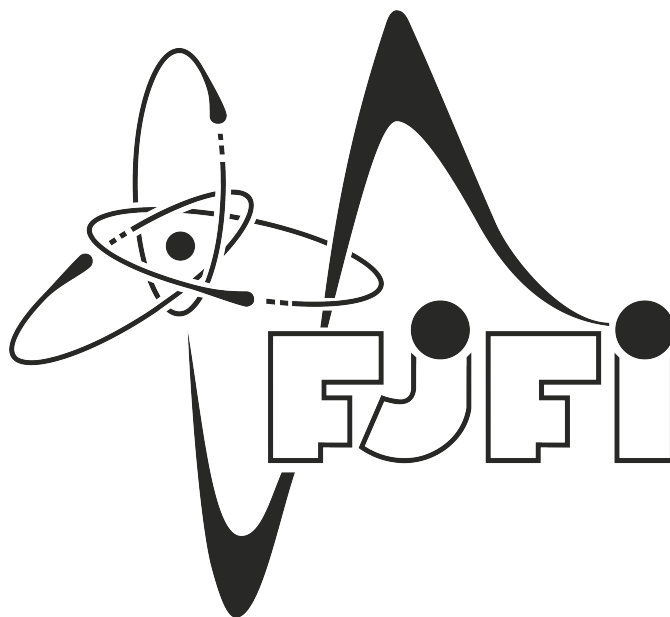


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů
Obor: Jaderné inženýrství



Citlivostní analýza reaktoru LVR-15
v závislosti na vstupní teplotě do
reaktoru

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Kamila Ooppelová
Vedoucí práce: Ing. Marek Ruščák
Konzultant práce: Ing. Filip Fejt, Ph.D.
Rok: 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....
Kamila Ooppelová

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu Ing. Marku Ruščákovi za věcné rady k práci a za vždy pozitivní přístup. Z oddělení Termohydraulických výpočtů v CVŘ s.r.o. bych chtěla poděkovat především Ing. Antoniu Dambrosiovi za veškerý čas, který mi věnoval při konzultacích termohydraulického kódu RELAP5 a Ing. Janu Syblíkovi. Za užitečné komentáře a rady bych ráda poděkovala svému konzultantovi Ing. Filipu Fejtovi (KJR FJFI), Ph.D., ale také Ing. Dušanu Kobylkovi, Ph.D. (KJR FJFI) za cenné připomínky a Ing. Sebastianu Nývltovi (KJR FJFI) za velmi detailní korekturu. Rodině bych ráda poděkovala za trpělivost, kterou se mnou během bakalářského studia na FJFI měli a svým dvěma kocourům za psychickou podporu a nehynoucí lásku.

Kamila Ooppelová

Název práce:

Citlivostní analýza reaktoru LVR-15 v závislosti na vstupní teplotě do reaktoru

Autor: Kamila Ooppelová

Obor: Jaderné inženýrství

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Marek Ruščák
Oddělení Termohydraulické výpočty
Sekce Výzkum bezpečnosti
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Konzultant: Ing. Filip Fejt, Ph.D.
Katedra jaderných reaktorů
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
České vysoké učení technické v Praze

Abstrakt: Tato bakalářská práce se zabývá citlivostní analýzou reaktoru LVR-15 pro kampaň K221, která probíhala v srpnu roku 2020. Citlivostní analýzou je myšlený proces, kdy se zvolí jeden nebo více vstupních proměnných parametrů a studuje se závislost sledovaných parametrů na různých hodnotách zvolených proměnných parametrů. Jako proměnný parametr byla zvolena vstupní teplota chladiva do AZ a jako sledované parametry teplota pokrytí palivových článků a koeficient zásoby do počátku povrchového varu (rezerva do podchlazeného varu; ONBR). Analýza byla provedena pomocí modelu v systémovém výpočetním kódu RELAP5.

Klíčová slova: reaktor LVR-15, citlivostní analýza, kód RELAP5, ONBR

Title:

Sensitivity analysis on LVR-15 reactor in regards to coolant inlet temperature

Author: Kamila Ooppelová

Abstract: This bachelor project deals with the sensitivity analysis of the LVR-15 reactor for the K221 campaign, which took place in August 2020. Sensitivity analysis is the process of selecting one or more input variable parameters and studying the dependence of the observed parameters on different values of the selected variable parameters. The input temperature of the coolant to the reactor core was chosen as the variable parameter and the observed parameters were the temperature of the fuel cladding and ONBR. The analysis was performed using the model in the RELAP5 system calculation code.

Key words: LVR-15 reactor, sensitivity analysis, RELAP5 code, ONBR

*If you can dream it
you can do it.*

Walt Disney

Obsah

Seznam použitých zkratk	1
Seznam použitých veličin	2
Seznam tabulek	3
Seznam obrázků	4
Úvod	5
1 Reaktor LVR-15	6
1.1 Historie reaktoru	6
1.2 Reaktorová nádoba	7
1.3 Aktivní zóna	9
1.4 Palivový článěk IRT-4M	10
1.5 Systémy chlazení reaktoru a pomocné systémy	11
1.5.1 Primární okruh	11
1.5.2 Sekundární okruh	12
1.5.3 Terciární okruh	13
1.6 Systémy významné z hlediska bezpečnosti	13
1.7 Provozní limity a podmínky	21
1.7.1 Bezpečnostní limit výkonu reaktoru	21
1.7.2 Bezpečnostní limit pro odvod zbytkového tepla	22
1.7.3 Provozní limity reaktivity	22
1.8 Termohydraulické charakteristiky	23

1.9	Neutronické charakteristiky	24
2	Výpočetní kód RELAP5	26
2.1	Popis kódu	26
2.2	Popis použitého modelu	28
3	Výpočet	29
3.1	Měření a výpočet provozního stavu	29
3.2	Sledované parametry	31
3.2.1	Teplota pokrytí PČ	32
3.2.2	ONB(R)	32
3.3	Stacionární stav	34
3.4	Přechodový stav	35
	Závěr	41
	Seznam použitých zdrojů	43
	Přílohy	I
A	Schéma PO LVR-15	II
B	Potrubní schéma PO LVR-15	III

Seznam použitých zkratek

<i>Zkratka</i>	<i>Význam zkratky</i>
1D	jedno-dimenzionální
AR	automatický regulátor
AZ	aktivní zóna reaktoru
HAVČ	havarijní čerpadlo(a)
HCC	hlavní cirkulační čerpadlo(a)
HMI	rozhraní člověk-stroj (human-machine interface)
HT	havarijní tyč(e)
JB	jaderná bezpečnost
KT	kompenzační tyč(e)
LaP	limity a podmínky
LB-LOCA	velká havárie s únikem chladiva (large break loss of coolant accident)
LOFA	havárie se ztrátou průtoku (loss of flow accident)
ONB	počátek podchlazeného varu (onset of nucleate boiling)
ONBR	rezerva do počátku podchlazeného varu (onset of nucleate boiling ratio)
PČ	palivový článěk
PO	primární okruh
RaL	radioaktivní látky
SB-LOCA	malá havárie s únikem chladiva (small break loss of coolant accident)
SO	sekundární okruh
SOR	system ochran a řízení

Seznam použitých veličin

<i>Název veličiny</i>	<i>Značka veličiny</i>	<i>Název jednotky</i>	<i>Značka jednotky</i>
čas	t	sekunda	s
		minuta	min
délka, šířka, výška, průměr	l, s, h, d	metr	m
hmotnost	m	kilogram	kg
hustota toku neutronů	ϕ	inverzní čtvereční centimetr a sekunda	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
objem	V	litr	l
		metr krychlový	m^3
obohacení	w_5	procento	%
otáčky	ω	otáčky za minutu	$\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$
pH faktor	pH	<i>bezrozměrné</i>	–
plocha	S	metr čtvereční	m^2
plošná hustota tepelného toku	q	watt na metr čtvereční	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
průtok	\dot{Q}_V	metr krychlový za hodinu	$\text{m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$
reaktivita	ρ	beta efektivní	β_{ef}
tepelný výkon	P_t	watt tepelný	W_t
teplota	T	Celsiův stupeň	$^{\circ}\text{C}$
tlak absolutní	p	pascal	Pa
		bar	bar
		atmosféra	atm
měrná vodivost	G	siemens na metr	$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$

Seznam tabulek

1.1	Technické parametry reaktorové nádoby [2, 4]	8
1.2	Projektové hodnoty hustoty toku u tepelných neutronů [2]	9
1.3	Projektové termohydraulické parametry chladiva při výkonu 9,7 MW _t [2]	9
1.4	Základní charakteristiky palivového článku IRT-4M [2, 14]	11
1.5	Konfigurace pro maximální tepelný výkon 9,7 MW _t [2]	12
1.6	Limitní provozní podmínky pro palivový článek IRT-4M [2, 14]	18
1.7	Vybrané hydraulické charakteristiky z předprovozního měření AZ K221 [17]	23
1.8	Naměřené teploty chladiva během kampaně K221 [13]	24
1.9	Váhy jednotlivých tyčí [7]	25
3.1	Srovnání naměřených teplot s vypočítanými teplotami kódem RELAP5 [13]	31

Seznam obrázků

1.1	Pohled na reaktor LVR-15 [4]	7
1.2	3D model reaktoru LVR-15 [4]	8
1.3	Řez PČ IRT-4M 6trubková varianta, upraveno z [14]	10
1.4	Řez PČ IRT-4M 8trubková varianta, upraveno z [14]	10
1.5	Charakteristika HCČ č.2, data převzata z [2]	23
1.6	Rozložení tepelného (štěpného) výkonu na jednotlivých pozicích AZ [7]	24
1.7	Lineární hustota tepelného výkonu 8trubkového PČ na pozici C4 [7]	25
3.1	Kartogram AZ kampaně K221 s legendou [5]	30
3.2	Nukiyamova křivka, upraveno z [18]	33
3.3	Citlivostní analýza stacionárního stavu	35
3.4	Časová závislost teploty pokrytí PČ během přechodového stavu	36
3.5	Časová závislost průtoku chladiva během přechodového stavu	37
3.6	Časová závislost výkonu reaktoru během přechodového stavu	37
3.7	Časová závislost teploty pokrytí PČ během přechodového stavu	38
3.8	Časová závislost ONBR během přechodového stavu	39
3.9	Citlivostní analýza přechodového stavu v čase $t = 9,3$ s	40
A1	Schéma primárního okruhu se zpětným okruhem [2]	II
B1	Potrubní schéma PO s umístěním odporových teploměrů, upraveno z [8]	III

Úvod

Reaktor LVR-15 je výzkumný reaktor vysokého výkonu, který je provozován po kampaních. Jednotlivé kampaně mají různé konfigurace AZ, a je proto nutné dělat pro každou kampaň bezpečnostní neutronické a termohydraulické analýzy. Součástí termohydraulických analýz je kontrola, že nedojde k překročení limitních podmínek palivových článků, konkrétně k překročení maximální teploty pokrytí palivových článků a minimálního koeficientu zásoby do povrchového varu (rezervy do podchlazeného varu; ONBR).

Proces, kdy se studuje závislost změny vybraných pozorovaných parametrů na vybraných variabilních vstupních parametrech, se nazývá citlivostní analýza.

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s již existujícím modelem v kódu RELAP5 a použít tento model k provedení citlivostní analýzy vybrané kampaně reaktoru LVR-15 pro stacionární a vybraný přechodový stav, a to v závislosti na změně vstupní teploty chladiva do aktivní zóny.

Obsah práce: První kapitola je věnována teoretickému popisu výzkumného reaktoru LVR-15. Druhá kapitola se věnuje systémovému výpočetnímu kódu RELAP5 a použitému modelu reaktoru LVR-15 v tomto kódu. Třetí a zároveň poslední kapitola se zabývá prezentováním a diskuzí výsledků.

Kapitola 1

Reaktor LVR-15

V areálu ÚJV Řež, a.s. ve Středočeském kraji se nachází dva výzkumné reaktory. Reaktor nízkého výkonu LR-0 a reaktor vysokého výkonu LVR-15, jehož termohydraulickou analýzou se zabývá tato práce. Pokud není uvedeno jinak, veškeré informace v této kapitole pocházejí z [2].

Výzkumný reaktor LVR-15 je lehkovodní heterogenní reaktor tankového typu s nucenou cirkulací chladiva, v primárním okruhu je udržován přibližně atmosférický tlak. Pro jeho provoz se využívá palivo IRT-4M a je provozován po kampaních, jejichž obvyklá délka je 3 týdny. Poté následuje 10-14denní odstávka, během které dochází k údržbě a výměně paliva. Maximální provozní tepelný výkon reaktoru je 10 MW_t. Reaktor se využívá zejména na následující výzkumné a průmyslové činnosti: výzkum v oblasti fyzikální metalurgie, experimenty v horizontálních kanálech (ÚJF AV, FJFI ČVUT), výroba radiofarmak, neutronová aktivační analýza, neutronová záchyťová terapie a další. [4]

1.1 Historie reaktoru

První výzkumný reaktor v Řeži u Prahy byl spuštěn roku 1957 a byl provozován Ústavem jaderné fyziky ČSAV. Tento reaktor měl název VVR-S a jeho tepelný výkon byl 2 MW_t. Roku 1964 proběhla první rekonstrukce, jejímž účelem bylo zvýšit výkon reaktoru na 4 MW_t. Tato úprava spočívala v zdrsnění povrchu (vytlačení šroubovice) palivových článků EK-10, čímž se zvýšil součinitel přestupu tepla. Postupem času bylo ve VVR-S potřeba navýšit hustotu toku neutronů. Z toho důvodu se roku 1974 uskutečnila další rekonstrukce za účelem zvýšení výkonu reaktoru na 10 MW_t. V rámci této rekonstrukce došlo k výměně roštu AZ (tzv. separátoru) a z palivových článků EK-10 se přešlo na trubkové sendvičové palivo typu IRT-2M. V rámci této rekonstrukce mimo jiné došlo i k výměně systému řízení a ochrany a k modernizaci systému dochlazování reaktoru. [2]

V roce 1988 začala přestavba reaktoru VVR-S na LVR-15. Tento projekt byl dokončen již začátkem osmdesátých let a jeho hlavní motivací bylo zvýšení provozní bezpečnosti.



Obr. 1.1: Pohled na reaktor LVR-15 [4]

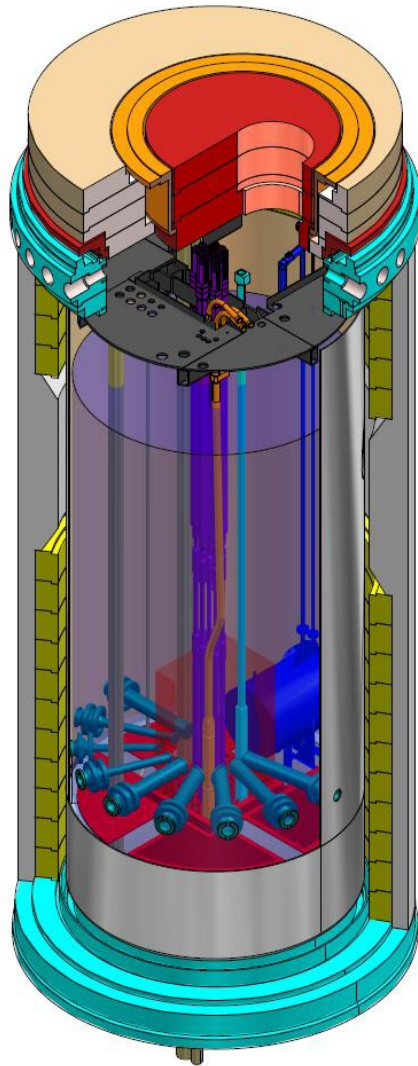
Na projektu se podílela zejména společnost Chemoprojekt Praha a bezpečnostní dokumentaci byla vyhotovena vyhotovena v ÚJV Řež, stejně tak i program zajištění jakosti. Rekonstrukce se zaměřila na následující systémy a zařízení reaktoru VVR-S: nádoba a vnitřní části reaktoru, systém řízení a ochran reaktoru, primární okruh (PO), halový jeřáb, vzduchotechnika, systém měření technologických parametrů, stacionární dozimetrický systém, transport vzorků do reaktoru a ozářeného materiálu z reaktoru včetně horkých komor, systém napájení elektrickou energií včetně náhradního zdroje.

