

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů
Obor: Jaderné inženýrství



Termohydraulický model školního reaktoru VR-1

Thermohydraulic model of training reactor VR-1

VÝZKUMNÝ ÚKOL

Vypracoval: Bc. Jakub Mátl
Vedoucí práce: Ing. Filip Fejt, Ph.D.
Rok: 2023



Katedra jaderných reaktorů

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ VÝZKUMNÉHO ÚKOLU

Student: **Bc. Jakub Mátl**

Studijní program: Jaderné inženýrství

Specializace: Jaderné reaktory

Název práce česky: **Termohydraulický model školního reaktoru VR-1**

Název práce anglicky: Thermohydraulic model of training reactor VR-1

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši využití systémových termohydraulických kódů na výzkumných reaktorech.
2. Připravte model palivového článku IRT-4M v programu RELAP5 a na základě dostupných informací provedte ověření.
3. Připravte model aktivní zóny a reaktorové nádoby školního reaktoru VR-1 v programu RELAP5.
4. Vyhodnoťte různé způsoby nodalizace systému v programu RELAP5 a jejich vliv na přirozené proudění.

Doporučená literatura:

- [1] FEJT, F. Analýza termohydraulických modelů reaktoru VR-1 s využitím trojrozměrné kinetiky. *Disertační práce*. FJFI. ČVUT. 2019.
- [2] PETRUZZI A., D'AURIA, F. Thermal-Hydraulic System Codes in Nuclear Reactor Safety and Qualification Procedures
- [3] HEDAYAT, A.: Simulation and transient analyses of a complete passive heat removal system in a downward cooling pool-type material testing reactor against a complete station blackout and long-term natural convection mode using the RELAP5/3.2 code

Jméno a pracoviště vedoucího práce:

Ing. Filip Fejt, Ph.D.

KJR FJFI ČVUT v Praze

Datum zadání výzkumného úkolu:

14. 10. 2022

Datum odevzdání výzkumného úkolu:

14. 8. 2023

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

V Praze dne 10. 10. 2022

Ing. Jan Rataj, Ph.D.



Vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem sůj výzkumný úkol vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne

.....

Bc. Jakub Mátl

Poděkování

Děkuji Lindě za oběd, měl jsem opravdu hlad.

Bc. Jakub Mátl

Název práce:

Termohydraulický model školního reaktoru VR-1

Autor: Bc. Jakub Mátl

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Jaderné inženýrství

Druh práce: Výzkumný úkol

Vedoucí práce: Ing. Filip Fejt, Ph.D.

Katedra jaderných reaktorů, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, České vysoké učení technické v Praze

Konzultant: –

Abstrakt: Systémové termohydraulické kódy tvoří nedílnou součást analýzy přechodových jevů a nehod na jaderných zařízeních. Prvotní účel těchto kódů byla aplikace na komíční energetické reaktoru, avšak v posledních letech je kladen důraz na validaci těchto kódů pro použití na výzkumných reaktorech. Jedním z problémů systémových kódů je možnost volné nodalizace kontrolních objemů, což může být pro simulaci přirozeného proudění na výzkumných reaktorech zcela zásadní. Cílem práce je aplikace termohydraulického kódu RELAP5/MOD3 k vytvoření termohydraulického modelu školního reaktoru VR-1 a studie vlivu nodalizace na vznik přirozeného proudění.

Klíčová slova: Klíčová slova

Title:

Thermohydraulic model of training reactor VR-1

Author: Bc. Jakub Mátl

Abstract: System thermohydraulic codes constitute an integral part of the analysis of transients and accidents in nuclear facilities. The initial purpose of these codes was their application to commercial power reactors, but in recent years, emphasis has been placed on validating these codes for use in research reactors. One of the challenges of system-level codes is the free nodalization of control volumes, which can be crucial for simulating natural circulation. The aim of this work is to apply the thermohydraulic code RELAP5/MOD3 to create a thermohydraulic model of the VR-1 research reactor and to study the influence of nodalization on the natural circulation phenomena.

Key words: Key words

Obsah

Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	13
Úvod	15
1 Termohydraulické systémové kódy	17
1.1 Úvod	17
1.2 Oblasti aplikace	17
1.3 Hodnocení systémových kódů	18
1.4 Limitace systémových kódů	18
1.5 Aplikace na výzkumné reaktory	19
2 Benchmarková úloha	21
2.1 Popis experimentu	21
2.2 Základní hydraulické komponenty v kódu RELAP5	21
2.3 Model v RELAP5	24
2.4 Výsledky experimentů a výpočtů	25
3 Termohydraulický model palivového článku IRT-4M	27
3.1 Hydraulický model IRT-4M	27
3.1.1 Ověření správnosti modelu	30
3.2 Zjednodušený hydraulický model	31
3.2.1 Ověření správnosti modelu	31
3.3 Termohydraulický model PČ IRT-4M	34
3.4 Sjednocení průtočných kanálů	37
3.4.1 Celkový průtok skrz PČ	37
3.4.2 Ohřev chladiva na výstupu z jednotlivých kanálů (trubek) PČ	38
3.4.3 Výskyt povrchového varu	39
3.4.4 Zhodnocení sjednocení průtočných kanálů	40
3.5 Sjednocení topných komponent	41
3.5.1 Výpočet a zhodnocení sjednocení HS	41
4 Termohydraulický model reaktoru VR-1	43
4.1 Referenční model	44
4.1.1 Výsledky	44
4.2 Model NOD01	46
4.2.1 Výsledky	47
4.3 Model NOD02	49
4.3.1 Výsledky	49
4.4 Model NOD03	51
4.4.1 Výsledky	52
4.5 Model NOD04	53
4.5.1 Výsledky	54

5 Hodnocení termohydraulických modelů	57
Závěr	61
Literatura	63
Přílohy	65
A Přehled modelů	65
B Tabulky	67
C Obrázky	69

Seznam obrázků

1.1	Proces interního hodnocení kódu.	18
2.1	Geometrie testovací trubice [18].	22
2.2	Testovací smyčka [18].	22
2.3	Hydraulické komponenty v programu RELAP5.	23
2.4	Termohydraulický model testovací trubice - RELAP.	24
2.5	Srovnání dutinového koeficientu - exp. BC1.	26
2.6	Srovnání dutinového koeficientu - exp. BC7.	26
2.7	Srovnání dutinového koeficientu - exp. BC9.	26
2.8	Srovnání dutinového koeficientu - exp. BC13.	26
3.1	Radiální řez palivovým článkem IRT-4M.	28
3.2	Radiální řez palivovým článkem IRT-4M v detailu.	28
3.3	Axiální řez palivovým článkem IRT-4M.	28
3.4	Hydraulický model palivového článku IRT-4M.	29
3.5	Průtok a rychlosť v jednotlivých kanálech.	31
3.6	Zjednodušený hydraulický model palivového článku IRT-4M.	32
3.7	Závislost průtoku skrz PČ (bez vytěsnitele) na hydraulickém průměru.	33
3.8	Termohydraulický komplexní model 8-trubkového PČ IRT-4M bez vytěsnitele (Pro lepší vizualizaci byly měřítka komponent 53 až 62 změněna).	35
3.9	Termohydraulický zjednodušený model 8-trubkového PČ IRT-4M bez vytěsnitele (Pro lepší vizualizaci byly měřítka komponent 53-62 změněna).	36
3.10	Axiální a radiální rozložení výkonu v 8-trubkovém PČ IRT-4M - Serpent2.	37
3.11	Ohřev na výstupu z jednotlivých kanálů pro jednotlivé modely.	38
3.12	Závislost ohřevu pro komplexní a zjednodušený model - rovnoměrný výkon (počet teplot je poměr rozdílu teploty na výstupu z kanálu zjednodušeného modelu a komplexního modelu).	39
3.13	Závislost ohřevu pro komplexní a zjednodušený model - výkon dle Serpent2 (počet teplot je poměr rozdílu teploty na výstupu z kanálu zjednodušeného modelu a komplexního modelu).	39
3.14	Komplexní model	40
3.15	Zjednodušený model	40
3.16	Možný výskyt povrchového bublinkového varu - rovnoměrné rozdělení výkonu (červené nody označují možný výskyt varu, modré přirozenou konvekci bez změny fáze).	40
3.17	Komplexní model	40
3.18	Zjednodušený model	40
3.19	Možný výskyt povrchového bublinkového varu - rozdělení výkonu dle Serpent2 (červené nody označují možný výskyt varu, modré přirozenou konvekci bez změny fáze).	40
4.1	CFD výpočet přirozeného proudění skrze reaktor TRIGA MARK II [12].	43
4.3	Popis přirozeného proudění skrze palivový článek pro referenční model.	44
4.2	Termohydraulický model reaktoru VR-1.	45
4.4	Časový vývoj teplot v jednotlivých nódách trubky 40.	46