Finální úprava reaktoru LVR-15 (do současné podoby) byla dokončena v květnu roku 1989. Fyzikální spouštění reaktoru proběhlo téhož roku v červnu a energetické spouštění až na výkon 10 MW_t v červenci. Se zkušebním provozem se začalo 8.8.1989. Ten trval až do 31.5.1995, kdy byl zahájen provoz trvalý. Během trvalého provozu až do současnosti došlo na reaktoru k několika významným změnám a událostem. Mezi ně patří například nadlimitní únik ^{131}I do okolí LVR-15 v roce 1997, ukončení užívání paliva s obohacením 80 %, zatopení části budovy reaktoru během povodní roku 2002 a finální přechod z paliva IRT-2M na IRT-4M s obohacením 19,7 % v roce 2011 aj.

1.2 Reaktorová nádoba

Reaktorová nádoba je tvaru válce a je vyrobena z austenitické oceli 08CH18N10T. K nádobě jsou přivařena 2 vstupní hrdla o jmenovité světlosti DN 300 a jedno výstupní hrdlo

o jmenovité světlosti DN 400 (všechna ve spodní části nádoby reaktoru). Základní technické parametry reaktorové nádoby jsou uvedeny v Tab. 1.1.



Obr. 1.2: 3D model reaktoru LVR-15 [4]

Tab. 1.1: Technické parametry reaktorové nádoby [2, 4]

vnější průměr nádoby	2300 mm
výška nádoby	5760 mm
tloušťka stěny nádoby	15 mm
tloušťka dna nádoby	20 mm
hmotnost nádoby bez vody	7900 kg
objem vody v nádobě	22 m ³

1.3 Aktivní zóna

Aktivní zóna (AZ) reaktoru LVR-15 je uložena v koši AZ vyrobeného z hliníku. AZ reaktoru má čtvercovou geometrii o rozteči 71,5 mm s celkovou kapacitou 8x10 pozic. V AZ se nachází 28-34 palivových článků IRT-4M a ve 12 z nich jsou uloženy regulační tyče (8 kompenzačních, 3 havarijní, 1 součást automatického regulátoru). Chladivem a moderátorem reaktoru je demineralizovaná voda, reflektorem voda a beryllium. Chladivo proudí AZ shora dolů.

Způsob konfigurace AZ na následující kampaň se přizpůsobuje plánovanému využívání reaktoru. První možná varianta obsahuje až 4 smyčkové kanály a v případě potřeby je možné pomocí neutronové pasti (v podobě vodního nebo vzduchového vytěsňitele, berylliových bloků případně vhodných ozařovacích kanálů) zvýšit hustotu toku tepelných neutronů. Ozařovací pozice vzniklé touto cestou, kde je zvýšený tok tepelných neutronů, jsou využívány k ozařování terčů určených k výrobě Mo-Tc generátorů, které se využívají při radiodiganostických metodách.

Druhá možná varianta AZ byla navržena pro borovou neutronovou záchyťovou terapii, kdy se využívá vzduchových vytěsňitelů ke kolimaci neutronových svazků.

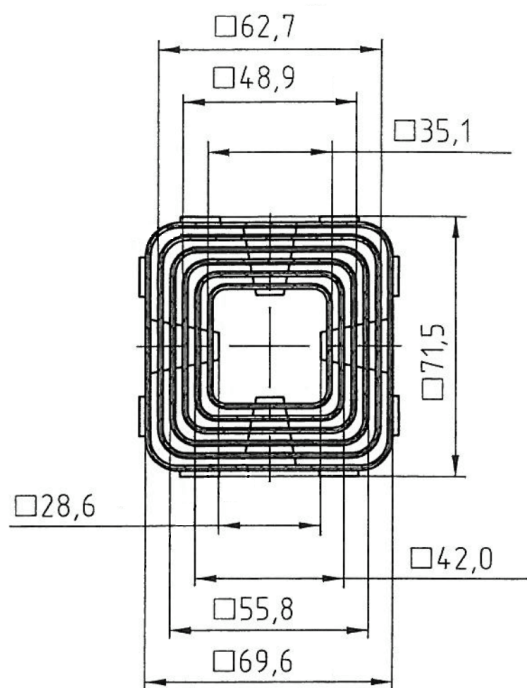
Neutronické a termohydraulické projektové parametry AZ jsou uvedeny v Tab. 1.2, 1.3.

Tab. 1.2: Projektové hodnoty hustoty toku tepelných neutronů při výkonu 9,7 MW_t [2]

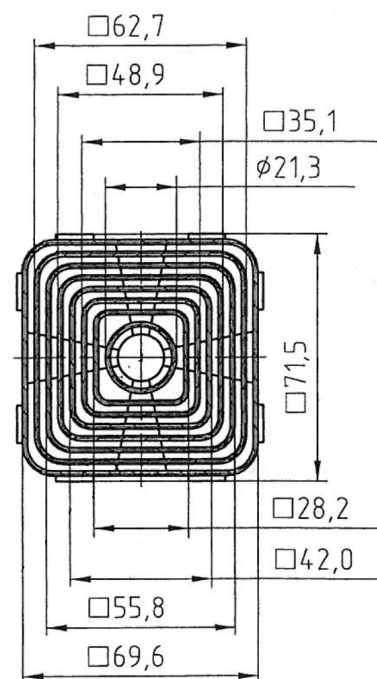
maximální tok tepelných neutronů	$2,2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
průměrný tok tepelných neutronů	$1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
tok tepelných neutronů v reflektoru na vstupu do horizontálních kanálů	$1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Tab. 1.3: Projektové termohydraulické parametry chladiva při výkonu 9,7 MW_t [2]

tlak v AZ	1 atm
maximální střední vstupní teplota	45 °C
maximální výstupní teplota	51,5 °C
maximální průtok AZ	2100 m ³ ·hod ⁻¹
výška hladiny nad AZ	3625 mm



Obr. 1.3: Řez PČ IRT-4M 6trubková varianta, upraveno z [14]



Obr. 1.4: Řez PČ IRT-4M 8trubková varianta, upraveno z [14]

1.4 Palivový článek IRT-4M

PČ IRT-4M jsou dodávány výrobcem NZCHK Novosibirsk, spadajícím do konsorcia TVEL. Jedná se o palivo trubkového typu, kde je štěpným materiálem ^{235}U obohacený na 19,7 % ve formě disperze UO_2 a hliníku. PČ mají čtvercový průřez a je v nich umístěno 6 nebo 8 koncentrických trubek také čtvercového průřezu. Celková délka PČ je 882 mm, z toho 600 mm je délka aktivní (tedy palivové části). Řez PČ obou variant je zobrazen na Obr. 1.3, 1.4.

Koncovky a pokrytí PČ tvoří materiál SAV1 (slitina hliníku, hořčíku, křemíku [14]). Z důvodu manipulace s PČ je horní koncovka opatřena otvorem pro snadné uchopení. Dolní koncovka má 4 výřezy z důvodu stabilního usazení do nosné desky (roštu). 8trubková varianta tvoří většinu PČ v AZ. Její střed tvoří hliníkový vytěsňitel, který lze v případě potřeby z AZ vyjmout. V centrálním otvoru 6trubkové varianty je dostatek prostoru k instalování pouzdra pro regulační tyče nebo ozařovacího kanálu.

Každoročně jsou PČ kontrolovány dle mezinárodních smluv a dohod inspektory z IAEA, SÚJB a Euratom. Obohacení do 20 % vyhovuje programu RERTR. [1]

V Tab. 1.4 jsou uvedeny základní charakteristiky PČ IRT-4M, v Tab. 1.6 pak jeho limitní provozní podmínky.

Tab. 1.4: Základní charakteristiky palivového článku IRT-4M [2, 14]

palivový článek	IRT-4M
složení palivové vrstvy	UO ₂ - Al
váhové zastoupení složek paliva	²³⁵ U(10,9), ²³⁸ U(44,1) Al(37,5), O(7,5)
obsah UO ₂ v 8trubkové variantě	300 ± 15 g
obsah UO ₂ v 6trubkové variantě	263,8 ± 13,1 g
celková hmotnost 8trubkové varianty	6 kg
celková hmotnost 6trubkové varianty	5,2 kg
tloušťka stěny	1,6 mm
tloušťka pokrytí	0,45 mm
tloušťka palivové vrstvy	0,7 mm

1.5 Systémy chlazení reaktoru a pomocné systémy

Systém chlazení reaktoru se skládá z primárního, sekundárního a terciárního okruhu, systému odvodu zbytkového tepla a nouzového dochlazování a systému havarijní sprchy. Tento chladicí systém zajišťuje provozní a nouzové dochlazování, odvod zbytkového tepla, doplňování chladiva, havarijní sprchování AZ a zpětný okruh (čerpaní uniklé vody ze záchytné vany zpět do reaktorové nádoby).

1.5.1 Primární okruh

PO zabezpečuje nucenou cirkulaci chladiva mezi reaktorovou nádobou a 2 tepelnými výměníky. Chladicím médiem je demineralizovaná voda, která se po výstupu z reaktoru dělí do 7 větví. Ve větvi je šoupě na sání čerpadla, čerpadlo, zpětná klapka a další šoupě. Poté se chladivo opět sbíhá do jednoho potrubí, které se dále dělí do dvou větví, na kterých jsou tepelné výměníky. Po tepelných výměnících zůstávají stále dvě větve, ve kterých jsou umístěny clony pro měření průtoku a šoupě regulace průtoku. Tyto větve pak vedou zpět do reaktoru. Schéma primárního okruhu je v Příloze A na Obr. A1.

Součástí PO je 5 hlavních cirkulačních čerpadel (HCČ) a 2 čerpadla havarijní (HAVČ). Při provozu s výkonem vyšším než 50 kW je vždy v provozu jedno havarijní čerpadlo

(HAVČ č.6 nebo HAVČ č.7), hlavní cirkulační čerpadlo HCC č.1 a k němu příslušný počet dalších HCC v závislosti na daném výkonu. Při výpadku dodávky elektřiny z elektrické sítě dojde k napájení HAVČ ze záložní baterie, HCC č.1 se zastaví a k jeho opětovnému provozu dojde po naběhnutí dieselgenerátoru, tedy po cca 10 s. HCC č.2 slouží jako 100% záloha. Konfigurace nastavení pro maximální provozní tepelný výkon $9,7 \text{ MW}_t$ je uvedena v Tab. 1.5.

Tab. 1.5: Konfigurace pro maximální tepelný výkon $9,7 \text{ MW}_t$ [2]

průtok	$1500 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$
počet HCC	3
počet HAVČ	1

Čerpadla jsou jednostupňová odstředivá spirální a jsou vyrobená z nerezové oceli z důvodu radioaktivních kapalin. HCC a HAVČ se liší pouze v typu pohonu – pohon HCC je trojfázový motor s kotvou na krátko, naproti tomu pohon HAVČ je stejnosměrný motor s buzením.

Potrubní schéma PO a odporových teploměrů je zobrazeno v Příloze B na Obr. B1. Na PO reaktoru LVR-15 se k měření vstupní a výstupní teploty chladiva z a do AZ používají odporové teploměry Pt100. Jedná se o stonkové snímače, které jsou umístěny v jímkách potrubí PO. Přesnost celého detekčního řetězce včetně převodníku je do 1 % a je periodicky ověřována.

Průtok PO se měří na pomoci clon mezi výstupním šoupětem tepelného výměníku a regulačním šoupětem na vstupu do reaktoru a to na obou větvích. Tlakový rozdíl na clonách je snímán převodníky tlakové diference. Přesnost celého detekčního řetězce včetně převodníku je do 1 %. Převodníky jsou kontrolovány s 5letou periodou. V současné době mají výchozí ověření z výroby, kde by chyba neměla být větší než 0,005 %. Umístění clon je zobrazeno v Příloze B na Obr. B1.

1.5.2 Sekundární okruh

Sekundární okruh (SO) zprostředkovává přenos tepla mezi primárním a terciárním okruhem. Mimo jiné slouží i jako pojistka v případě nežádoucího úniku média z PO (případně RaL) do řeky Vltavy v případě porušení primárního tepelného výměníku. Z tohoto důvodu je v SO udržován tlak větší než v PO, a to minimálně o $0,45 \text{ MPa}$, maximálně však $1,5$ násobku tlaku v PO. Tlak v okruhu je vytvářen dopouštěním redukčním ventilem. SO je uzavřený a chladicím médiem je zde upravená užitková voda, jejíž objem v okruhu je přibližně 65 m^3 a průtok při výkonu vyšším než 8 MW_t minimálně $750 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$. Součástí SO jsou také 2 expanzní tlakové nádoby o celkovém objemu 1000 l z důvodu kompenzace roztažnosti vody.

1.5.3 Terciární okruh

Terciární okruh odvádí teplo z SO do řeky Vltavy a musí být v provozu vždy, když je výkon reaktoru vyšší než 50 kW_t . Dle Vodoprávního výměru Odboru vodního a lesního hospodářství a zemědělství pro okres Praha-Východ nesmí výstupní teplota vody z terciárního okruhu přesahovat $26 \text{ }^\circ\text{C}$. Voda je z řeky čerpána na 31,5. říčním kilometru na pravém břehu. Poté prochází filtry, aby byla zbavena mechanických nečistot větších než $0,65 \text{ mm}$. Průtok vody okruhem je od 250 do $850 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$. Roční spotřeba vody pro terciární okruh tvoří $3\,500\,000 \text{ m}^3$. Během roku se teplota v řece pohybuje mezi 3 a $17 \text{ }^\circ\text{C}$ [19]. Vzhledem k tomu, že teplota v řece přímo ovlivňuje teplotu v SO, resp v PO, je nutné regulovat průtok chladiva v terciárním okruhu, aby bylo předávané teplo stále stejné. Z tohoto důvodu je spotřeba vody z řeky ovlivněna zejména teplotou vody v řece a v PO.

1.6 Systémy významné z hlediska bezpečnosti

Podle vyhlášky SÚJB č. 329/2017 Sb. O požadavcích na projekt jaderného zařízení a podle doporučení IAEA SS No 35-S1 (Code on the Safety of Nuclear Research Reactors: Design) byly jako bezpečnostně významné systémy označeny následující: Systém ochran a řízení, Systém primárního okruhu, Systém havarijního dochlazování, Havarijní sprcha, Systém ventilace reaktoru, Budova reaktoru LVR-15, Aktivní zóna, Palivový článek, Systém zásobování elektrickou energií, Systém manipulace a skladování paliva, Požární ochrana. Tyto systémy budou diskutovány níže.

Systém ochran a řízení

Systém ochran a řízení (SOŘ) je určený k řízení štěpné reakce a je důležitým zařízením pro zajištění jaderné bezpečnosti (JB). Součástí SOŘ je monitorování neutronového toku, manuální/automatické řízení reaktoru, neustálá kontrola stavu reaktoru, vlastní kontrola SOŘ před spuštěním reaktoru a během jeho provozu, manuální/automatické odstavení reaktoru při překročení daných limitů (např. příliš vysoký výkon, případně příliš velký růst výkonu reaktoru apod.)

Mezi funkční celky SOŘ patří:

- Zařízení pro měření neutronového toku a rychlosti jeho změny

Měření neutronového toku zajišťují identické na sobě nezávislé soustavy. Čidlem těchto soustav jsou štěpné komory RJ-1300, které jsou umístěné v suchých vertikálních kanálech v reaktorové nádobě. Vrstvu štěpného materiálu v komorách tvoří U_3O_8 s obohacením 90% . Komory jsou plněné argonem a mohou být provozovány v pulzním nebo proudovém režimu. Jejich měřicí rozsah je $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

- Havarijní řetězec

Havarijní řetězec je realizován jako sériové řazení relé od daných havarijních signálů. Pokud dojde k přenosu havarijního signálu, obvody s relé se přeruší. V následku toho přestanou být napájeny elektromagnety spojek regulačních tyčí, čímž dojde k pádu všech tyčí do AZ a k odstavení reaktoru.

- Řídicí systém

Data z monitorování PO¹ i další monitorovaná data jsou zobrazována na obrazovkách rozhraní člověk-stroj (HMI) ve velínu reaktoru. V případě automatické regulace výkonu má operátor možnost zadat prostřednictvím HMI následující parametry: neutronový tok, relativní rychlost změny výkonu a tepelný výkon reaktoru.

- Prostředky pro kontakt s obsluhou

V levé části operátorského pultu se nacházejí ovládací prvky: tlačítka kvitování zvukové a světelné signalizace poruch a havarijního řetězce, poruchová signalizace, nezávislé displeje neutronových zařízení, spínání prvků SOŘ a havarijního řetězce a ovládání řídicích tyčí. Počítačové pracoviště HMI, které slouží k provozu reaktoru, zajišťuje možnost zobrazení provozního stavu reaktoru, technologických veličin, jejich tisk a tisk záznamů a poruchových stavů, dále zobrazení provozních údajů pro jednotlivé zařízení, údržbu počítačových systémů SOŘ a elektronické ukládání veškeré potřebné dokumentace. Obrazovky HMI jsou rozděleny na horní a dolní statickou lištu a prostor mezi nimi, který je určený pro zobrazování technologických obrazovek. Horní lišta zobrazuje aktuální datum a čas, poruchová hlášení, aktuální tepelný výkon a další vybrané veličiny a diagnostiku řídicího systému a komunikace. Technologické obrazovky jsou rozděleny podle jednotlivých úseků na AZ, chladič okruh, systém měření, čerpadla, elektrotechnika, vzduchotechnika, pomocná zařízení, alarmy, diagnostika a trendy.

- Prvky pro změnu reaktivity

Výkonnými prvky pro změnu reaktivity jsou na reaktoru LVR-15 regulační tyče UR-70 složené z kadmiového plechu na hliníkovém jádře. Tyčí se v reaktoru nachází dohromady 12. Konstrukční řešení všech tyčí je stejné, ale jejich funkce z hlediska provozu rozdílná. Dělí se na havarijní (HT01, HT04, HT12) a kompenzační tyče (KT02, KT03, KT08, KT09, KT10, KT11) a tyč automatického regulátoru (AR7). Havarijní tyče jsou 3 a jsou součástí havarijní ochrany. Pracovní poloha havarijních tyčí je vždy horní koncová poloha. Pracovní poloha kompenzačních tyčí a automatického regulátoru není jednoznačně určena, tyto tyče tedy mohou být v libovolné poloze od horní koncové polohy po dolní koncovou polohu.

¹Tato data jsou vyhodnocována automaticky a srovnávána s určenou mezí pro případné spuštění varovné signalizace na pultu operátorské stanice. Pomocí těchto dat se stanovuje tepelný výkon reaktoru.

- Komunikace mezi subsystémy SOŘ

K přenosu dat se v rámci SOŘ využívá redundantní síť (Ethernet, redundantní linky RDD, liniová komunikace PROFIBUS DP a duplexní sériové linky RS422).

Systém primárního okruhu

Napájení pohonů HCČ, s výjimkou HCČ č.1, je realizováno střídavým proudem ze síťového rozvaděče o napětí 380 V. HCČ č.1, které po rekonstrukci funguje jako další havarijní čerpadlo, je napájeno ze sítě o napětí 400 V. Pokud tedy dojde k výpadku sítě, HCČ č. 2, 3, 4, 5 ztratí napájení a není možné je použít k dochlazování reaktoru. HCČ č.1 je v případě výpadku proudu napájeno z dieselgenerátoru, má tedy stejnou funkci jako havarijní čerpadla. Pohon HAVČ tvoří stejnosměrné motory s regulací otáček pomocí změny napětí na kotvě. Maximální hodnota otáček je 1525 ot/min. Pokud dojde k výpadku sítě, HAVČ jsou prvních 10 s napájeny z akumulátorové baterie. Po cca 10 s je uveden do provozu dieselgenerátor a poté jsou HAVČ napájeny z něj.

Cílem PO je odvádět provozní a zbytkové teplo. K tomu, aby systém splňoval správně svou funkci, je nutné dodržovat:

- objem průtoku chladiva a jeho vstupní teplota musí odpovídat takovým parametřům, aby chladivo bylo schopné odvést produkované množství tepla včetně rezervy (určení těchto parametrů probíhá na základě termohydraulických výpočtů a jsou zahrnuty do LaP);
- funkční spolehlivost čerpadel a zařízení s nimi spojených musí být dostatečná (čerpadla, armatury, potrubí PO a reaktorová nádoba jsou zařazeny do bezpečnostní třídy 2 a jejich kontroly se řídí Programem provozních kontrol);
- je nezbytné zabránit veškerým nepřípustným únikům chladicího média (jsou sledovány ucpávky čerpadel a šoupat, těsnění horizontálních kanálů, v případě indikace úniku chladiva jsou přiváděny signály do SOŘ na operátorském pultu; větší úniky se projeví poklesem hladiny v reaktorové nádobě, od které je odvozena výstražná signalizace);
- celek PO musí být rezistentní vůči vzniku poruch a jejich případnému šíření;
- v případě havarijního nebo abnormálního stavu musí být aktivní jiné systémy, které jsou schopny zasáhnout (např. zpětný okruh, jehož čerpadla se v případě potřeby zapínají automaticky a jejich chod je oznámen signalizací na operátorském pultu).

Systém havarijního dochlazování

Pokud dojde ke ztrátě napájení ze sítě, dochlazování reaktoru zajišťují HAVČ a pokud byl výkon reaktoru ve chvíli odstavení vyšší než 50 kW_t, tak se po naběhnutí dieselgenerátoru

ke chlazení připojuje i HCC č.1. HAVČ mají 3 pracovní režimy:

- provozní režim (v provozu jedno HAVČ, HCC č.1 a příslušný počet dalších HCC; HAVČ v provozním režimu dosahují $1000 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ nebo $1200 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$)
- havarijní režim (při havarijním režimu pracuje HAVČ s $800 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$, při těchto otáčkách je průtok chladiva $270 \text{ m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$; doběh HCC č.1 po výpadku je 7-10 s, než se však úplně zastaví, je opět přivedeno do provozu pomocí dieselgenerátoru)
- režim dochlazování po ukončení provozu (během plánované odstávky zajišťuje jedno HAVČ spolu s HCC č.1 dochlazení reaktoru, a to při otáčkách stejných jako při provozním režimu, případně je možné otáčky snížit na hodnoty stejné jako během havarijního režimu)

Cílem systému havarijního dochlazování je zajistit odvod tepla z AZ během havarijních podmínek (nejpravděpodobnější scénář je výpadek síťového napájení). Ke správnému fungování systému je nutné dodržet:

- chladivo musí mít takové parametry, aby bylo možné odvést teplo včetně rezervy
- systém musí v případě havarijního stavu dostatečně rychle reagovat
- funkční spolehlivost systému musí být dostatečná a musí být zajištěn náhradní zdroj napájení

Pokud dojde k výpadku elektrické sítě a k odstavení reaktoru, dojde k dochlazení bez překročení bezpečnostních limitů v případě, že bude v provozu jedno HAVČ, které zajistí průtok v PO minimálně $250 \text{ m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$.

Havarijní sprcha

Mezi další bezpečnostně významné systémy reaktoru LVR-15 patří také havarijní sprcha. Havarijní sprcha se spouští automaticky, pokud hladina vody v reaktoru klesne pod 4,1 m, což je hranice mezi výstražnou a havarijní úrovní. Ventil havarijní sprchy je otevřený tak dlouho, dokud hladina vody v reaktoru nevystoupá na 4,35 m. Havarijní sprcha je schopná vykompenzovat únik vody trhlinou o ploše 4 cm^2 v místě nejnižšího bodu PO po dobu cca jedné hodiny (což při nádržích naplněných na 75 % odpovídá úniku $4,4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$). Za předpokladu, že kromě havarijní sprchy je provozuschopný i hydrant s technickou vodou, je maximální zvládnutelný únik trhlinou o pološe cca 8 cm^2 po 3800 s (což odpovídá úniku $8 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$). Pro správné fungování havarijní sprchy musí být splněny následující požadavky:

- průtok potrubím a objem nádrží musí disponovat dostatečnou kapacitou;
- automatická reakce systému na havarijní stav musí být dostatečně rychlá;
- spolehlivost havarijní sprchy musí být dostatečná.

System ventilace reaktoru

Ventilační systém reaktoru slouží k následujícím účelům:

- odvod radioaktivních plynů vytvořených při provozu reaktoru;
- k vytvoření a udržení určeného tlaku v reaktoru a horkých komorách;
- k výměně vzduchu v reaktorové hale.

Všechny výše uvedené body jsou realizovány pomocí podtlakové ventilace. Aby bylo zamezeno šíření požáru ventilačním potrubím, jsou zde umístěny protipožární uzávěry. Zároveň jsou ve ventilačních systémech umístěny účinné filtry, aby bylo zabráněno úniku RaL. Systémy jsou napojené na dozimetrický systém, aby byly neustále kontrolovány objemové aktivity a pracovníci neobdrželi vyšší než povolené dávky a zároveň aby nedošlo k vyšší radioaktivní výpusti než stanovují provozní i havarijní podmínky stanovené zákonem. K zajištění funkčnosti systému ventilace je třeba aby:

- ventilační systém musí být vybavený příslušnými filtry a musí být možné jej průběžně kontrolovat a to ve všech provozních režimech; zároveň musí být dostatečně spolehlivý, výkonný a zálohovaný;
- dozimetrický systém napojený na systém ventilační musí být dostatečně vybavený a spolehlivý a musí umožňovat měření objemových aktivit aerosolů a plyných exhalátů;
- varovné a havarijní úrovně měřených objemových aktivit musí být stanoveny korektně.

Aby došlo k zajištění výše uvedených požadavků, jsou v rámci LaP přesně dané hodnoty pro odsávaný vzduch, podtlak, podmínky pro filtry v jednotlivých větvích aj.

Budova reaktoru LVR-15

Budova, ve které je reaktor LVR-15 umístěn, složí jako fyzická bariéra pro případný únik RaL do životního prostředí a zároveň chrání bezpečnostní systémy před vnějšími i vnitřními událostmi. Budova po rekonstrukci v roce 2001 splňuje soudobé vyhlášky SÚJB. Na budovu reaktoru LVR-15 je vypracován plán (vnitřního) havarijního plánování. Havarijní plánování se nevztahuje na vnější prostory.

Aktivní zóna

AZ je navržena a provozovaná tak, aby při normálním a abnormálním provozu nedošlo k překročení mezních hodnot palivových článků a zároveň aby, i v případě havarijního

stavu, bylo možné reaktor bezpečně odstavit a z AZ byl zajištěn odvod tepla. Konkrétní požadavky jsou uvedeny v §32 a §33 vyhlášky 329/2017 Sb. o požadavcích na projekt jaderného zařízení.

Požadavků stanovených vyhláškou však není možné docílit pouze konstrukcí AZ jako takové, nýbrž závisí i na SOŘ a celkově systému chlazení. Provozní podmínky těchto systému závisí na LaP.

Dodržení požadavků na mechanické vlastnosti (geometrie, zabránění stavům vedoucím k omezení chlazení AZ či regulace a odstavení reaktoru) bylo docíleno požadavky na projektování reaktoru.

Palivový článek

Aby nedošlo k poškození PČ, mnoho omezení a opatření spojených se SOŘ, systémem chlazení a systémem dochlazování jsou stanoveny právě tak, aby nedošlo k překročení jejich limitů. Dá se tedy říci, že tyto limitní podmínky slouží jako podklady pro návrh a bezpečnostní analýzy zbylých systémů reaktoru. Limitní provozní podmínky PČ jsou uvedeny v Tab. 1.6, kde koeficient zásoby do povrchového varu² je veličina definována a podrobně rozebrána v podkapitole 3.2.2.

Tab. 1.6: Limitní provozní podmínky pro palivový článek IRT-4M [2, 14]

parametry chladiva	hodnota
pH	5,5-6,5
vodivost	$<2,0 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
maximální tlak na vstupu do AZ	132 kPa
maximální tlakový spád na AZ	39 kPa
maximální rychlost v mezerách mezi palivovými trubkami PČ	$3,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
maximální teplota chladiva na vstupu do AZ	50 °C
maximální hustota tepelného toku	$0,663 \text{ MW}_t\cdot\text{m}^{-2}$
maximální teplota pokrytí paliva	98 °C
minimální koeficient zásoby do povrchového varu	1,3

²Přesnější popis sledovaného jevu je *rezerva do podchlazeného varu*. Termín *koeficient zásoby do povrchového varu* je však používán v provozních dokumentaci reaktoru LVR-15, a proto tak bude nazýván v této práci.

Systém zásobování elektrickou energií

Reaktor je připojen na rozvodnou síť 230/400 V areálu ÚJV Řež. V případě, že by došlo k výpadku napájení elektrickou energií ze sítě, je zajištěno napájení pomocí dvou na sobě nezávislých systémů zajištění napájení, jejichž nouzové zdroje v podobě dieselgenerátorů (umístěných v suterénu budovy) nejsou nijak závislé na rozvodné síti. Systémy zajištění napájení podporují bezpečnostní funkce odstavení a udržení reaktoru v bezpečném stavu (napájení SOŘ) a odvod zbytkového tepla (napájení HCC č.1, HAVČ).

Systémy LVR-15 se pro stanovení požadavků elektrických zařízení z hlediska plnění JB dělí na důležité a nedůležité.

Systém manipulace a skladování paliva

Palivové články IRT-4M jsou v oblasti horní koncovky opatřeny evidenčním číslem, pod kterým jsou vedeny v databázi IAEA, v deníku změn AZ a v případě pohybu PČ také ve směnovém deníku.

Manipulace s palivem provádí pouze personál k tomu kvalifikovaný a řídí se Programem pro transport, skladování a nakládání s palivem.

Neozářené palivo

Čerstvé (tedy neozářené) palivo je skladováno v objektu 363 areálu ÚJV Řež. Ve skladu je umístěno 8 trezorů, ve kterých jsou fixační mříže. Fixační mříže zajišťují podkritičnost i v případě zaplavení místnosti vodou. Celková kapacita skladu je 96 palivových článků.

Veškerý transport palivových článků probíhá v obalovém souboru TK-S16 o maximálním počtu tří článků a musí být schválen SÚJB. Oprávnění na vydávání palivových článků má vedoucí evidence jaderného materiálu, a to na základě potvrzení ve směnovém deníku.

Ve skladu čerstvého paliva je možné skladovat i budoucí terče pro výrobu Mo-Tc generátorů. Z hlediska fyzické ochrany je sklad pracovištěm 1. kategorie. Pro výpočet kritičnosti se předpokládá naplnění jednoho trezoru vzorky a zbylých trezorů palivovými články. V případě zaplavení místnosti vodou je $k_{ef} = 0,7448$ a tedy splňuje požadavek na podkritičnost daný §13 odst. 2 písm. f) vyhlášky 329/2017 Sb. o požadavcích na projekt jaderného zařízení.

Ozářené palivo

Ozářené palivo je po vyjmutí z reaktoru skladováno v mokřém zásobníku vyhořelého paliva (kapacita 60 PČ) a bazénu (kapacita 96 PČ), odkud je nejdříve po 2 letech přesunuto do skladu vysoce aktivních odpadů. Aby mohlo k vyjmutí paliva z AZ dojít, musí být reaktor odstaven minimálně 48 hod.

Bazén i mokrý zásobník jsou vybaveny distanční mřížkou o rozteči 150 x 150 mm, která zajišťuje podkritičnost PČ. Chladicí kapalinou je zde demineralizovaná voda o stejných chemických vlastnostech jako chladivo PO. Pro podmínky optimální moderace bylo spočítáno, že podkritičnost systému bude rovna $k_{\text{eff}} = 0,886$, tedy hodnotě splňující podmínky vyhovující §13 odst. 2 písm. f) vyhlášky 329/2017 Sb. o požadavcích na projekt jaderného zařízení. Pro případ havárie musí být v mokřém zásobníku dostatečný počet volných buněk pro všechny PČ uložené v reaktoru.

Požární ochrana

Cílem požární ochrany v budově reaktoru LVR-15 je mimo ochrany lidského zdraví, života a majetku také zajištění jaderné bezpečnosti (JB). Zajištěním JB je v tom případě myšleno bezpečné odstavení reaktoru, odvod zbytkového tepla a zamezení úniku radioaktivních látek (RaL) do životního prostředí.

Odstavení reaktoru

Jak bylo popsáno v odstavci věnovanému SOŘ v této kapitole, v systémech regulačních tyčí jsou elektromagnety, které v případě přenosu havarijního signálu přestanou být napájeny, v důsledku čehož dojde k pádu tyčí do AZ.

V případě požáru v rozvodné soustavě SOŘ může dojít buď k přímému poškození kabeláže ohněm, nebo v důsledku vyhoření izolace dojde ke zkratu obvodu. Oba případy ale vedou na přerušení dodávky napájení elektromagnetů a tedy i na bezpečné odstavení v případě požáru.