4.5 Nodalizace horizontálního obtoku - model NOD01	47
4.6 Průtok skrze AZ reaktoru VR-1 - referenční a renodalizovaný model NOD01.	48
4.7 Průtok skrze trubky 170 - 174 (viz obr. 4.5) - renodalizovaný model NOD01.	48
4.8 Teplotní vývoj v trubce 40 - model NOD01.	48
4.9 Nodalizace vertikálního obtoku - model NOD02	49
4.10 Průtok skrze AZ reaktoru VR-1 - referenční a renodalizovaný model NOD02.	50
4.11 Průtok spojovacími jednotkami (SJ) ve vertikálním obtoku - model NOD02.	50
4.12 Teplotní vývoj v trubce 40 - model NOD02.	51
4.13 Nodalizace horizontálního obtoku - model NOD03	52
4.14 Průtok skrze jednotlivé SJ (S3 a S4) - model NOD03.	52
4.15 Průtok skrze AZ reaktoru VR-1 - referenční a renodalizovaný model NOD03.	53
4.16 Teplotní vývoj v trubce 40 - model NOD03.	53
4.17 Nodalizace horizontálního obtoku - model NOD04	54
4.18 Průtok skrze AZ reaktoru VR-1 - Referenční model a renodalizovaný model NOD01, NOD03 a NOD04.	55
4.19 Průtok skrze jednotlivé SJ (S3 a S4) - model NOD04.	55
4.20 Teplotní vývoj v trubce 40 - model NOD04.	55
5.1 Průměrné teploty a rychlosti v jednotlivých částech AZ reaktoru TRIGA Mark II (CFD výpočet) [12].	57
5.2 Průtok skrz AZ reaktoru VR-1 pro jednotlivé modely (RELAP5).	58
5.3 Teploty chladiva na výstupu z AZ reaktoru VR-1 pro jednotlivé modely (RELAP5).	58
5.4 Vstupní teplota chladiva pro jednotlivé modely (RELAP5)	59
5.5 Výstupní teplota chladiva pro jednotlivé modely (RELAP5).	59
5.6 Průtok skrz AZ reaktoru VR-1 pro jednotlivé modely (RELAP5).	59
C.1 Konstrukce reaktoru VR-1 [5]	70
C.2 Konstrukce reaktoru TRIGA Mark I [12].	71
C.3 Termohydraulický model reaktoru VR-1 - Referenční model (NOD00).	72
C.4 Termohydraulický model reaktoru VR-1 - model NOD01.	73
C.5 Termohydraulický model reaktoru VR-1 - model NOD02.	74
C.6 Termohydraulický model reaktoru VR-1 - model NOD03.	75
C.7 Termohydraulický model reaktoru VR-1 - Model NOD04	76
C.8 Rozložení teplot v trubce 40	77
C.9 Rozložení teplot v trubce 40.	77
C.10 Rozložení teplot v trubce 40.	77
C.11 Průtok skupinou S1 a S2 - model NOD03.	78
C.12 Průtok skupinou S3 a S4 - model NOD03.	78
C.13 Průtok skupinou S5 a S6 - model NOD03.	78
C.14 Průtok skupinou S1 a S2 - model NOD04.	79
C.15 Průtok skupinou S3 a S4 - model NOD04.	79
C.16 Průtok skupinou S5 a S6 - model NOD04.	79

Seznam tabulek

2.1	Podmínky pro ověření modelu [18].	25
3.1	Relativní objemové průtoky skrze palivový článek (s odpovídajícím vytěsnitelem).	30
3.2	Celkový objemový průtok 8-trubkovým PČ (s vytěsnitelem).	30
3.3	Rozložení rychlostí v kanálech 8-trubkového PČ (s vytěsnitelem).	30
3.4	Průtok v komplexním a zjednodušeném modelu PČ (bez vytěsnitele) pro různé hydraulické průměry.	33
3.5	Rozměry ekvivalentních HS pro PČ IRT-4M a jejich napojení na jednotlivé trubky (viz Obr. 3.8 a 3.9).	34
3.6	Rozložení výkonu v 8-trubkovém PČ IRT-4M dle programu Serpent.	37
3.7	Celkový průtok skrz PČ pro komplexní a zjednodušený model při rovnoměrném rozdělení výkonu a rozdělení dle programu Serpent2.	38
3.8	Ohřev chladiva na výstupu z PČ pro jednotlivé kanály (RV - rovnoměrný výkon, S - výkon dle Serpent2, KM & JM - komplexní a zjednodušený model).	39
3.9	Geometrie sjednocené HS.	41
3.10	Celkový průtok, ohřev a maximální teplota HS pro zjednodušený a jednotkový model.	41
5.1	Maximální a průměrné teploty HS pro jednotlivé modely.	60
A.1	Přehled použitých modelů PČ IRT-4M (Modely označené hvězdičkou byly vytvořeny i pro 6-trubkovou a 4-trubkovou konfiguraci).	65
A.2	Přehled nodalizací modelu školního reaktoru VR-1.	65
B.1	Geometrie 8-trubkového palivového článku IRT-4M [19]	67
B.2	Průběh výkonu jednoho PČ.	67

Úvod

Kapitola 1

Termohydraulické systémové kódy

1.1 Úvod

Systémové termohydraulické kódy (SYS-TH) tvoří nedílnou součást bezpečnostních analýz. Simulace poskytují informace o příslušných parametrech systému, jako jsou tlak, teplota chladiva nebo průtok v kontrolních objemech a teploty materiálů v modelovaných strukturách, to vše v závislosti na čase. SYS TH kódy jsou obvykle založeny na řešení pěti nebo šesti nehomogenních rovnic zachování hmotnosti, energie a hybnosti, obvykle s použitím implicitních nebo poloimplicitních schémat. Prostřednictvím těchto kódů lze simulovat provoz a chování reaktoru, včetně průběhu havárií, a posoudit tak úroveň bezpečnosti jaderné elektrárny [4, 15].

1.2 Oblasti aplikace

Systémové kódy jsou považovány za multifyzikální výpočetní programy schopné simuloval jak základní fyzikální jevy (např. var na stěně trubky), tak i celistvé chování systémů (např. primárního okruhu jaderné elektrárny). Díky tomu je možné pomocí těchto kódů počítat i složité přechodové jevy, které mohou představovat například základní projektové události a nehody na jaderném zařízení. Kromě termohydraulického popisu přenosu hmoty, hybnosti a energie je možné aplikovat SYS-TH kódy na:

- popis transportu plynů (N_2 , H_2 , vzduch, produkty štěpení...),
- transport bórů a těkavých plynů,
- kondukce skrze materiály s konvekcí do tekutin,
- zjednodušený neutronický popis,
- chemický popis reakcí zinku s vodou,
- popis chování paliva,
- popis chování součástek jaderných elektráren jako rotorů či ventilů,
- popis řídících systémů (Instrumentation & Control).

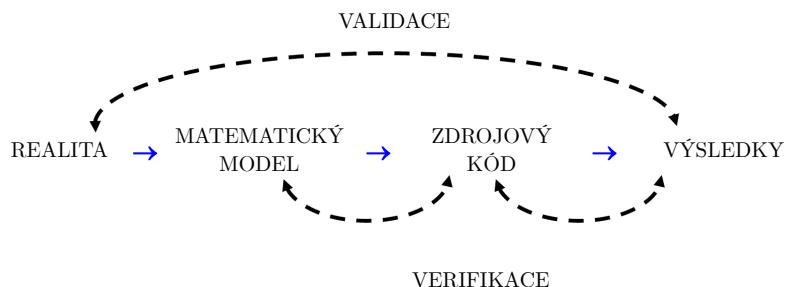
V oblasti jaderného inženýrství se používá řada nejmodernějších termohydraulických kódů. Mezi nejpoužívanější kódy patří RELAP5, TRACE, APROS, POLKA-T, CATHARE, ATHLET a RETRAN. Tyto kódy využívají přístup založený na kontrolních objemech s velkou nodalizací a aplikují nejmodernější termohydraulické modely k popisu fyzikálního chování systému [15].

1.3 Hodnocení systémových kódů

Nedílnou součástí vývoje numerických SYS-TH kódů a jejich interního hodnocení je verifikace a validace. Verifikace i validace se týká procesu zvyšování spolehlivosti kódu a snižování rizika nesprávné aplikace. Interní hodnocení kódu obvykle provádí vývojář kódu.

Verifikace kódu se týká zkoumání zdrojového kódu ve vztahu k jeho popisu v dokumentaci. Tento proces zahrnuje postupy související se zajištěním kvality softwaru a úsilí o odhalení a opravu chyb v modelech a numerických algoritmech využívaných k řešení parciálních diferenciálních rovnic [15].

Validace kódu zahrnuje vyhodnocení přesnosti předpovídaných hodnot porovnáním s příslušnými experimentálními údaji. Validace kódu se v podstatě zaměřuje na kvantitativní posouzení přesnosti kódu porovnáním s kvalitními validačními experimenty a benchmarkovými úlohami. Tyto experimenty jsou důkladně zdokumentovány a charakterizovány, včetně pečlivých odhadů statistické chyby měření. Díky validačnímu procesu jsou výsledky kódu konzistentní a prokazují, že celý systém může přinášet smysluplné a očekávané výsledky [15]. Proces interního hodnocení kódu je ilustrován na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: Proces interního hodnocení kódu.

Interní hodnocení kódů ovšem nemusí vždy identifikovat nepřesnosti kódů při popisu různých fyzikálních jevů. Součástí neustálého vývoje je také externí hodnocení nezávislými institucemi a uživateli. Nezávislé posouzení kódů je proces, kdy třetí strana kvantifikuje přesnost kódů na základě experimentů provedených v integrálním zkušebním zařízení (ITF). Externí posouzení kódů obvykle vyžaduje kvalifikaci uživatele a vhodně zvolenou nodalizaci kontrolních objemů [15].

1.4 Limitace systémových kódů

Většina užívaných systémových kódů má možnost volné nodalizace jednotlivých termohydraulických komponent. K popisu komplexních problémů se využívají definované komponenty, které jsou děleny na jednotlivé kontrolní objemy. Toto dělení je čistě na uživateli, a neexistuje tedy správný postup, jakou nodalizaci komponent a strukturu studované problematiky použít [15].

Problematická se může jevit především výše zmíněná nodalizace. Využitím jemnějšího rozdělení je sice možné docílit podrobnějšího popisu, ovšem při nevhodně zvolené nodalizaci, např. příliš malých kontrolních objemech může docházet k nestabilnímu výpočtu a fyzikálně neodpovídajícím výsledkům. Důvody proč příliš jemná nodalizace může být problematická jsou dva [15]:

- velká část empirických vztahů zahrnutých do programu je získána z výpočtu s pevně danou nodalizací, což již z principu vede k rozdílným podmírkám,

- numerické simulace využívané v systémových kódech využívají uměle vloženou viskozitu za účelem získání stabilních výsledků.

Důležitá je také široká škála parametrů používaných k popisu fyzikálních jevů. Ne zřídka má uživatel možnost volit mezi dvěma a více vstupními parametry, které k popisu dané problematiky slouží. Příkladem může být například volba mezi různými modeley škracení, nucené proudění podchlazené či nasycené kapaliny nebo nastavení ztrátového součinitele v případě trubek či pístů. Při tvorbě komplexního modelu není neobvyklé, že počet vstupních parametrů se pohybuje v řádu tisíců. Z tohoto důvodu je pravděpodobnost lidské chyby vysoce pravděpodobná a je třeba dbát nesmírné pozornosti při konstrukci modelu. Je vhodné také zmínit často diskutované téma volby časového kroku na řešení a způsobu zadávání okrajových podmínek [15].

1.5 Aplikace na výzkumné reaktory

Výpočetní kód RELAP5 byl vyvinut jakožto systémový "best-estimate" kód pro popis PIE (postulovalých iniciačních událostí) na konvenčních lehkovodních reaktorech. Množství experimentálně určených vztahů a korelací použitých při vývoji kódu RELAP5 bylo odvozeno a stanoveno právě pro využití na energetických reaktorech, avšak cílem mnohých studií (např. [17, 7, 3]) je aplikace i na výzkumné reaktory [10]. Přestože jsou SYS-TH hojně používány pro bezpečnostní analýzy výzkumných reaktorů, mnohé práce ([1, 14, 6]) upozorňují na nedostatečnou validaci a verifikaci modelů u přechodových jevů a postulovaných iniciačních událostí. Pro většinu výzkumných reaktorů je kromě jiného také důležitý správný popis odvodu tepla dlouhodobou přirozenou konvekcí. Proto je často kladen důraz na zkušenosť uživatele a na „inženýrský odhad“ při konstrukci a volbě vstupních parametrů [4]. Z těchto důvodů jsou tvořeny benchmarkové úlohy prováděné právě na výzkumných reaktorech viz např. [2].

Problém modelování přirozeného proudění se může stát ještě složitějším kvůli přítomnosti dodatečných obtoků a velké redistribuci toku během přechodových jevů. Je na uživateli kódu, aby určil, jak konstruovat takto komplexní proudění v rámci jednorozměrného kódu. K dostatečnému popisu můžou být použity kontrolní objemy, jednoduché a vícenásobné spojovací jednotky či další termohydraulické komponenty. Volba nodalizace a způsobu konstrukce reaktoru by v ideálním případě založena na výsledcích detailních citlivostních analýz. Nicméně v mnoha případech je uživatel nucen učinit ad hoc rozhodnutí kvůli nedostatku času nebo vhodných experimentálních dat [15].