Odvod zbytkového tepla

Čerpadla, která zajišťují dochlazování AZ po odstavení reaktoru, jsou umístěna ve společných prostorách, s tím i jejich kabeláž. Lze tedy předpokládat, že během požáru budou čerpadla postupně ztrácet funkčnost v závislosti na vývoji požární situace. Pokud v důsledku požáru dojde k základní projektové nehodě, tedy ke stavu, kdy po odstavení nebude možné odvádět zbytkové teplo, dojde sice k překročení teploty pokrytí PČ nad hodnotu LaP, ale nedojde k jeho poškození a tedy ani k úniku RaL do ŽP.

Zamezení úniku RaL do životního prostředí

Nejvíce radionuklidů v budově se nachází v PČ uložených v AZ, skladovacím bazénu, mokřém zásobníku použitého paliva a chladivu PO. Všechny tyto zdroje radionuklidů jsou uloženy pod vodní hladinou a není tedy možno je rozptýlit požárem. Únik radionuklidů z jiných zdrojů by byl buď malý, a tedy zachytitelný ventilačním filtrem, čímž by nevedl k překročení povolených limitů (mírně kontaminovaná voda z experimentálních

smyček, polyetylenové pytle s pevnými radioaktivními odpady), nebo velmi nepravděpodobný (betonové horké komory, ocelové kontejnery se zdroji ionizujícího záření).

1.7 Provozní limity a podmínky

Pro bezpečný provoz výzkumného reaktoru je třeba stanovit provozní parametry a požadavky na vybavení a personál jaderného zařízení. Tato provozní omezení a požadavky vznikají na základě bezpečnostních analýz daného jaderného zařízení a souhrně se nazývají *Provozní limity a podmínky*. Součástí dokumentu je postup obsluhy reaktoru v případě nesplnění těchto podmínek. [2, 9]

Platnost jednotlivých LaP je specifikována v závislosti na aktuálním provozním stavu reaktoru. Provozní režimy reaktoru jsou:

- Režim 1: výkon reaktoru je 50 kW_t až 10 MW_t, PO v provozu, SO natlakovaný a provozuschopný
- Režim 2: uvádění reaktoru do kritického stavu
- Režim 3: odstavený reaktor s dochlazovacím čerpadlem v provozu, regulační tyče v dolní koncové poloze, SO natlakovaný a provozuschopný, SOŘ, měření a regulace a dozimetrický systém v provozu
- Režim 4: odstavený reaktor bez dochlazování, regulační tyče v dolních koncových polohách, podkritičnost minimálně $-4 \beta_{ef}$
- Režim 5: výkon reaktoru do 50 kW_t, chladicí okruh mimo provoz.

V následujících podkapitolách jsou popsány vybrané LaP.

1.7.1 Bezpečnostní limit výkonu reaktoru

Odvozujícím kritériem je zabezpečení celistvosti pokrytí PČ IRT-4M při provozu reaktoru. Platnost těchto limitů je pro Režim 1. Limitní podmínky jsou:

- Tepelný výkon reaktoru nesmí překročit nominální výkon o více než 25 %, tedy $N_{max} < 12,5 \text{ MW}_t$
- Kombinace ustáleného tepelného výkonu, minimálního průtoku chladiva a vstupní teploty musí zajistit, že koeficient zásoby do povrchového varu paliva bude minimálně 1,3 (stanovení podle korelace Bergles & Roshenow), čímž se zabrání vzniku povrchového varu.

Pokud výkon přesáhne výše uvedenou hodnotu, reaktor automaticky přechází do Režimu 3 (tj. odstavený reaktor). Není-li splněna podmínka zajišťující koeficient zásoby do povrchového varu, musí být zvýšena intenzita chlazení reaktoru na takovou hodnotu, aby byla podmínka splněna.

1.7.2 Bezpečnostní limit pro odvod zbytkového tepla

Cílem je zajistit, aby nedošlo k poškození PČ po odstavení reaktoru vlivem zbytkového tepelného výkonu. Platnost limitů je pro Režim 3. Limitní podmínky jsou:

- Minimální průtok chladiva PO $\dot{Q}_{V,\min} = 200 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$
- Maximální výstupní teplota chladiva z AZ $T_{\max} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$
- Minimální výška hladiny chladiva v reaktorové nádobě $H_{\min} = 4 \text{ m}$
- Minimální doba dochlazování AZ $t_{\min} = 30 \text{ min}$.

Pokud průtok chladiva klesne pod $\dot{Q}_{V,\min}$, dochází ke zvýšení průtoku regulačními soupaty. Dojde-li k překročení výstupní teploty chladiva $T_{\max} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, je nutné uvést do provozu SO, případně TO. Pokud toho z provozních důvodů nelze docílit (např. výpadek elektrické sítě), dochází zásahem obsluhy reaktoru k chlazení chladiva pomocí jeho čerpání ze zásobních nádrží.

1.7.3 Provozní limity reaktivity

Cílem je zajistit, že reaktor je v jakoukoli chvíli bezpečně provozován a lze ho bezpečně odstavit, a to bez překročení ostatních LaP. Platnost limitů je pro všechny Režimy. Limitní podmínky jsou:

- poměr záporné reaktivity regulačních tyčí a maximálně dosažitelného přebytku reaktivity nesmí být větší než 2;
- podkritičnost systému ve studeném a neutráveném stavu se všemi regulačními tyčemi v dolní koncové poloze nesmí překročit hodnotu $-4 \beta_{\text{ef}}$;
- ve studeném a neutráveném systému bez experimentálních zařízení nesmí být maximální přebytek reaktivity větší než $11 \beta_{\text{ef}}$;
- při výměně paliva a změn konfigurace AZ musí být podkritičnost systému minimálně $-4 \beta_{\text{ef}}$;
- reaktivita automatického regulátoru nesmí přesáhnout hodnotu $0,7 \beta_{\text{ef}}$ a jeho rychlost pohybu nesmí překročit uvolnění reaktivity větší než $0,1 \beta_{\text{ef}} \cdot \text{s}^{-1}$;
- rychlost kladných změn reaktivity standardních manipulací nesmí přesáhnout hodnotu $0,1 \beta_{\text{ef}} \cdot \text{s}^{-1}$;
- manipulace a změny AZ neřízené SOŘ lze provádět pouze, pokud jsou všechny havarijní prvky v maximu své účinnosti a podkritičnost systému je minimálně $-4 \beta_{\text{ef}}$;
- Maximální provozně uvolnitelný přebytek reaktivity nesmí být větší než $0,7 \beta_{\text{ef}}$.

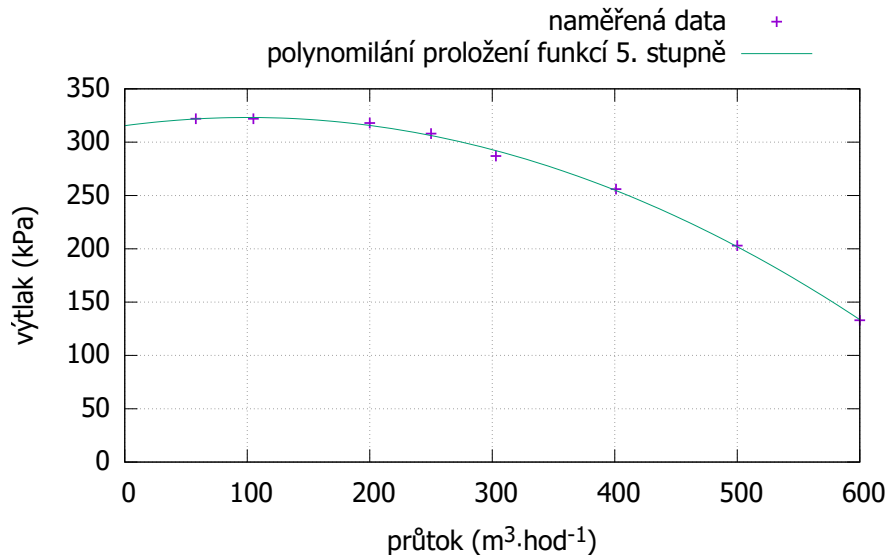
Při překročení limitů prvních 4 bodů je nutné změnit konfiguraci AZ tak, aby byly LaP splněny, a to buď změnou počtu PČ nebo bloků berylliového reflektoru. Při nesplnění limitu pro reaktivitu automatického regulátoru je třeba stanovit takovou polohu tyče, nebo omezit zdvih tyče tak, aby byla podmínka splněna. V případě, že není splněn poslední bod, nelze reaktor uvést do Režimu 1, 2, 5 a je nutné provést úpravu AZ, aby byla podmínka dodržena.

1.8 Termohydraulické charakteristiky

Výsledky předprovozního měření (tzv. zkoušky před najetím) vybraných hydraulických vlastností kampaně K221, které probíhá vždy před začátkem každé kampaně, jsou uvedeny v Tab. 1.7. Charakteristika HCC č.2 je zobrazena v grafu na Obr. 1.5. Měření vstupních teplot chladiva do AZ na větví A i B a měření výstupní teploty chladiva z AZ je uvedeno v Tab. 1.8.

Tab. 1.7: Vybrané hydraulické charakteristiky z předprovozního měření AZ K221 [17]

průtok	1568 m ³ ·hod ⁻¹
tlakový zisk na čerpadle	43,5 kPa
tlaková ztráta na větví A	44 kPa
tlaková ztráta na větví B	44 kPa
HCC č.1,2,4 + HAVČ č.7	1000 ot·min ⁻¹



Obr. 1.5: Charakteristika HCC č.2, data převzata z [2]

Tab. 1.8: Naměřené teploty chladiva během kampaně K221 [13]

	naměřená teplota (°C)
vstupní větev A	43,3
vstupní větev B	42,5
výstup	48,8

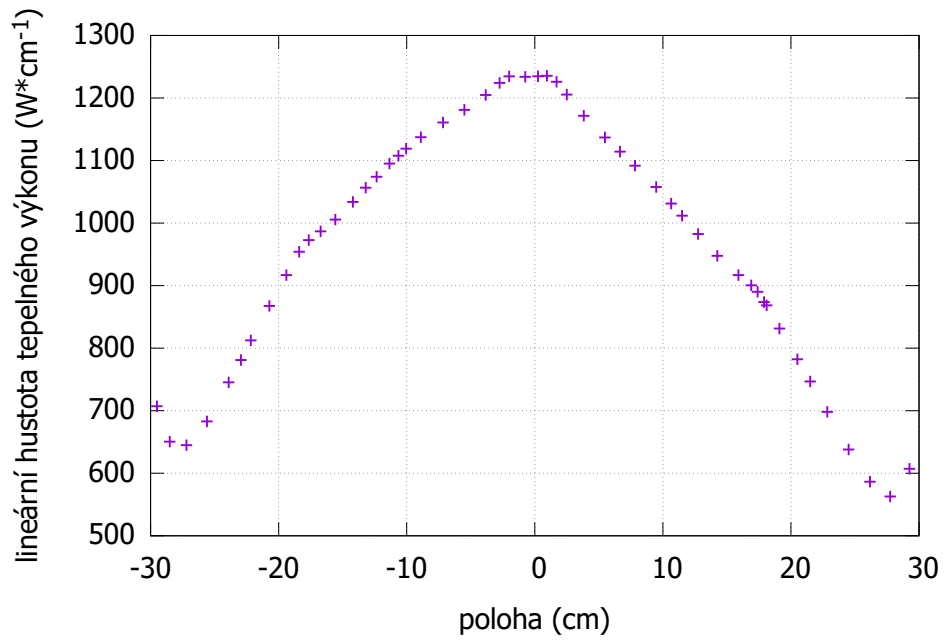
1.9 Neutronické charakteristiky

Na Obr. 1.6 je zobrazeno rozložení tepelného výkonu PČ v procentech vůči celé AZ. Bílé pozice neobsahují štěpný materiál (např. berylliový reflektor, vytěsnitele) a negeneruje se v nich tedy žádný tepelný (štěpný) výkon. Na pozicích D4, D5, E4 a E5 jsou umístěny kanály na terče pro následnou výrobu Mo-Tc generátorů. Na pozici C4, kde dosahuje generovaný tepelný výkon maxima, je umístěný 8trubkový PČ. Lineární hustota tepelného výkonu po délce tohoto PČ je zobrazena na Obr. 1.7.

	A	B	C	D	E	F	G	H
10								
9								
8								
7			3.16	3.54	3.78	3.18	1.96	
6		3.08	3.65	4.24	4.38	3.90	2.27	
5		3.82	4.93	0.69	0.69	4.99	2.62	
4			5.31	1.28	1.46	4.79	1.94	
3		2.95	2.25	3.39	3.80	3.25	1.65	
2		2.63	2.46	3.31	2.43	2.24		
1								

Obr. 1.6: Rozložení tepelného (štěpného) výkonu na jednotlivých pozicích AZ (% vůči celé AZ), data převzata z [7]

Váhy jednotlivých tyčí a jejich umístění je uvedeno v Tab. 1.9, kde KT jsou kompenzační tyče, HT havarijní a AR je automatický regulátor. Veškeré neutronické vlastnosti popisují vlastnosti kampaně K221.



Obr. 1.7: Lineární hustota tepelného výkonu 8trubkového PČ na pozici C4, data převzata z [7]

Tab. 1.9: Váhy jednotlivých tyčí [7]

tyč	pozice	váha [β_{ef}]
KT02	G6	0,82
KT03	C6	1,51
KT05	C3	1,46
KT06	E3	1,75
KT08	G5	1,12
KT09	F6	1,57
KT10	G4	1,12
KT11	F3	1,47
HT01	D6	1,84
HT04	D3	1,80
HT12	E6	1,84
AR7	G3	0,81

Kapitola 2

Výpočetní kód RELAP5

Vývoj termohydraulického kódu RELAP začal v 70. letech 20. století v Idaho National Laboratory za účelem simulací chladicího systému během provozních přechodových stavů a havárií lehkovodních reaktorů metodou nejlepšího odhadu (best estimate). V současné době se na pracovišti Termohydraulických výpočtů v CVŘ s.r.o. pro bezpečnostní analýzy využívá verze SCDAP/RELAP5. Jedná se o sloučení dvou výpočetních kódů, kde RELAP5 modeluje termohydraulické procesy a kinetiku reaktoru a SCDAP poškození AZ. [16]

2.1 Popis kódu

Výpočetní kód RELAP5 je naprogramovaný v jazyce FORTRAN 77. Uvažuje 1D šíření tepla v deskové, sférické nebo cylindrické geometrii. V rámci objektů lze v kódu namodelovat reaktorovou nádobu, palivové proutky, regulační tyče, tepelné výměníky, turbíny, kondenzátory, čerpadla, separátory vlhkosti, potrubí, ventily, hydroakumulátory, elektroohříváky a součásti SOŘ. Kód obsahuje přes 25 různých tekutin, včetně vody, plynů, tekutých kovů a tekutých solí. [10, 11]

Mezi scénáře, které je SCDAP/RELAP5 z hlediska chladicího systému AZ schopen simulovat, patří malý i velký únik chladiva (SB-LOCA, LB-LOCA), přechodové provozní jevy (kde se nepředpokládá havarijní odstavení), ztráta napájení z elektrické sítě, ztráta napájecí vody a ztráta průtoku (LOFA). Výpočty chladicího systému jsou počítány na základě dvoufázového modelu, který umí zohlednit nerovnoměrně rozložené teplotní a rychlostní pole obou fází chladiva a proudění chladiva v oblasti porézního lože trosek a překážek způsobených poškozením AZ. Model popisující AZ je schopen zohlednit nafukování (tzv. *ballooning*) a oxidaci palivových proutků, roztavení palivových proutků a regulačních tyčí, uvolnění štěpných produktů a poškození spodní části reaktorové nádoby v důsledku vzniku lože trosek AZ. [16]

Hydrodynamika

V rámci hydrodynamiky lze v kódu RELAP5 popsat přechodové 1D proudění dvousložkové dvoufázové směsi voda-vodní pára, která může navíc obsahovat nezkondenzovatelné složky ve fázi vodní páry, případně rozpuštěné složky ve fázi vody. V modelu lze použít mnohá zjednodušení, a to uvažování homogenního proudění, rovnosti teplot vody a vodní páry nebo zanedbání tření. Pohybové rovnice dvousložkových kapalin jsou formulované pro parametry proudění ve sledovaném objemu a středované za časový interval. Pro případ jevů jako je například podchlazený var, byly vytvořeny speciální modely popisující daný jev. Model se řeší pomocí semi-implicitní metody konečných diferencí. [10]