Kapitola 2

Benchmarková úloha

Pro model školního reaktoru VR-1 je důležitý přestup tepla v malých rychlostech a nebo při pírozeném proudění. Cílem tvorby benchmarkové úlohy bylo získat praxi v simulaci přestupu tepla při tlacích blízkých atmosférickému tlaku a tyto zkušenosti dále využít při tvorbě modelu VR-1. Proto byl vytvořen jednoduchý model experimentální smyčky vycházející z [18]. Z [13] vyplývá, že program RELAP5 je již schopný sdílení tepla při nízkých tlacích simulovat. Proto je možné vytvořený model srovnat s experimentem a ověřit správnost modelu.

2.1 Popis experimentu

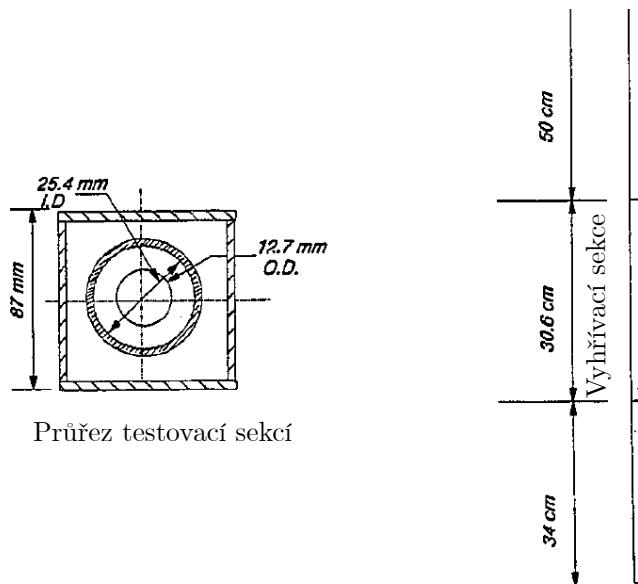
Experimenty popisované v [18] se týkaly podchlazeného varu a kondenzace ve vertikálním kanálu. Postup zahrnoval cirkulaci vody kanálem, která byla před vstupem do průtočného kanálu v podchlazeném stavu s teplotou pod bodem varu. Poté byla kapalina ohřívána konstantní rychlostí a tepelný tok byl měřen pomocí termočlánku. Jedním z hlavních sledovaných parametrů byl dutinový koeficient, resp. jeho průběh skrze testovací sekci.

Při experimentu byl použit kruhový kanál z nerezové oceli s hladkým vnitřním povrchem a průměrem 5 mm. Kanál byl navržen tak, aby jím mohla protékat voda, a byl vybaven topným systémem, který umožňoval řízený ohřev kapaliny. Voda použitá v experimentu byla zpočátku skladována v nádrži a čerpána kruhovým kanálem s řízeným průtokem. Průtok vody se měřil pomocí průtokoměru umístěného před kanálem. Na vstupu a výstupu kanálu byl rovněž umístěn termočlánek, který měřil teplotu vody před průchodem kanálem a po něm. Kanál byl ohříván pomocí ohříváku, který umožňoval nastavení příkonu. Tepelný tok byl měřen pomocí termočlánku umístěného na vnějším povrchu kanálu. Pro studium varu a kondenzace vody v testovací sekci byl experiment proveden při různých tepelných tocích a průtocích. Tepelný tok se postupně zvyšoval nastavením příkonu topného systému a zaznamenávala se odpovídající teplota vody. Experimentální sestava je ilustrována na Obr. 2.1 a 2.2.

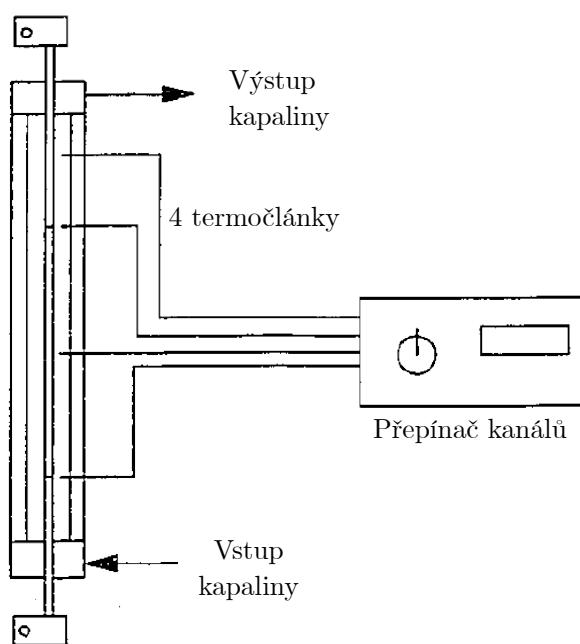
Během experimentu byly rovněž použity vysokorychlostní kamery, které pořizovaly snímky procesů varu a kondenzace uvnitř kanálu. To umožnilo podrobnější analýzu příslušných mechanismů přenosu tepla, jako například průběh dutinového koeficientu.

2.2 Základní hydraulické komponenty v kódu RELAP5

Vzhledem k tomu, že systémový kód RELAP5 využívá konstitutivní rovnice vycházející z teorie podobnosti, tak je uživatel nucen daný problém popsat pomocí přednastavených komponent.



Obrázek 2.1: Geometrie testovací trubice [18].

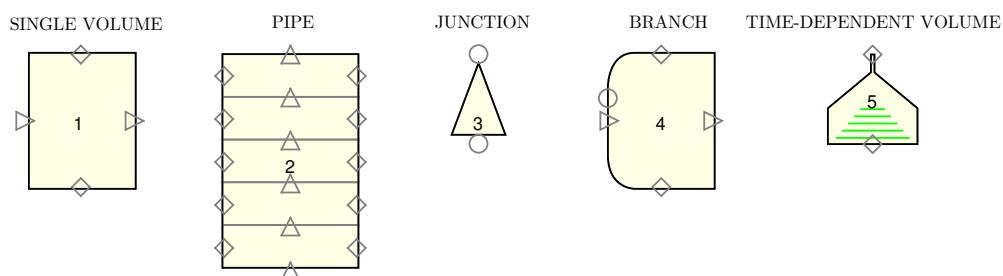


Obrázek 2.2: Testovací smyčka [18].

Dalším důvodem, proč je těchto komponent využíváno je usnadněná konvergence, která ovšem nemusí být pro komplexní modely nikdy zcela zajištěna. Program RELAP5 obsahuje celkem 17 typů komponent, avšak v této práci bude využito následujících 5 (Obr. 2.3).

1. Komponenta 1 - Kontrolní objemy představují konečnou oblast kapalinového systému, například potrubí nebo nádrž, v níž se předpokládají rovnoměrné vlastnosti kapaliny. Pro popis těchto vlastností jsou aplikovány jednorozměrné rovnice proudění.
2. Komponenta 2 - Trubky slouží k přepravě kapalin z jednoho místa v systému na druhé. V kódu RELAP5 jsou potrubí reprezentována jako řada řídicích. Průtok kapaliny, tlakové ztráty a přenos tepla v potrubí se počítají pomocí jednorozměrných rovnic proudění.
3. Komponenta 3 - Spojovací jednotky slouží k propojení dvou libovolných komponent. Jsou tvořeny kontrolním objemem, přičemž jsou zde aplikovány rovnice hmotnostní a energetické bilance.
4. Komponenta 4 - Spojovací jednotky umožňují propojit i více komponent, které mají např. omezené množství výstupních cest. Plní funkci spojovací jednotky pro více komponent.
5. Komponenta 5 - Objem/zdroj kapaliny sloužící ke stanovení okrajových podmínek (TDV).

Dále jsou v této práci využity tepelné jednotky (Heat structures) představující zdroj tepla. Přenos je popisován jednorozměrnými rovnicemi pro kondukci, konvekci a radiaci pro válcový, deskový či kulový zdroj. V této práci byly využity zdroje pouze válcové popsané výškou a vnějším a vnitřním průměrem [8].



Obrázek 2.3: Hydraulické komponenty v programu RELAP5.

Problematická se může jevit především nodalizace jednotlivých komponent a struktur. Využitím jemnějšího rozdělení je možné dosáhnout podrobnějšího popisu, avšak příliš jemná nodalizace může způsobit nestabilní výpočet a fyzikálně neodpovídající výsledky. Důvody proč příliš jemná nodalizace může být problematická jsou dva [15]:

- velká část empirických vztahů zahrnutých do programu je získána z výpočtu s pevně danou nodalizací, což již z principu vede k rozdílným podmínkám,
- numerické simulace využívané v systémových kódech využívají uměle vloženou viskozitu za účelem získání stabilních výsledků.

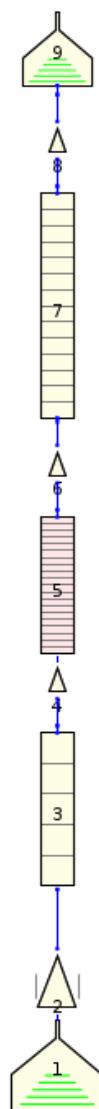
Důležitým aspektem při popisu komplexního problému je propojení jednotlivých součástek, které může mít značný vliv na výsledné proudění. Pro nevhodně strukturovaných propojeních může docházet např. k různým obtokům, protiproudům či cirkulacím. Systémové kódy ve většině případů nabízejí model vytvořit z jednoduchých komponent, a proto je nutné při tvorbě modelu použít „inženýrský odhad“ a využít zkušenosti uživatele [15].

2.3 Model v RELAP5

Cílem této sekce je představit zjednodušený model experimentální sestavy popsané v [18].

Pro jednoduchost byly podmínky v testovací sekci experimentální smyčky simulovány rozdílem v tlaku na vstupu a výstupu trubky, konstantním objemovým, výkonem elektrického ohříváku a vstupní, resp. výstupní teplotou vody.

Vytvořený model je vyobrazen na Obr. 2.4, modelované podmínky vycházející z [18] jsou uvedeny v Tab. 2.1. Tlak a teplota na vstupu byly nastaveny pomocí časově závislé objemové komponenty 1 (dále TDV), průtok byl nastaven časově závislou spojovací jednotkou 2 (dále TDJ) a tlak na výstupu komponentou TDV 9. Jelikož geometrie trubek je v programu RELAP5 značně omezená, k approximaci průtočné trubky byla využita kruhová trubka s odpovídajícím hydraulickým průměrem $d_h = 0,0127$ m. Geometrie testovací trubice je vykreslena na Obr. 2.1. Průtočná plocha má tvar mezikruží s vnějším průměrem 25,4 mm a el. ohřívák tvar válce s průměrem 12,7 mm.



Obrázek 2.4: Termohydraulický model testovací trubice - RELAP.

Tabulka 2.1: Podmínky pro ověření modelu [18].

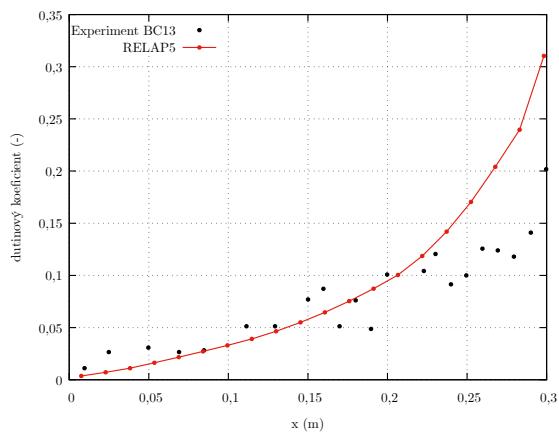
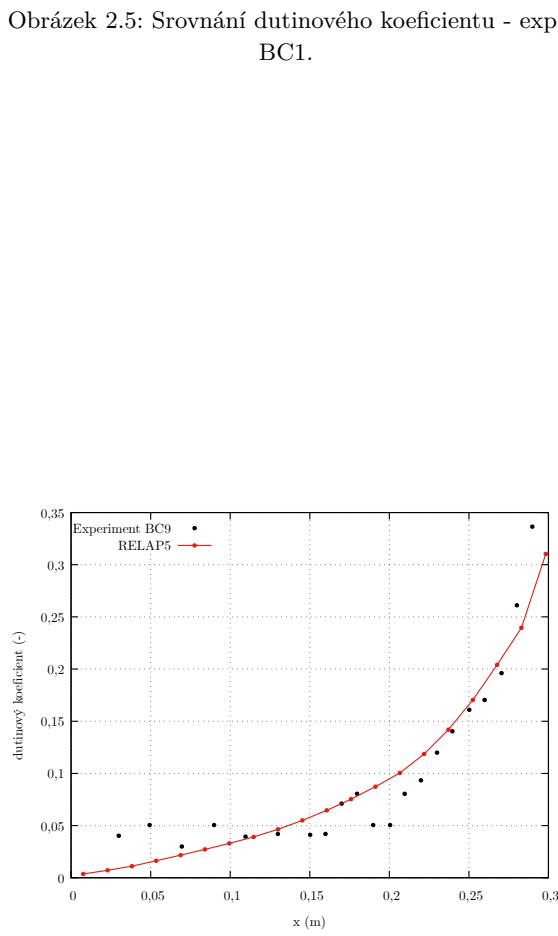
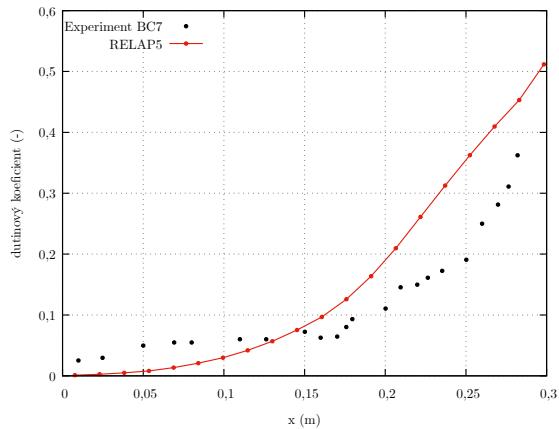
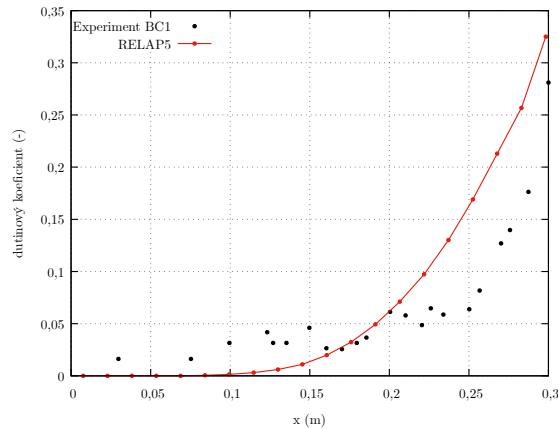
experiment	P (W)	G (kg/m ² s)	p _{in} (kPa)	T _{in} (K)	p _{out} (kPa)
BC1	2607	161,2	114	363,75	103,15
BC7	5869	208,05	114	356,65	103,15
BC9	5925	485,34	132	361,85	121,14
BC13	7366	348,94	137	361,15	126,13

2.4 Výsledky experimentů a výpočtu

Na Obr. 2.5, 2.6, 2.7 a 2.8 jsou vykresleny průběhy dutinového koeficientu v vyhřívané sekci testovací trubice. Ve všech případech je možné rozdělit oblasti na silně podchlazenou oblast („Highly subcooled region“) a slabě podchlazenou oblast („Low subcooling region“). Přechod mezi těmito regiony je nazýván „Onset of significant void“ a ve všech případech je situován ve výšce okolo 0,2 m [13].