Termohydraulický model je řešen na základně osmiválcového modelu pro 8 závislých proměnných. Těmito proměnnými jsou tlak, měrné energie obou fází, objemový zlomek par, rychlosti obou fází, koncentrace bóru a hmotnostní podíl nerozpustných plynů (definovaný jako podíl hmotnosti nerozpustných plynů ku celkové hmotnosti plynné fáze). Nezávislými proměnnými jsou čas a poloha. [10]

Tepelné struktury

Tepelné struktury v RELAP5 umožňují výpočet přenosu tepla z hydrodynamických objemů přes pevné hranice systému. V rámci modelování tepelných struktur například lze namodelovat palivový proutek se štěpným zdrojem tepla, nebo elektricky zahřívanou desku. Další z možností využití tepelných struktur je sdílení tepla trubkami parního generátoru, sdílení tepla povrchem potrubí nebo stěnami nádoby. Tepelné struktury mohou být modelovány v deskové, sférické nebo cylindrické geometrii a uvažuje se, že se teplo šíří 1D. Zdroj tepla nemusí být v čase konstantní a jeho závislost může být získána z kinetiky reaktoru nebo z proměnné, která je stanovena tabulkami nebo jinými funkcemi programu. Díky balíčku korelací lze zohlednit sdílení tepla varem a kondenzací. Pro řešení šíření tepla je použita metoda konečných diferencí. [10]

Reaktorová kinetika

Představuje-li zdroj tepla jaderný reaktor, je možné v programu využít integrovanou kinetiku reaktoru. Ta využívá ke svému výpočtu rovnice bodové kinetiky. Uživatel má dále možnost libovolně dělit vypočtený výkon mezi jednotlivé tepelné struktury. V rámci jednoho běhu výpočtu je rozdělení výkonu vždy pevně zadané. Model bodové kinetiky umožňuje počítat okamžitý štěpný výkon i teplo ze štěpení zpožděnými neutrony. V rámci modelu lze zohlednit i zpětné vazby. Po úpravě jsou rovnice bodové kinetiky řešeny numericky modifikovanou Runge-Kuttovou metodou. [10]

2.2 Popis použitého modelu

Na pracovišti Termohydraulické výpočty je model reaktoru LVR-15 zobrazován pomocí software SNAP. SNAP je nástroj určený k práci se vstupními soubory různých výpočetních kódů, umožňuje zejména snadnou vizualizaci použité nodalizace v modelu – tedy rozdělení komplexní geometrie do větších částí, ve kterých předpokládáme podobné chování sledované veličiny [12]. Pro výpočet stacionárního a přechodového procesu byly použity rozdílné modely. Pro výpočet stacionárního stavu je žádoucí, aby proběhl co nejrychleji a zároveň zde nehrají roli zpětné vazby. Z toho důvodu model použitý pro analýzu stacionárního stavu nezohledňuje zpětné vazby a celkový výpočetní čas se tím zkrátí. Pro případ přechodového stavu toto zjednodušení použít nelze a vezme se tedy model pro stacionární stav a přidají se do něj zpětné vazby. Citlivostní analýza stacionárního stavu probíhala tím způsobem, že se v modelu pro stacionární stav zvýšila na sekundární straně tepelného výměníku teplota o 1 °C, tím se přibližně o 1 °C zvýšila i vstupní teplota chladiva do AZ a bylo možné získat hodnoty pro sledované parametry. V případě přechodového stavu probíhal výpočet obdobně s tím rozdílem, že byl použit model pro přechodový stav, ve kterém se zvolil daný scénář a volba jednotlivých kroků teplot již probíhala stejně. Během prvních 10 sekund přechodového stavu je snížena vzdálenost mezi jednotlivými časovými kroky výpočtu. Model sám umí nalézt maxima a minima po celé délce PČ (na úrovni nodalizací) pro požadované parametry.

Model reaktoru LVR-15 používaný pro termohydraulické výpočty jednotlivých kampaní má několik zjednodušení. Mezi nejdůležitější z nich patří:

- zjednodušení na PČ – pro potřebu termohydraulických výpočtů se na základně neutronických výpočtů uvažuje 8trubkový PČ generující největší možný tepelný výkon, 6trubkový PČ generující největší možný tepelný výkon a zbylý tepelný výkon se rovnoměrně rozloží mezi ostatní PČ;
- tlakové ztráty – veškeré tlakové ztráty v PO s výjimkou tlakových ztrát třením o PČ jsou počítány zjednodušeně;
- sekundární okruh – celý SO je v rámci zjednodušení vymodelován pouze jako tepelný výměník, kde lze změnit rychlost proudění a teplotu chladiva. Rychlost proudění je ale na SO uvažována konstantní a dle potřeb výpočtů se ručně mění teplota na sekundární straně tepelného výměníku, čímž se vypočítá teplota na primární straně výměníku a tedy i vstupní teplota chladiva do AZ;
- reaktorová nádoba – místo reaktorové nádoby v pravém slova smyslu je v modelu palivo umístěno v potrubí, které má stejný vnitřní průměr jako reálná reaktorová nádoba a kde hladina dosahuje nad AZ, ale objem je oproti reálné situaci rozdílný.

Kapitola 3

Výpočet

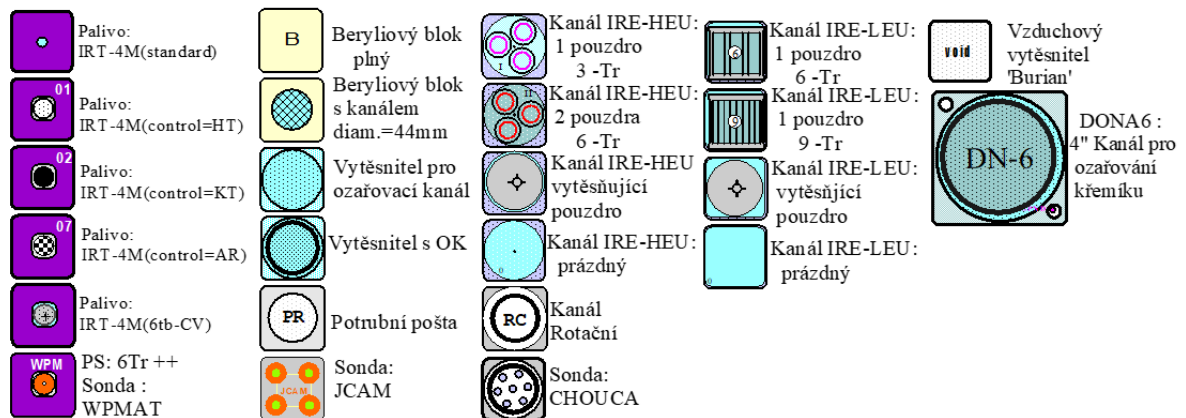
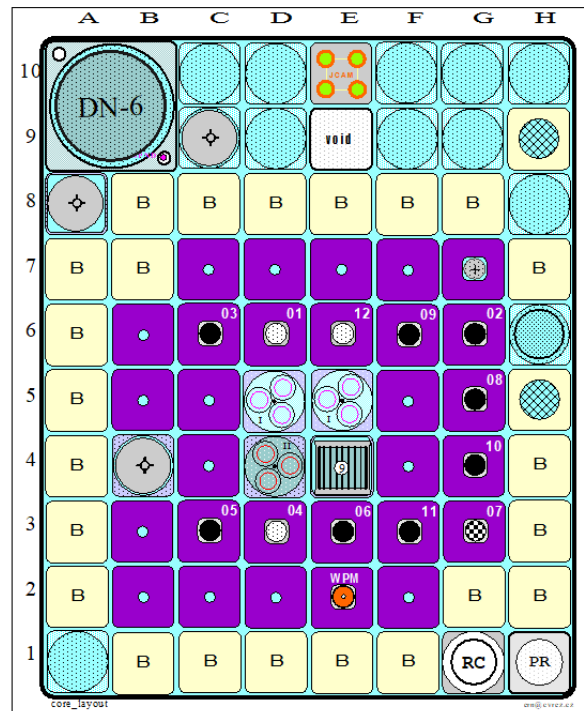
V rámci této kapitoly bude budou nejprve popsány nejistoty vstupující do měření vybraných termohydraulických veličin, dále budou hodnoty těchto (naměřených) veličin srovnány s výsledky výpočtu provozního stavu. Poté budou definovány parametry sledované následnou citlivostní analýzou. Nakonec budou diskutovány výsledky citlivostní analýzy pro stacionární a vybraný přechodový stav.

Pro provedení citlivostní analýzy byla zvolena kampaň K221, která probíhala od 19.8.2020 do 23.9.2020. Kartogram AZ pro tuto kampaň je na Obr. 3.1. Veškeré údaje uvedené v podkapitolách 1.8 a 1.9 jsou platné právě pro tuto kampaň.

3.1 Měření a výpočet provozního stavu

V Tab. 3.1 jsou uvedeny teploty naměřené odporovými teploměry Pt100 a teploty vypočtené kódem RELAP5 pro vstupní a výstupní teploty chladiva do a z AZ.

Do měření vstupní teploty chladiva vstupuje několik nejistot. První z těchto nejistot je závislá na samotném měření odporovým teploměrem, což je popsáno v podkapitole 1.5.1. Další nejistota vstupující do měření závisí na fluktuaci členů bilanční rovnice popisující přestup tepla konvekcí, tedy $\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta t = \rho_c \cdot \dot{Q}_V \cdot c_p \cdot \Delta t$, kde \dot{Q} je tepelný tok (resp. generovaný tepelný výkon), \dot{m} hmotnostní tok, c_p měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku, Δt rozdíl teplot mezi výstupní a vstupní teplotou chladiva AZ, ρ hustota chladiva a \dot{Q}_V objemový průtok chladiva. Jednotlivé členy bilanční rovnice se navzájem ovlivňují a je proto důležité zjistit jejich průběh v závislosti na čase. Uvažuje se, že hustota a měrná tepelná kapacita jsou konstantní. Objemový průtok je závislý na tlakových ztrátách na celém PO a tlakovém zisku na čerpadlech. Obě veličiny fluktuují v čase, ale v případě stacionárního stavu lze uvažovat, že je střední rychlost v čase stejná, tedy i střední tlakové ztráty a zisky jsou stejné, a tedy že i objemový průtok PO v čase je konstantní. Naproti tomu generovaný tepelný výkon a vstupní (resp. výstupní) teplota chladiva mohou výrazněji fluktuovat z důvodu složité geometrie AZ a je proto nutné naměřená data statisticky zpracovat. Na základě provozního měření (kontinuální měření v průběhu kam-



Obr. 3.1: Kartogram AZ kampaně K221 s legendou [5]

paně), jehož hodnoty zapisuje počítač každou minutu, byla pro reprezentativní vzorek, o celkovém počtu 174 hodnot, stanovena směrodatná odchylka tepelného výkonu jako 0,015 MW_t a směrodatná odchylka vstupní teploty pro větve A i B jako 0,03 °C. V obou dvou případech jsou tedy nejistoty způsobené těmito jevy zanedbatelné.

Naměřená a vypočítaná vstupní teplota chladiva na větvi A se liší o 0,3 °C, což odpovídá toleranci, s jakou přesností měří odporové teploměry. Rozdíl mezi naměřenou a vypočítanou vstupní teplotou na větvi B je již ale větší než 1 % a nejedná se tedy pouze o odchylku měření odporových teploměrů. Tento rozdíl může být způsoben několika faktory. Mezi hlavní důvody toho rozdílu může patřit rozdílné umístění odporového teploměru

(teploměr nemusí být umístěn přesně v místě, kde počítá model), na větvi B je novější tepelný výměník (což zatím není zohledněno v modelu RELAP5), dále to mohl způsobit fakt, že hodnota průtoku je v modelu zadávána manuálně, ale během kampaně je průtok regulován automaticky (rozdíl mezi průtokem, pro které jsou analýzy počítány a průtokem, který v PO reálně je, může být až $40 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$) a zjednodušení uvažovaná v modelu PO. Kombinace těchto faktorů a odchylky odporových teploměrů již může způsobit rozdíl $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ mezi vypočítanou a naměřenou hodnotou. Nicméně výsledná vypočítaná hodnota, ačkoliv s rozdílem $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$, může být v tomto rozsahu teplot považována za správnou. Vyšší vypočtená hodnota na výstupu AZ je způsobena vzrůstem vypočítané teploty na větvi B, který byl již rozebrán. Dříve byl odporový teploměr měřící výstupní teplotu chladiva umístěn za čerpadly, ale z důvodu, že průchod chladiva čerpadly vodu mírně ohřívá, byl odporový teploměr přemístěn před čerpadla, aby lépe reflektoval reálnou teplotu chladiva na výstupu z AZ. [6]

Tab. 3.1: Srovnání naměřených teplot s vypočítanými teplotami kódem RELAP5 [13]

	naměřená teplota ($^\circ\text{C}$)	vypočítaná teplota ($^\circ\text{C}$)
větev A (vstup do AZ)	43,3	43,0
větev B (vstup do AZ)	42,5	43,2
výstup z AZ	48,8	49,3

Na základě srovnání naměřených vstupních a výstupních teplot chladiva lze prohlásit, že model reaktoru reálně reflektuje děje probíhající v AZ a je tedy vhodný k provedení citlivostní analýzy.

Pro zhotovení grafů v následujících podkapitolách byly vstupní teploty větví A a B zprůměrovány. Pro žádný z kroků výpočtu (změna vstupní teploty chladiva o $1 \text{ }^\circ\text{C}$) se od sebe vypočtené teploty ve větvích nelišily více než o $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.2 Sledované parametry

Princip citlivostní analýzy spočívá v tom, že je zvolen jeden nebo více (v ideálním případě všechny možné) vstupních parametrů (obvykle ty, které systém nejvíce ovlivňují), které se v rámci analýzy mění a je pozorováno chování sledovaného systému během změn těchto vstupních parametrů. Touto metodou lze tedy predikovat trendy i v oblastech mimo provozní parametry, čehož lze využít např. v případě záměru navýšení výkonu reaktoru nebo simulování havarijních situací. V rámci citlivostní analýzy reaktoru LVR-15 byly zvoleny takové parametry, které mají největší vliv z pohledu zachování integrity PČ, jakožto nejcitlivější součástky PO. Mezi nejdůležitější parametry patří teplota pokrytí PČ a počátek povrchového varu (resp. podchlazeného, viz poznámka pod čarou 2), resp. koeficient zásoby do počátku povrchového varu.

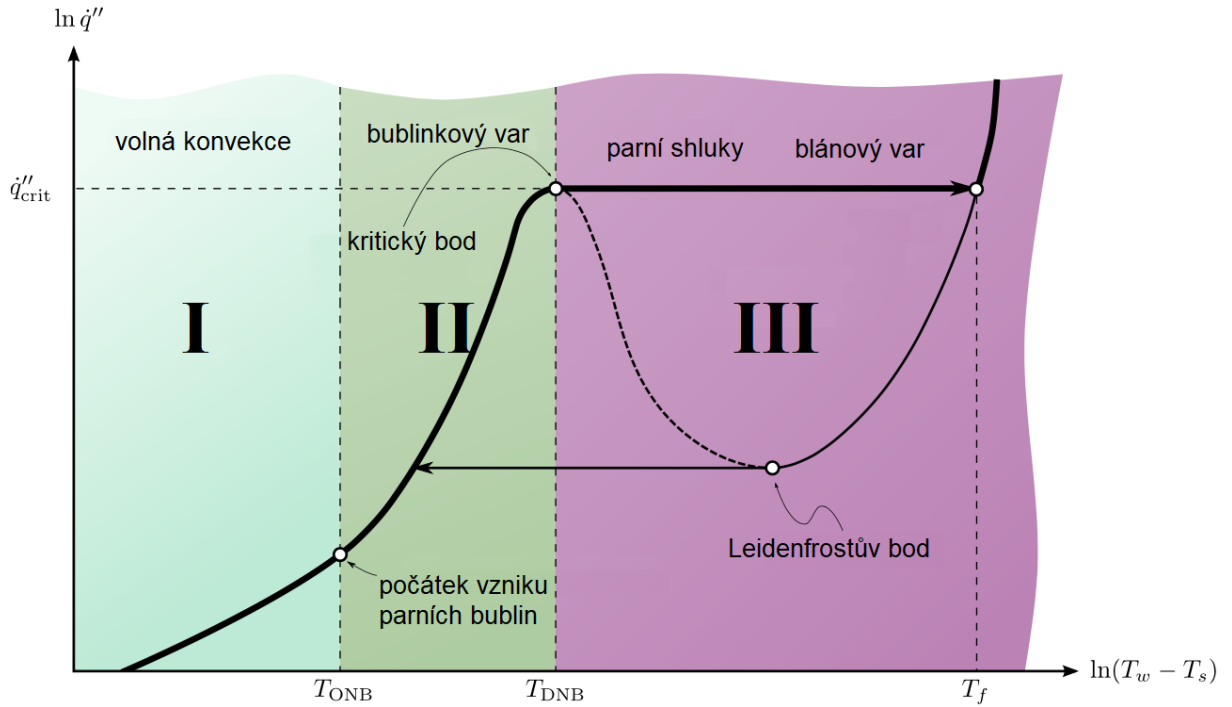
3.2.1 Teplota pokrytí PČ

Palivo IRT-4M má od výrobce garantované provozní podmínky, za kterých může být provozováno. Dle dokumentu od výrobce [14] nesmí teplota pokrytí PČ překročit 98 °C. Pokud by došlo k překročení této hodnoty, mohlo by dojít k poškození integrity pokrytí PČ, což by mohlo vést k úniku štěpných produktů.