Z Obr. 2.5, 2.6, 2.7 a 2.8 je jasně vidět, že zatímco ve vysoce podchlazené oblasti je dutinový koeficient menší ve srovnání s experimenty, tak v slabě podchlazené oblasti dává program RELAP5 nadhodnocené výsledky. Kvalitativně jsou ovšem výsledky ve shodě s měřením. Ve všech případech je přechod mezi výše zmíněnými oblastmi v okolí bodu 0,2 m, kdy dochází k výraznému nárůstu dutinového koeficientu. Důvodem nesrovnatlostí může být jak jednak zjednodušený popis experimentální smyčky, tak extrapolace empirických vztahů odvozených pro vysoké tlaky.

Při porovnání dutinového koeficientu vycházejícího z modelu 2.4 a výsledků z [13] lze pozorovat obdobné odchylky od experimentálních dat. Přestože se jedná o rozdílný model a rozdílnou verzi programu RELAP5, tak lze vytvořený model považovat za dostatečně přesný.



Obrázek 2.7: Srovnání dutinového koeficientu - exp. BC9.

Obrázek 2.8: Srovnání dutinového koeficientu - exp. BC13.

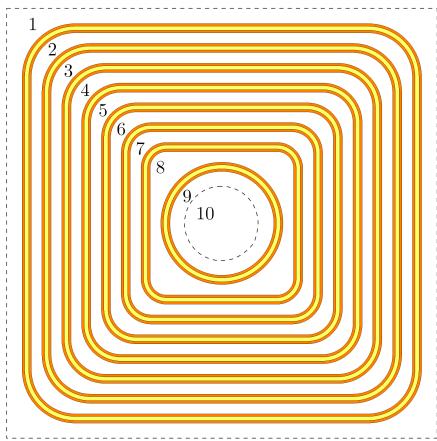
Kapitola 3

Termohydraulický model palivového článku IRT-4M

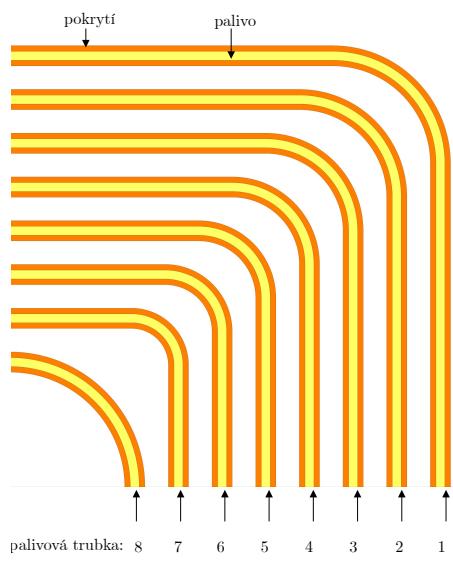
Pro vytvoření termohydraulického modelu školního reaktoru VR-1 byl použit program RELAP5, přičemž samotná tvorba byla rozdělena do několika sekcí. Jelikož možnosti modelování různých geometrií jsou v programu RELAP5 značně omezené, pro správnou interpretaci a zachování fyzikálních dějů byl nejdříve vytvořen hydraulický model palivového článku IRT-4M při nuceném proudění, který byl následně zjednodušen do podoby sjednocené trubky. Poté byl vytvořen termohydraulický model, který interpretuje přirozené proudění v palivovém článku. Tento model byl následně opět zjednodušen a byl použit pro sestavení termohydraulického modelu reaktoru VR-1.

3.1 Hydraulický model IRT-4M

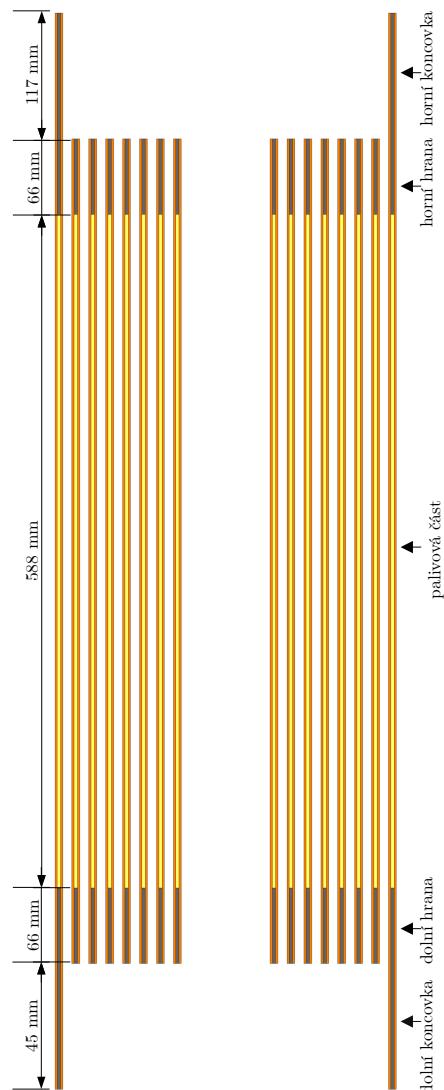
Palivo IRT-4M je tvořeno 8, 6 nebo 4 koncentrickými čtvercovými trubkami se zakulacenými rohy s možností vložení vytěsnitele pro rovnoměrnější průtok. Geometrie a konstrukce použitá pro vytvoření modelu vychází z dokumentu [19]. Na Obr. 3.1 a 3.3 je vykreslen radiální a axiální průřez 8-trubkovým palivem bez vytěsnitele. Jelikož je geometrie trubek v programu RELAP5 omezená, tak jsou jednotlivé oddělené průtočné plochy approximovány kruhovými trubkami s odpovídajícím hydraulickým průměrem. Komponenty 1-9 uvedené na Obr. 3.4 odpovídají průtočným plochám z 3.3, plocha 10 pak představuje vytěsnitel (vstupní průměr vytěsnitele je 3 mm). Rozměry palivového článku a jednotlivých průtočných ploch jsou uvedeny v příloze v tab. B.1. Nucené proudění bylo vytvořeno pomocí TDV 26 a 36 rozdílem v tlaku rovným 4 m vodního sloupce. Komponenty 22-25 a 32-35 představují konkiovky a spojení jednotlivých trubek. Samotný hydraulický je ilustrován na Obr. 3.4 (pro lepší přehlednost není model v měřítku).