3.2.2 ONB(R)

Veličina ONB neboli *onset of nucleate boiling* ukazuje na počátek povrchového varu. Počátek povrchového varu je definován jako první moment, kdy se na zahřívaném povrchu vytvoří parní bublina. Pokud se bublina od povrchu oddělí a průměrná objemová teplota zůstává pod teplotou saturace, pak se tento jev nazývá podchlazeným varem. Přestože je podchlazený var z hlediska přenosu tepla konvekcí efektivní, je jeho přítomnost ve výzkumných reaktorech nežádoucí, a to z důvodu, že vznikající bubliny mohou vytvořit parní blánu a zabránit přístupu chladiva k zahřívanému povrchu a způsobit tím poškození PČ (krize varu prvního druhu). Znalost odstupu od počátku povrchového varu je tedy nezbytná z hlediska bezpečnosti provozu výzkumných reaktorů. [15]

Poloha ONB na Nukiyamově křivce je vyznačena na Obr. 3.2. Nukiyamova křivka zobrazuje závislost plošné hustoty tepelného toku na rozdílu teploty zahřívaného povrchu a teploty saturace. V prvním regionu křivky dochází k volné konvekci. Na rozhraní prvního a druhého regionu je teplota rovna T_{ONB} ($T_w - T_s \cong 5$), tedy místo, kdy se na zahřívaném povrchu vytvoří první parní bubliny. Až do $T_w - T_s \cong 10$ parní bubliny implodují a jedná se tedy o podchlazený var [20]. Po překročení této hodnoty již parní bubliny stoupají až ke hladině. V celé druhé oblasti tedy probíhá bublinkový var. Hodnota $T_w - T_s \cong 30 = T_{\text{DNB}}$ protíná Nukiyamovu křivku v prvním kritickém bodě a zároveň je rozhraním pro druhý a třetí region. V $T_w - T_s \cong 120$ je dosaženo Leidenfrostova bodu, tedy chvíle, od které je rozdíl mezi povrchem a teplotou chladiva tak velký, že se povrch stane pro kapalinu nesmáčivým. Ve třetím regionu dochází k přechodu mezi bublinkovým a blánovým varem (do Leidenfrostova bodu) a k blánovému varu.



Obr. 3.2: Nukiyamova křivka, upraveno z [18]

Pro odhad počátku povrchového varu bylo na základě experimentů stanoveno několik empirických vztahů. Mezi nejznámější z nich patří korelace Bergles & Rohsenow, která je v rámci bezpečnostních analýz užívaná i na reaktoru LVR-15. Tato korelace má tvar [3]:

$$T_{\text{ONB}} = T_{\text{sytt}} + \frac{5}{9} \left[\frac{q}{1,082p^{1,156}} \right]^{\frac{p^{0,0234}}{2,16}},$$

kde T_{ONB} ($^{\circ}\text{C}$) je teplota povrchu PČ v okamžiku počátku povrchového varu, T_{sytt} ($^{\circ}\text{C}$) je teplota sytosti pro daný tlak p (bar) a q ($\text{kW}_t \cdot \text{m}^{-2}$) je hustota tepelného toku stěnou zahříváného povrchu. Na reaktoru LVR-15 se však nepoužívá přímo veličina ONB, nýbrž veličina označovaná jako ONBR (onset of nucleate boiling ratio). Jedná se koeficient zásoby do počátku povrchového varu, který je definován jako [2]:

$$\text{ONBR} = \frac{T_{\text{ONB}} - T_{\text{in}}}{T_{\text{p}} - T_{\text{in}}},$$

kde T_{ONB} ($^{\circ}\text{C}$) je teplota stanovená podle korelace Bergles & Rohsenow, T_{in} ($^{\circ}\text{C}$) je vstupní teplota chladiva a T_{p} ($^{\circ}\text{C}$) je aktuální teplota povrchu PČ. Tato veličina tedy vyjadřuje poměr mezi kritickou hodnotou rozdílu teplot a aktuálního teplotního rozdílu, a je tedy snazší z hlediska rychlé orientace v problematice. Jako kritická hodnota je na reaktoru LVR-15 považována $\text{ONBR} = 1,3$ a je tedy nutné, aby jeho hodnota nebyla nikdy nižší. Pokud $\text{ONBR} \in [1, 0; 1, 3)$, pak hovoříme o podchlazeném varu a pokud $\text{ONBR} < 1$, pak se jedná o var. [6]

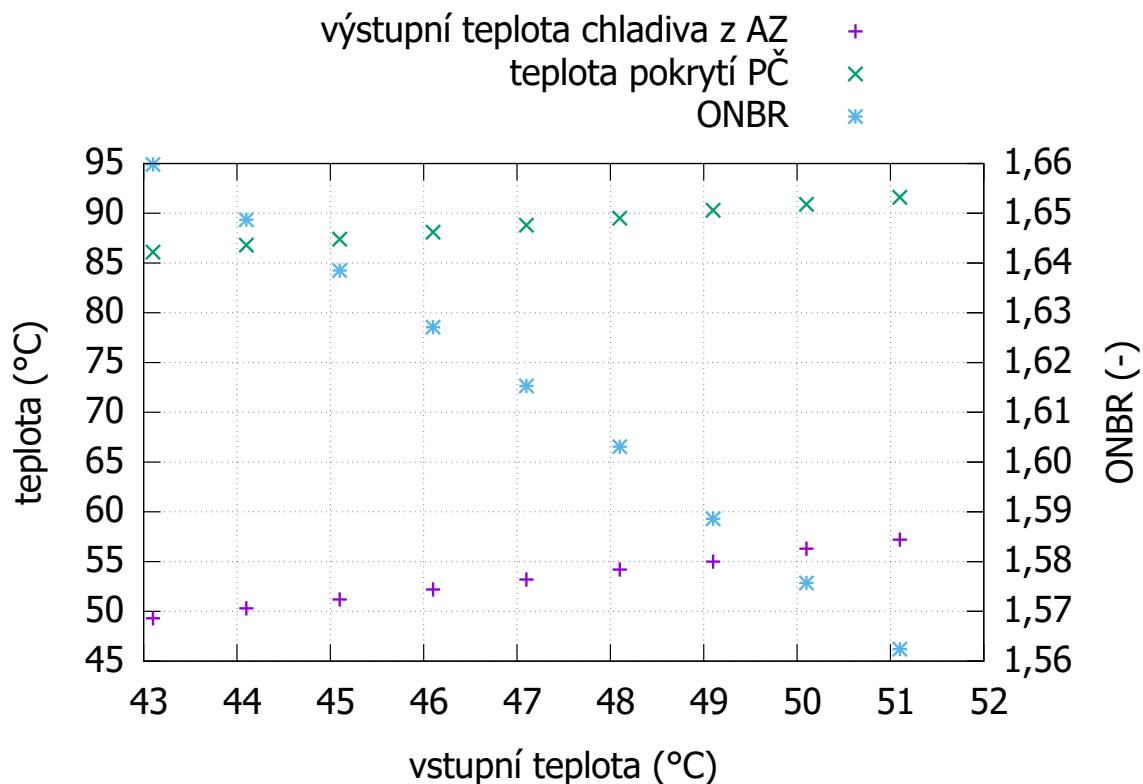
Sledování koeficientu zásoby do počátku povrchového varu je důležité během výpočetních analýz před uvedením kampaně do provozu, nejedná se však o parametr sledovaný během provozu reaktoru.

Na energetických reaktorech je žádoucí, aby plošná hustota tepelného toku byla co možná nejvyšší, proto se zejm. tlakovodní energetické reaktory snaží pracovat blízko pod první kritickou hodnotou plošné hustoty tepelného toku (viz. Obr. 3.2). Pokud však dojde k překročení této hodnoty, dochází ke krizi varu prvního druhu. Aby k tomuto jevu nedocházelo, tak se na energetických reaktorech sleduje veličina DNB (*departure on nucleate boiling*), která ukazuje na dosažení prvního kritické hodnoty. Analogicky k ONBR se definuje i DNBR. Tato veličina se pak nazývá rezerva do krize varu prvního druhu.

3.3 Stacionární stav

Výpočet stacionárního stavu probíhal pro výkon $9,7 \text{ MW}_t$, kdy jsou v provozu čerpadla HČČ č. 1, 2, 4 a HAVČ č.7 a průtok AZ je $1568 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$. V rámci výpočetní analýzy bylo sledováno, jak se v závislosti na vstupní teplotě chladiva změni výstupní teplota chladiva, teplota pokrytí PČ a koeficient zásoby do počátku povrchového varu. Jednotlivé teplotní kroky výpočtu mají rozestup $1 \text{ }^\circ\text{C}$ a pohybují se v rozsahu teplot T_{in} (průměrná hodnota mezi vypočtenými teplotami na větvích A a B) od $43 \text{ }^\circ\text{C}$ do $51 \text{ }^\circ\text{C}$, tedy do hodnoty, která je o $1 \text{ }^\circ\text{C}$ vyšší, než maximální povolená vstupní hodnota pro limitní provozní parametry PČ, viz Tab. 1.6.

Z grafu na Obr. 3.3 lze vidět, že s rostoucí vstupní teplotou chladiva do AZ lineárně roste výstupní teplota chladiva z AZ a teplota pokrytí PČ. Naproti tomu koeficient zásoby do počátku povrchového varu zdánlivě lineárně klesá. Z hlediska dosahovaných hodnot nedojde u teploty pokrytí PČ a koeficientu zásoby do počátku povrchového varu k překročení mezních hodnot, a to ani v případě, že bude překročena maximální povolená vstupní teplota. Teplota pokrytí bude v případě vstupní teploty chladiva $51 \text{ }^\circ\text{C}$ dosahovat hodnoty $91,6 \text{ }^\circ\text{C}$, rezerva do limitní teploty je tedy $6,4 \text{ }^\circ\text{C}$, viz 1.6. Hodnota koeficientu zásoby do počátku povrchového varu je pro vstupní teplotu $51 \text{ }^\circ\text{C}$ rovna $1,5624$ a ve srovnání s limitní hodnotou $1,3$ je tedy v pořádku.

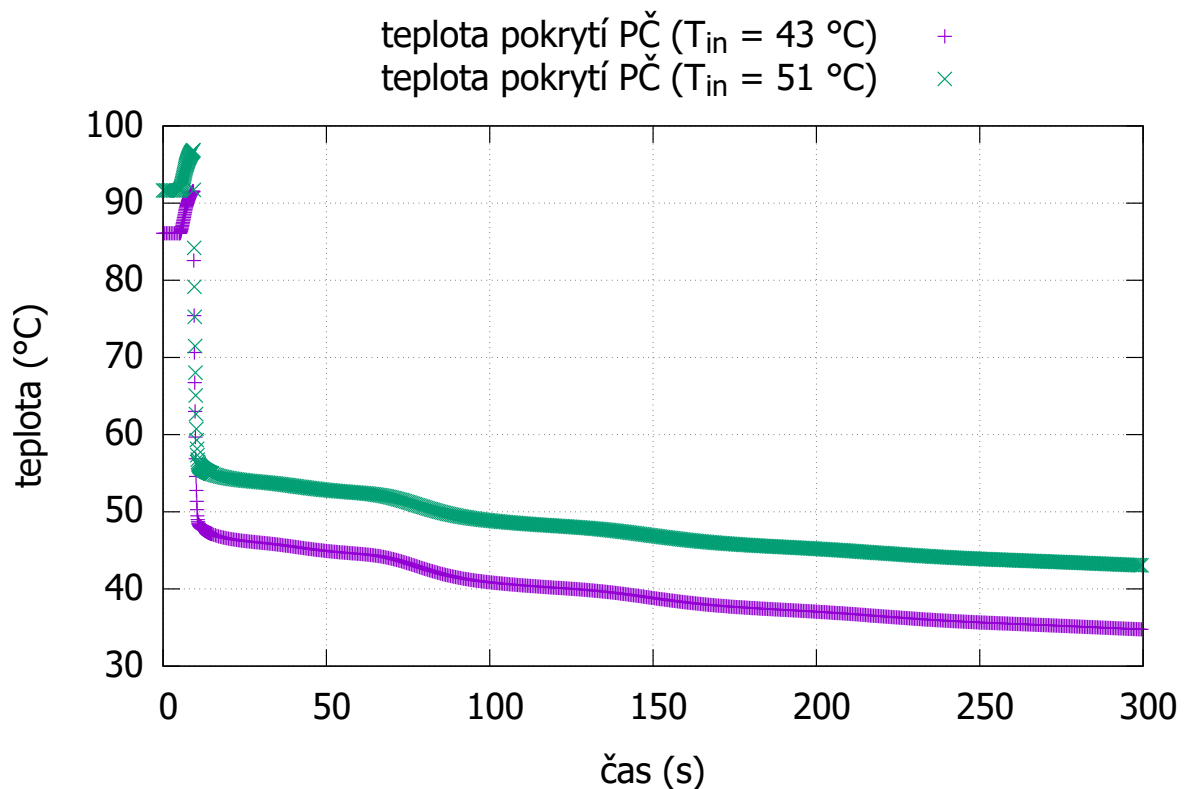


Obr. 3.3: Citlivostní analýza stacionárního stavu

3.4 Přejíchodový stav

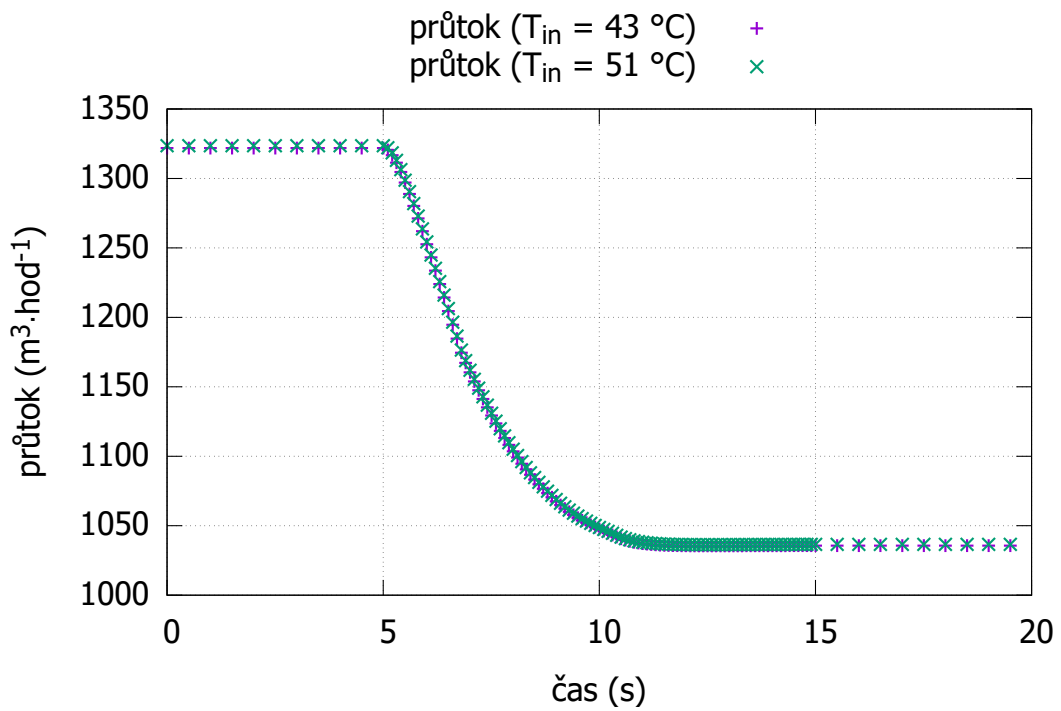
Jako přechodový proces byl zvolen výpadek HCČ č.2, jedná se tedy o událost ztráty průtoku chladiva AZ (*Loss of flow accident* – LOFA). Kvůli výpadku čerpadla není průtok AZ dostatečný pro výkon 9,7 MW_t a dochází k havarijnímu odstavení reaktoru. SOŘ reaguje na výpadek čerpadla havarijním odstavením reaktoru, což trvá 1,2 s, pád regulačních tyčí do AZ pak trvá 0,8 s. V rámci výpočetní analýzy byly sledovány parametry výstupní teplota chladiva z AZ, teplota pokrytí PČ a koeficient zásoby do počátku povrchového varu v závislosti na vstupní teplotě chladiva do AZ. Rozestup mezi jednotlivými kroky je 1 °C a pohybují se v rozsahu od 43 °C do 51 °C.

Na Obr. 3.4 je vidět graf závislosti teploty pokrytí PČ na čase pro vstupní teploty chladiva $T_{in} = 43 \text{ °C}$ a $T_{in} = 51 \text{ °C}$. Na tomto grafu lze pozorovat, že během prvních sekund, kdy došlo k výpadku čerpadla, teplota pokrytí nejdříve rychle stoupala až k hodnotě 91,6 °C pro 41 °C, resp. 96,9 °C pro 51 °C a po havarijním odstavení reaktoru začala rychle klesat. Poté se teplota pokrytí PČ postupně snižovala až do teploty 34,8 °C, resp. 43,1 °C. V čase $t = 300 \text{ s}$, kdy teplota dosáhla v rámci simulace minimálních teplot, je již téměř ustálený stav.

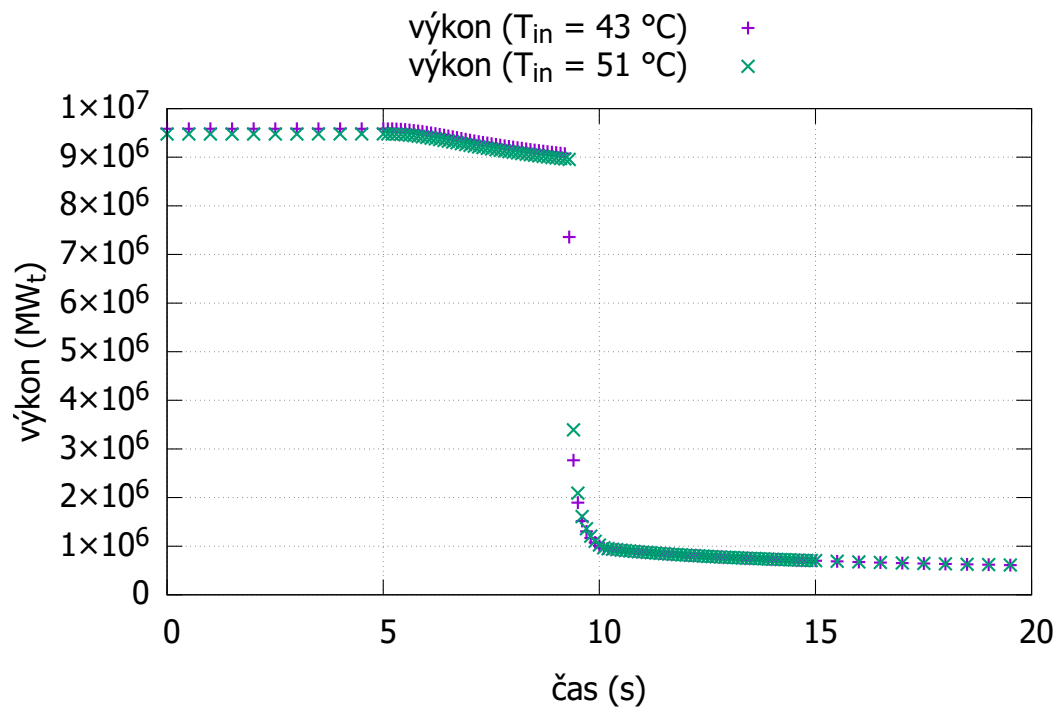


Obr. 3.4: Časová závislost teploty pokrytí PČ během přechodového stavu

V přiblížení na prvních 20 s simulace lze pozorovat průběh událostí v reaktoru. Na Obr. 3.5 je graf závislosti průtoku chladiva na čase. V čase 5 s došlo k výpadku HCČ č.2, v důsledku čehož začal klesat průtok chladiva AZ. V čase 8,1 s byl již průtok menší než $1100 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ a zásahem SOŘ se spustilo havarijní odstavení reaktoru. V čase 11,4 s se průtok chladiva AZ ustálil na hodnotě $1036 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$. Na Obr. 3.6 je zobrazen graf závislosti výkonu reaktoru na čase. Až do 5 s, kdy došlo k výpadku čerpadla, byl výkon konstantní. Po výpadku čerpadla výkon postupně klesal společně s klesajícím průtokem, a to z důvodu, že s menším průtokem se zvedala postupně teplota chladiva, na což reagovala zpětná teplotní vazba. Výkon tímto způsobem klesal až do času 9,3 s, kdy došlo k uvolnění regulačních tyčí, které začaly padat do AZ (opoždění uvolnění tyčí je oproti signálu 1,2 s, proto došlo k jejich uvolnění o 1,2 s později, než byla překročena hranice pro minimální průtok). Pád tyčí do AZ trvá 0,8 s, do dolní koncové polohy se tedy dostaly v čase 10,1 s. Během pádu tyčí se výkon reaktoru změnil skokově o jeden řád, poté začal opět postupně klesat.

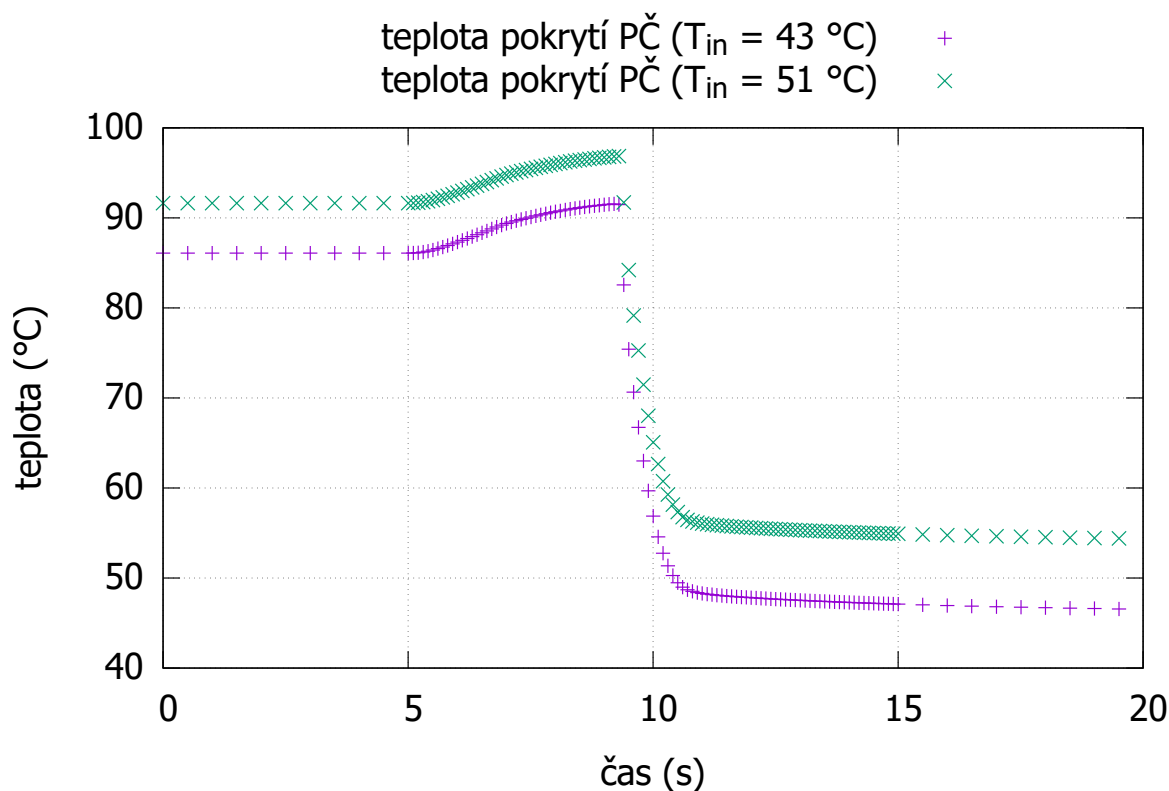


Obr. 3.5: Časová závislost průtoku chladiva během přechodového stavu (prvních 20 s simulace)

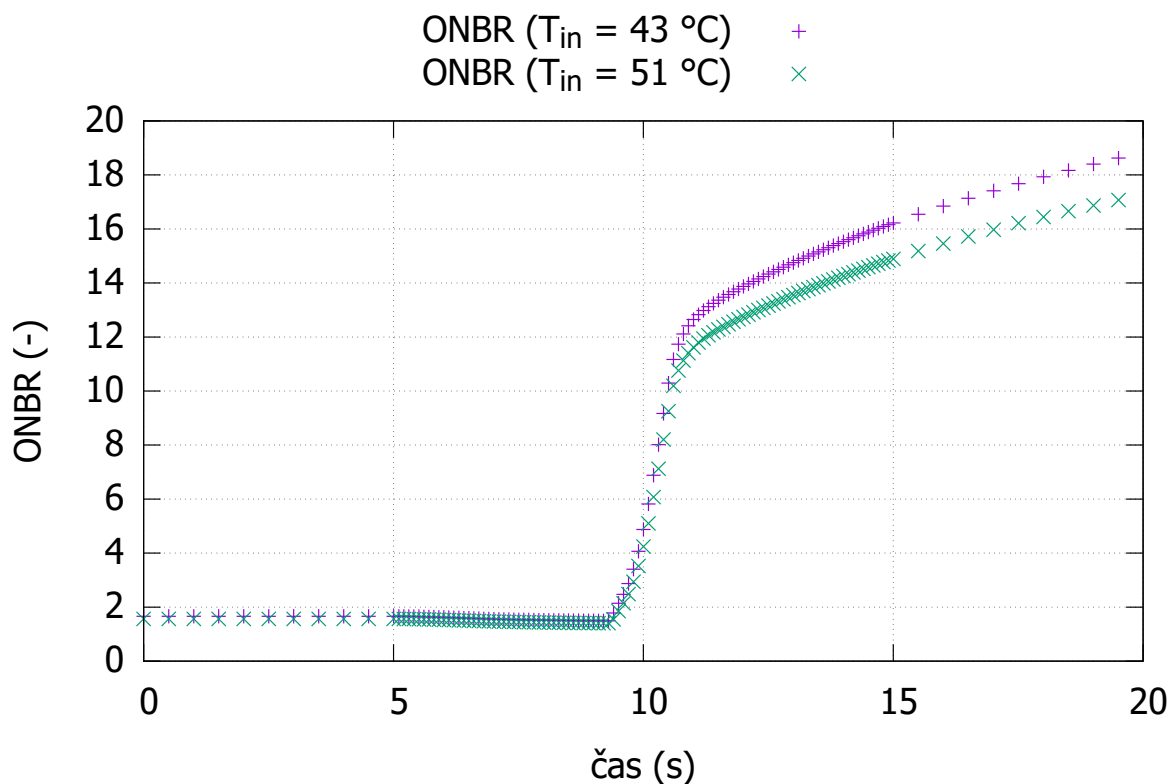


Obr. 3.6: Časová závislost výkonu reaktoru během přechodového stavu (prvních 20 s simulace)

Časový průběh teploty pokrytí PČ a koeficientu zásoby do počátku povrchového varu během prvních 20 sekund výpočetní analýzy přechodového stavu je zobrazen v grafech na Obr. 3.7 a 3.8. V intervalu 0-5 s probíhal stacionární stav. V čase 5 s došlo k výpadku HCČ č.2, v důsledku čehož začala stoupat teplota pokrytí PČ (s nižším průtokem chladiva docházelo v AZ k jeho vyššímu ohřevu a s tím rostla i teplota pokrytí PČ) a klesat koeficient zásoby do počátku povrchového varu, a to až do času 9,3 s, kdy došlo k uvolnění regulačních tyčí, které začaly padat do AZ. Pád tyčí trvá 0,8 s a tedy tyče dopadly do koncové dolní polohy v čase 10,1 s. Během této doby teplota pokrytí PČ skokově klesla a koeficient zásoby do počátku povrchového varu skokově vzrostl. Poté, co tyče spadly do dolní koncové polohy, začala teplota pokrytí PČ postupně klesat. Rychlost změny (v tomto případě vzrůstu) koeficientu zásoby do počátku povrchového varu se sice také zmírnil, ale vůči rychlosti změny teploty pokrytí PČ je znatelně rychlejší. Tento fakt je dán tím, jak je koeficient definovaný – v čitateli je rozdíl $T_{ONB} - T_{in}$, výsledek tohoto rozdílu se bude společně s klesající teplotou zvětšovat a zároveň ve jmenovateli definice je $T_p - T_{in}$, kde se společně s časem bude výsledek zmenšovat z důvodu, že s rostoucím časem se k sobě budou teploty povrchu pokrytí PČ a vstupní teplota chladiva přibližovat. Z tohoto důvodu tedy koeficient zásoby do počátku povrchového varu roste takto rychle.

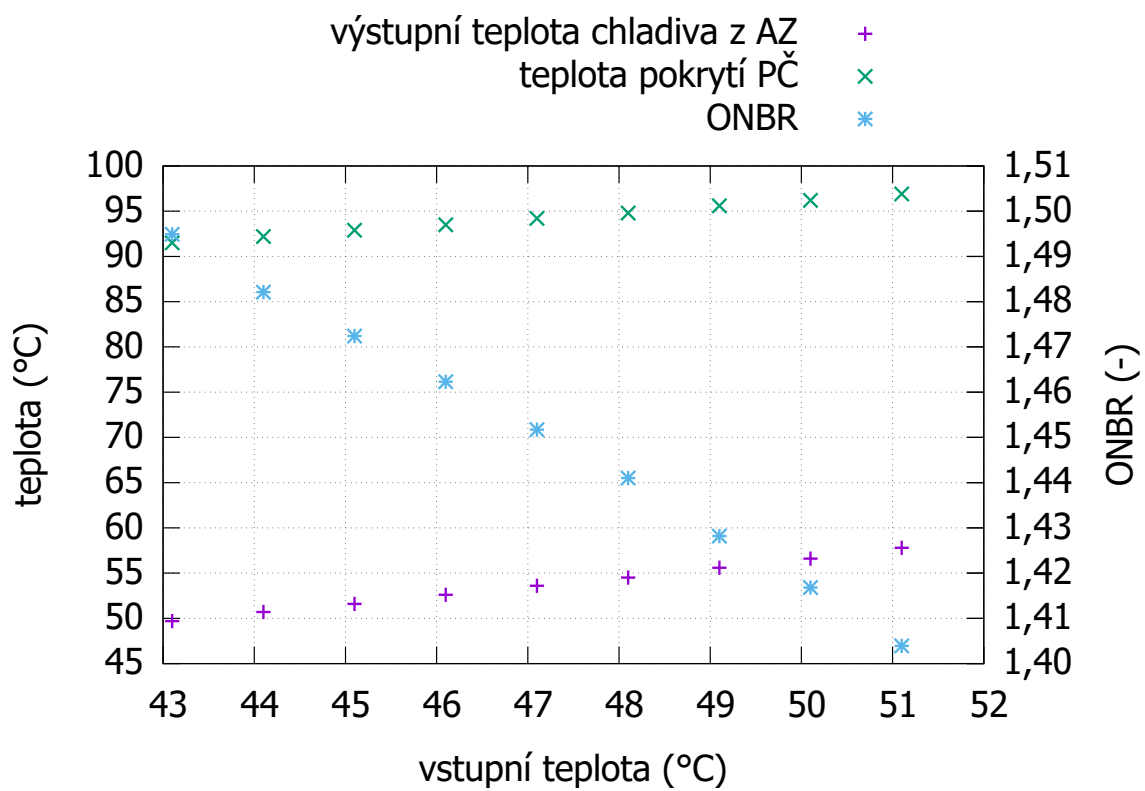


Obr. 3.7: Časová závislost teploty pokrytí PČ během přechodového stavu (prvních 20 s simulace)



Obr. 3.8: Časová závislost ONBR během přechodového stavu

Graf na Obr. 3.9 zobrazuje závislost teploty pokrytí PČ a ONBR na vstupní teplotě v čase simulace 9,3 s, kdy bylo dosaženo maximální teploty pokrytí PČ. Na tomto grafu lze pozorovat stejné trendy jako v případě stacionárního stavu s tím rozdílem, že výstupní teplota chladiva z AZ a teplota pokrytí PČ rostou rychleji a s tím i rychleji klesá koeficient zásoby do počátku povrchového varu. V případě, že je vstupní teplota chladiva 51 °C, tak teplota pokrytí PČ dosahuje 96,9 °C a koeficient zásoby do počátku povrchového varu nabývá hodnoty 1,4039. Ani v případě výpadku jednoho čerpadla a překročení limitu pro maximální vstupní teplotu o 1 °C tak nedojde k překročení limitů pro teplotu pokrytí PČ a koeficientu zásoby do počátku povrchového varu.