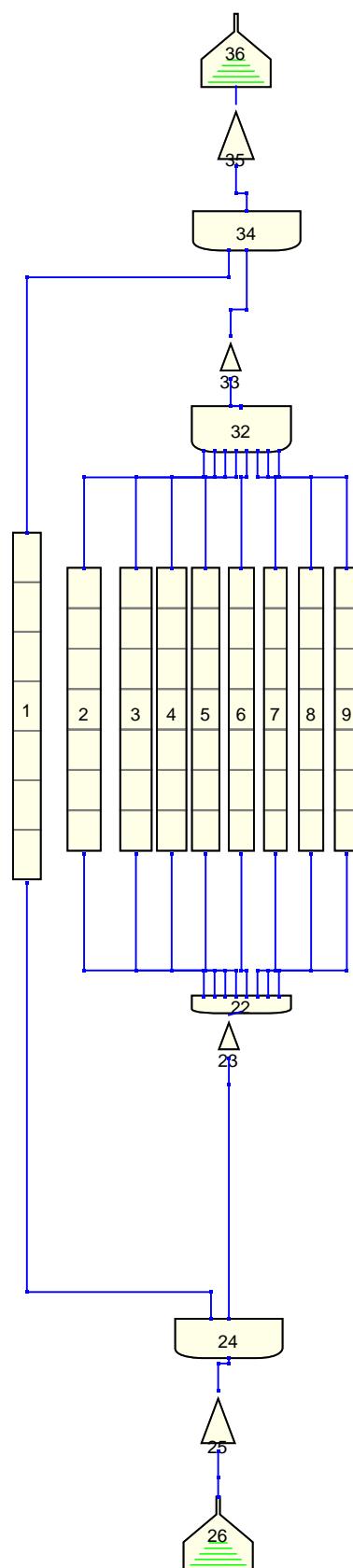
Obrázek 3.1: Radiální řez palivovým článkem IRT-4M.



Obrázek 3.2: Radiální řez palivovým článkem IRT-4M v detailu.



Obrázek 3.3: Axiální řez palivovým článkem IRT-4M.



Obrázek 3.4: Hydraulický model palivového článku IRT-4M.

3.1.1 Ověření správnosti modelu

Návrh a ověření modelu vyplývá z [9], kdy výsledné proudění je charakterizováno relativními objemovými průtoky G (m^3/h) skrze průtočné plochy 1-10. Relativní průtoky G_i/G (-) jsou uvedeny v Tab 3.1. Celkový objemový průtok 8-trubkovým PČ v závislosti na tlakovém rozdílu vytvořeným odpovídajícím vodním sloupcem je v uveden tab. 3.2. Pro srovnání byly použity výsledky uvedené v [19] (výsledky jsou označeny jako referenční).

Tabulka 3.1: Relativní objemové průtoky skrze palivový článek (s odpovídajícím vytěsnitelem).

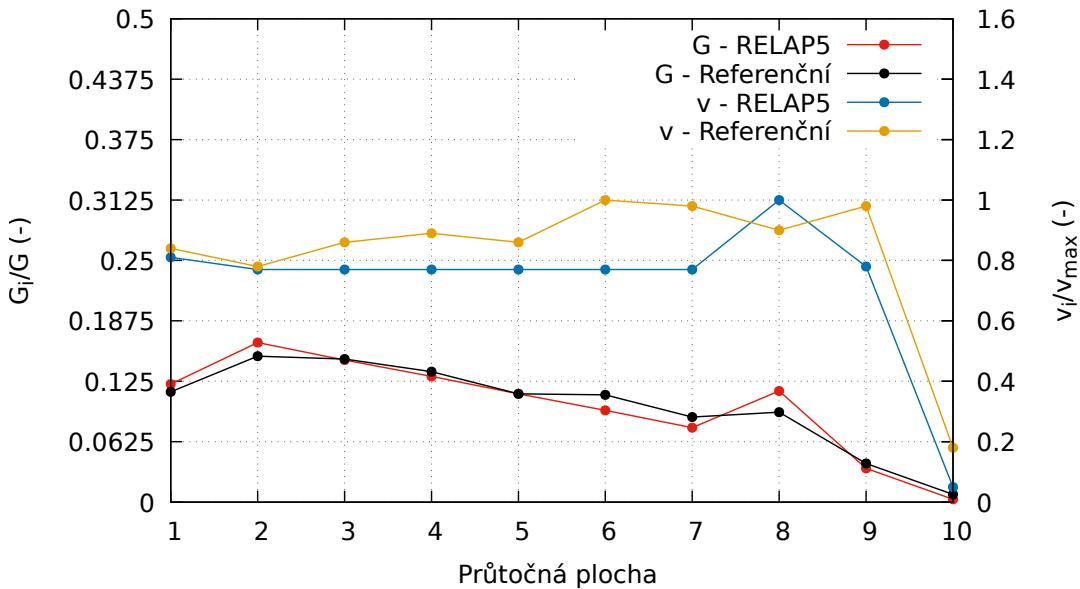
Průtočná plocha	G_i/G (-)					
	8-trubkový PČ		6-trubkový PČ		4-trubkový PČ	
	RELAP5	Referenční	RELAP5	Referenční	RELAP5	Referenční
1	0,122	0,114	0,145	0,130	0,182	0,173
2	0,165	0,151	0,194	0,173	0,243	0,229
3	0,147	0,148	0,174	0,170	0,218	0,224
4	0,130	0,135	0,153	0,155	0,192	0,205
5	0,112	0,112	0,132	0,128	0,166	0,170
6	0,095	0,111	0,112	0,127		
7	0,077	0,088	0,091	0,117		
8	0,115	0,093	0,000	0,000		
9	0,035	0,040				
10	0,003	0,008				

Tabulka 3.2: Celkový objemový průtok 8-trubkovým PČ (s vytěsnitelem).

Δp (m)	G (m^3/h)	
	RELAP5	Referenční
2,45	22,7	25,6
3	27,5	28,4
3,5	31,3	30,7
4	34,8	32,8

Tabulka 3.3: Rozložení rychlostí v kanálech 8-trubkového PČ (s vytěsnitelem).

Průtočná plocha	w / w_{\max}	
	RELAP5	Referenční
1	0,81	0,84
2	0,77	0,78
3	0,77	0,86
4	0,77	0,89
5	0,77	0,86
6	0,77	1,00
7	0,77	0,98
8	1,00	0,90
9	0,78	0,98
10	0,05	0,18



Obrázek 3.5: Průtok a rychlosť v jednotlivých kanálech.

Na Obr. 3.5 je vykresleno rozdelení relativních průtoků a rychlosťí pro 8-trubkový palivový článok s vytěsnitelem. Model vytvořený v RELAP5 dává větší rozdíly v průtocích, rozdelení rychlosťí dává naopak rovnoměrnější hodnoty. Odchylky od referenčních hodnot mohou být způsobeny mnoha faktory a naprostá shoda se nedala očekávat. Tyto odchylky ovšem nemají pro další výpočty zásadní vliv a model může být považován za vhodný.