Obr. 3.9: Citlivostní analýza přechodového stavu v čase $t = 9,3$ s

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo provést citlivostní analýzu reaktoru LVR-15 pomocí existujícího modelu v RELAP5 pro stacionární a vybraný přechodový stav v závislosti na vstupní teplotě chladiva do AZ v rozsahu od 43 °C do 51 °C. Pro tento účel byla vybrána kampaň K221, která probíhala v srpnu roku 2020 a jako přechodový stav byl zvolen výpadek hlavního cirkulačního čerpadla č. 2. Sledovanými parametry v citlivostní analýze byly teplota pokrytí palivového článku a koeficient zásoby do povrchového varu (rezerva do podchlazeného varu).

Nejprve byl proveden výpočet stacionárního stavu vybrané kampaně za běžných provozních podmínek. Z tohoto výpočtu byly získány teploty chladiva na obou vstupních větvích do AZ a výstupní teplota chladiva z AZ. Výsledky této simulace byly srovnány s provozním měřením teplot a byly popsány jak nejistoty v měření, tak modelu. Na základě tohoto rozboru bylo možné prohlásit, že výsledky stanovené modelem reaktoru v RELAP5 odpovídají reálnému dění v AZ a že je tedy možné použít model pro podrobnější citlivostní analýzu.

Výpočtem stacionárního stavu bylo ukázáno, že v závislosti na vstupní teplotě bude lineárně růst výstupní teplota a teplota pokrytí palivových článků, naproti tomu koeficient zásoby do počátku povrchového varu bude zdánlivě lineárně klesat. Ani při vstupní teplotě 51 °C, která je o 1 °C vyšší, než je maximální povolená teplota uváděna výrobcem, bude maximální teplota pokrytí nejvíce namáhaného palivového článku 91,6 °C a koeficient zásoby do počátku povrchového varu má minimální hodnotu 1,5624. Oba dva sledované parametry tedy nebudou z hlediska limitů a podmínek překročeny ani v případě, kdy dojde k překročení výstupní teploty chladiva o 1 °C.

V případě přechodového stavu bylo nejprve podrobně rozebráno prvních 20 s simulace – v čase 5 s došlo k výpadku hlavního cirkulačního čerpadla č.2, v čase 8,1 s klesl průtok chladiva pod hodnotu $1100 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ a zásahem SOŘ se spustil příkaz k havarijnímu odstavení reaktoru, v čase 9,3 s došlo k uvolnění regulačních tyčí, jejichž pád trvá 0,8 s a dolní koncové polohy tedy dosáhly v čase 10,1 s. V průběhu simulace dosahovala teplota pokrytí palivových článků svého maxima v čase 9,3 s, a pro tento čas tedy byla provedena citlivostní analýza. Citlivostní analýza ukázala, že v závislosti na vstupní teplotě do AZ bude růst výstupní teplota chladiva a teplota pokrytí palivových článků rychleji než v případě stacionárního stavu, ale trend bude stále lineární. Stejným způsobem bude vypadat průběh u koeficientu zásoby do povrchového varu – jeho pokles bude strmější, ale stále zdánlivě lineární. Pro vstupní teplotu 51 °C je maximální teplota nejvíce namáhaného

článku $96,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ a koeficient zásoby do povrchového varu dosahuje minimálně hodnoty 1,4039.

Na základě citlivostní analýzy stacionárního stavu a přechodového stavu (výpadek jednoho hlavního cirkulačního čerpadla) v závislosti na vstupní teplotě chladiva do aktivní zóny pomocí modelu ve výpočetním kódu RELAP5 lze prohlásit, že konfigurace kampaně K221 splňuje z hlediska maximální povolené teploty pokrytí palivových článků a koeficientu zásoby do počátku povrchového varu hodnoty stanovené limity a podmínkami a lze ji tedy bezpečně provozovat.

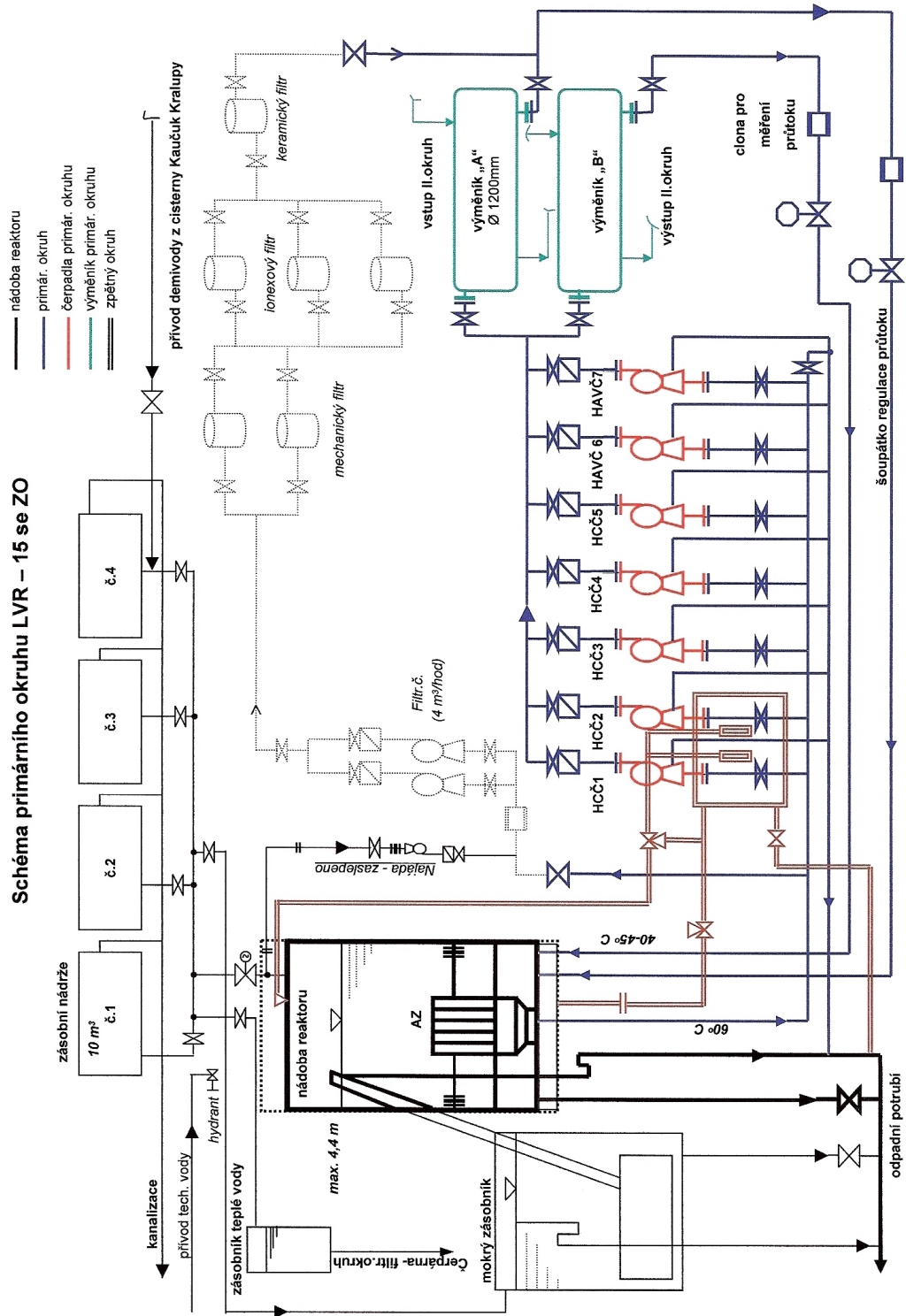
Seznam použitých zdrojů

- [1] ANL. RERTR – Reduced Enrichment for Research and Test Reactors. <https://www.rertr.anl.gov>, květen 2021.
- [2] ANTES, M. Provozní bezpečnostní zpráva LVR – 15, vydání 2, rev. 1. ev. č. CVR 2197.1 T, Centrum výzkumu Řež s.r.o., prosinec 2018.
- [3] BERGLES, A.E., ROHSENOW, W.M. The determination of forced-convection surface-boiling heat transfer. *Journal of heat transfer* (1964).
- [4] CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ S.R.O. Reaktor LVR-15. <http://reaktory.cvrez.cz/>, 2021.
- [5] DAMBROSIO, A. E-mailová komunikace, květen 2021.
- [6] DAMBROSIO, A. Osobní konzultace, květen 2021.
- [7] ERNEST, J. Fyzikální výpočet kampaně K221. Tech. rep., Centrum výzkumu Řež s.r.o., 2020.
- [8] FLORES, A. F. Y. E-mailová komunikace, říjen 2020.
- [9] IAEA. *Operational Limits and Conditions and Operating Procedures for Research Reactors*. 2006. ISBN: 978-92-0-103508-0.
- [10] INFORMATION SYSTEMS LABORATORIES, INC. *RELAP5/MOD3.3 code manual volume I: code structure, system models, and solution methods*, NUREG/CR-5535/Rev P4-Vol I ed., říjen 2011.
- [11] INL – IDAHO NATIONAL LABORATORY. RELAP5-3D: RELAP5-3D/GWJ/10/27/2015. <https://relap53d.inl.gov/Shared%20Documents/relap5doe.pdf>, říjen 2015.
- [12] JONES, K. Symbolic Nuclear Analysis Package (SNAP): CommonApplication Framework for Engineering Analysis (CAFEAN) Preprocessor Plug-inApplication Programming Interface (NUREG/CR-6974). Tech. rep., U.S.NRC.
- [13] KINOVIČ, L. E-mailová komunikace, únor 2021.
- [14] NZCHK. Sborke teplovydelyayušcie IRT-4M. R 0019.20.00.000 DKO.

- [15] OMAR, S.A., D. J. Onset of Nucleate Boiling for subcooled flow through a one-side heated narrow rectangular channel. *Annals of Nuclear Energy* (2017).
- [16] SIEFKEN, L. J. ET AL. *SCDAP/RELAP5/MOD 3.3 Code Manual*, NUREG/CR-6150, INEL-96/0422 ed. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 2001.
- [17] SOUKUP, V. Protokol o ověření hydraulického odporu AZ. Tech. rep., CVŘ – Oddělení údržby reaktorů, 2020.
- [18] THELER, G., FREIS, D. Theoretical critical heat flux prediction based on non-equilibrium thermodynamics considerations of the subcooled boiling phenomenon. *Mecánica Computacional* (2011).
- [19] ČERNÝ, M., JEDLIČKA, M. *Hydrologická ročenka České republiky 2019*. Český hydrometeorologický ústav, 2020. ISBN: 978-80-7653-011-9.
- [20] ŠTĚPÁNEK, J. *Dynamics of Heat Transfer During Cooling of Overheated Surfaces*. PhD thesis, Czech Technical University in Prague, 2018.

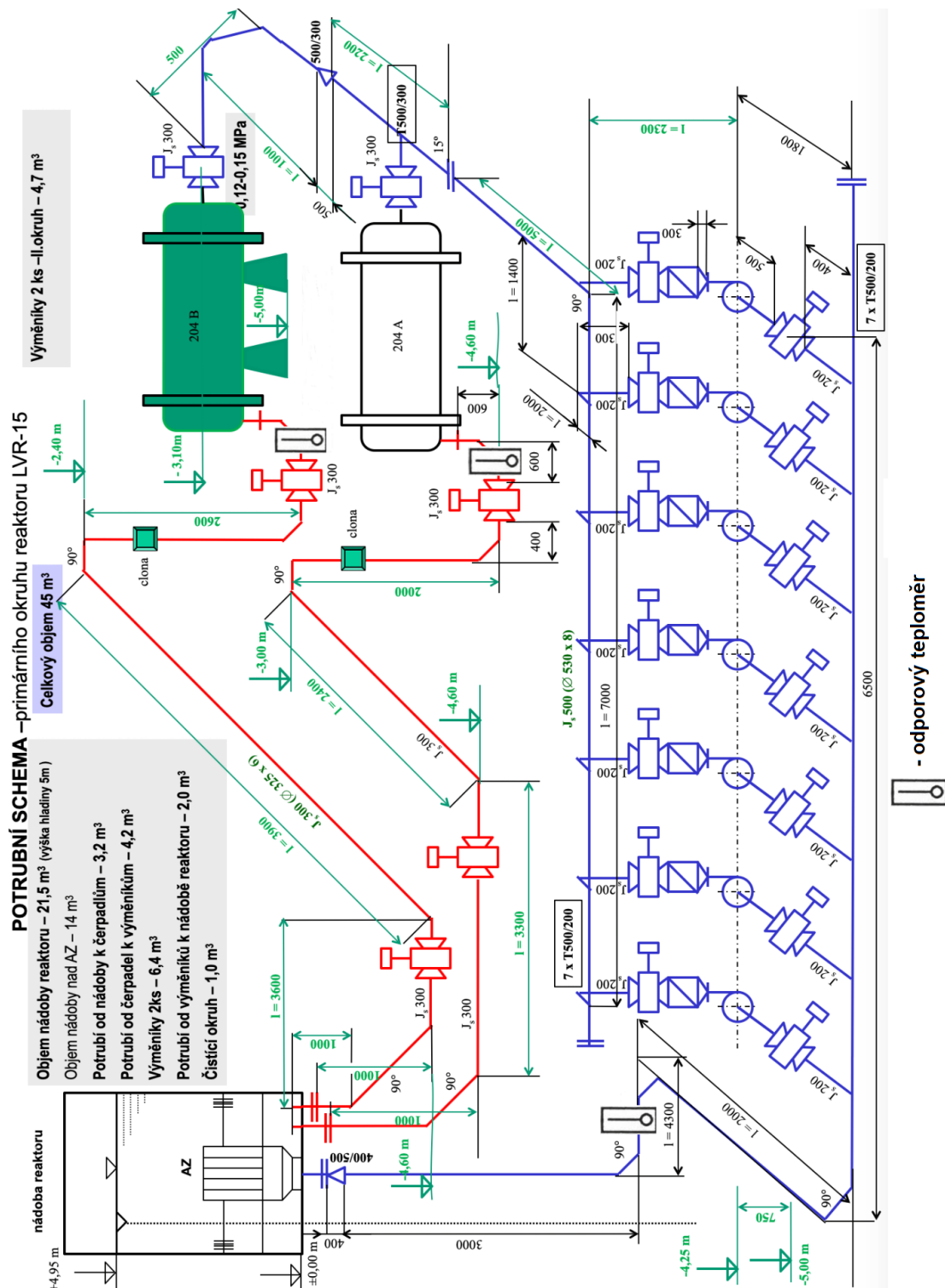
Přílohy

A Schéma PO LVR-15



Obr. A1: Schéma primárního okruhu se zpětným okruhem [2]

B Potrubní schéma PO LVR-15



Obr. B1: Potrubní schéma PO s umístěním odporových teploměrů, upraveno z [8]