3.2 Zjednodušený hydraulický model

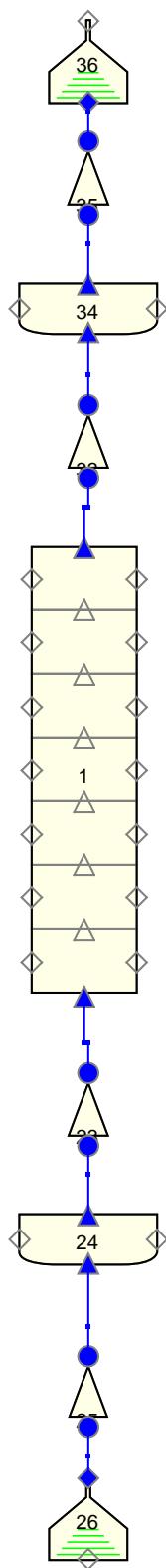
V aktivní zóně reaktoru VR-1 je okolo 16 palivových článků, což dává okolo 160 průtočných kanálů (při uvažování 8-trubkových PČ S vytěsnitelem) pro celý model reaktoru. Pro lepší použitelnost modelu při výpočtech obsahujících externí 3D kinetiku je vhodnější vytvořit zjednodušený model palivového článku se sjednoceným kanálem (viz Obr. 3.6). Při sjednocení kanálů je třeba zachovat celkovou průtočnou plochu a získat adekvátní hydraulický průměr, který zaručí stejný průtok. Prvním odhad hydraulického průměru vychází z rovnice:

$$d_h = \frac{4S}{o}, \quad (3.1)$$

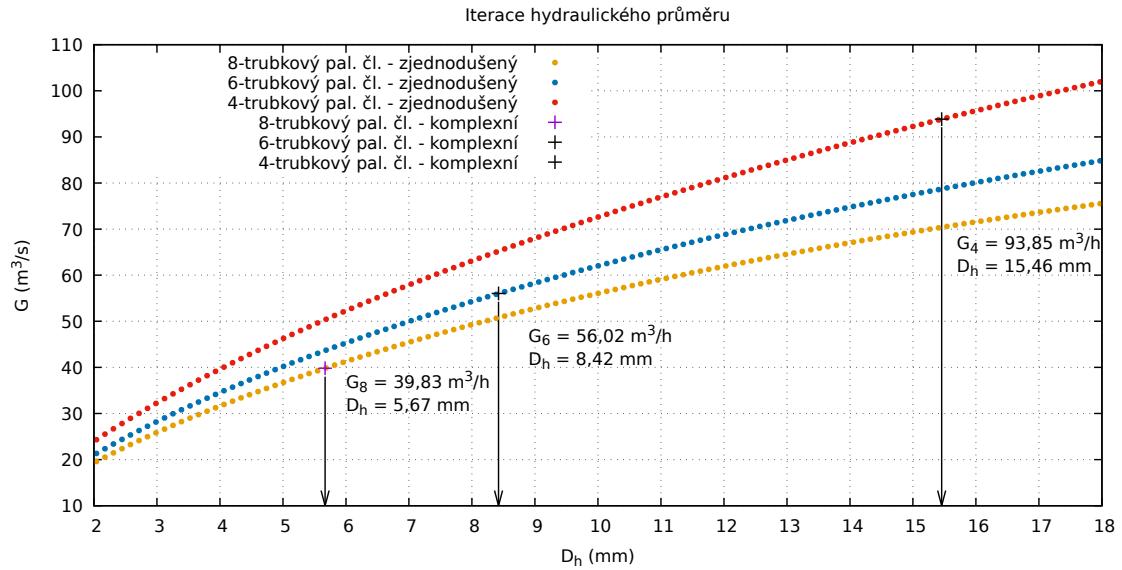
kde S , resp. o je celková průtočná plocha, resp. celkový omočený obvod palivového článku. Následně byl průměr iterován pro získání průtoku z komplexního modelu viz Obr. 3.7. Zjednodušený hydraulický model PČ uvedený na Obr. 3.6 je v následujících kapitolách využit k vytvoření termohydraulického „jednotkového“ modelu (viz sekce 3.3), který představuje PČ v modelu reaktoru VR-1.

3.2.1 Ověření správnosti modelu

Závislost průtoku na hydraulickém průměru zjednodušeného modelu je vykreslena na Obr. 3.7. Rozdíl tlaku Δp odpovídá 4 metrům vodního sloupce.



Obrázek 3.6: Zjednodušený hydraulický model palivového článku IRT-4M.



Obrázek 3.7: Závislost průtoku skrz PČ (bez vytěsnitele) na hydraulickém průměru.

V Tab. 3.4 jsou uvedeny získané hydraulické průměry s odpovídajícím průtokem.

Tabulka 3.4: Průtok v komplexním a zjednodušeném modelu PČ (bez vytěsnitele) pro různé hydraulické průměry.

	\mathbf{G} (m^3/h) - komplex.	\mathbf{G} (m^3/h) - rovnice 3.1	d_h (mm) - rovnice 3.1
4-trubkový PČ	93,85	65,70	8,52
6-trubkový PČ	56,02	43,73	5,68
8-trubkový PČ	39,83	34,68	4,59

	\mathbf{G} (m^3/h) - komplex.	\mathbf{G} (m^3/h) - iterace	d_h (mm) - iterace
4-trubkový PČ	93,85	93,85	15,46
6-trubkový PČ	56,02	56,02	8,42
8-trubkový PČ	39,83	39,84	5,67

Cílem sekce 3.1 a 3.2 bylo vytvoření hydraulického modelu, který je použitelný pro model reaktoru VR-1. Nejzásadnějším krokem popsaným v těchto kapitolách je sjednocení průtočných kanálů, které by mělo zajistit vhodnou strukturu pro následující výpočty. Iterací hydraulického průměru bylo dosaženo identického průtoku a je možné považovat zjednodušený hydraulický model za dostatečný.

3.3 Termohydraulický model PČ IRT-4M

V předchozí sekci byl prezentován model PČ, ve kterém docházelo k nucenému proudění určeného rozdílem v tlaku na okrajích rozhraní. Tyto okrajové podmínky byly zajištěny párem TDV. Problém je, že školní reaktor VR-1 je charakteristický odvodem tepla za pomocí přirozeného proudění a je nutné vytvořit model, který tuto skutečnost bude respektovat a co nejlépe popisovat. Z [9] vyplývá, že kromě vhodně zvolených komponent je třeba také zvolit sledované fyzikální veličiny pro co nejvíce přesnou interpretaci a srovnání výsledků.

Při srovnání Obr. 3.4 a 3.8 lze vidět, že pár TDV byl zaměněn za smyčku složenou z trubek a spojovacích komponent, která představuje obtok okolo PČ. Výška vertikálního kruhové trubky obtoku byla nastavena na 3,555 m a její průměr na 2,3 m, což zhruba odpovídá geometrii reaktorové nádoby. Dále byl ke komponentě 53 připojen TDV simulující otevřenou vodní hladinu při atmosférickém tlaku ($p = 101,325 \text{ kPa}$, $T = 293 \text{ K}$). V případě komplexního, resp. zjednodušeného modelu byla pro samotný PČ převzata již vytvořená geometrie viz 3.4, resp. 3.6, přičemž konstrukce obtoku zůstává pro obě dvě varianty modelu stejná.

Hlavním problémem při zadávání zdrojů tepla bylo vystihnutí správné geometrie. Jelikož průřez trubkou PČ IRT-4M odpovídá čtverci s kulatými rohy (viz Obr. 3.1) a geometrie zdrojů tepla (HS) v RELAP5 je značně omezená, musely být jednotlivé trubky napodobeny válcovou geometrií s vnějším a vnitřním průměrem. Tyto parametry byly získány z podmínek na identický objem, teplosměnnou plochu a tloušťku trubek viz [9]. Rozměry jednotlivých HS komponent jsou uvedeny v tabulce 3.5. Při přechodu z komplexního na zjednodušený model je třeba ověřit zachování fyzikálních veličin [9]:

- velikost průtoku skrze PČ vlivem přirozené konvekce,
- výstupních teplot,
- výskyt varu.

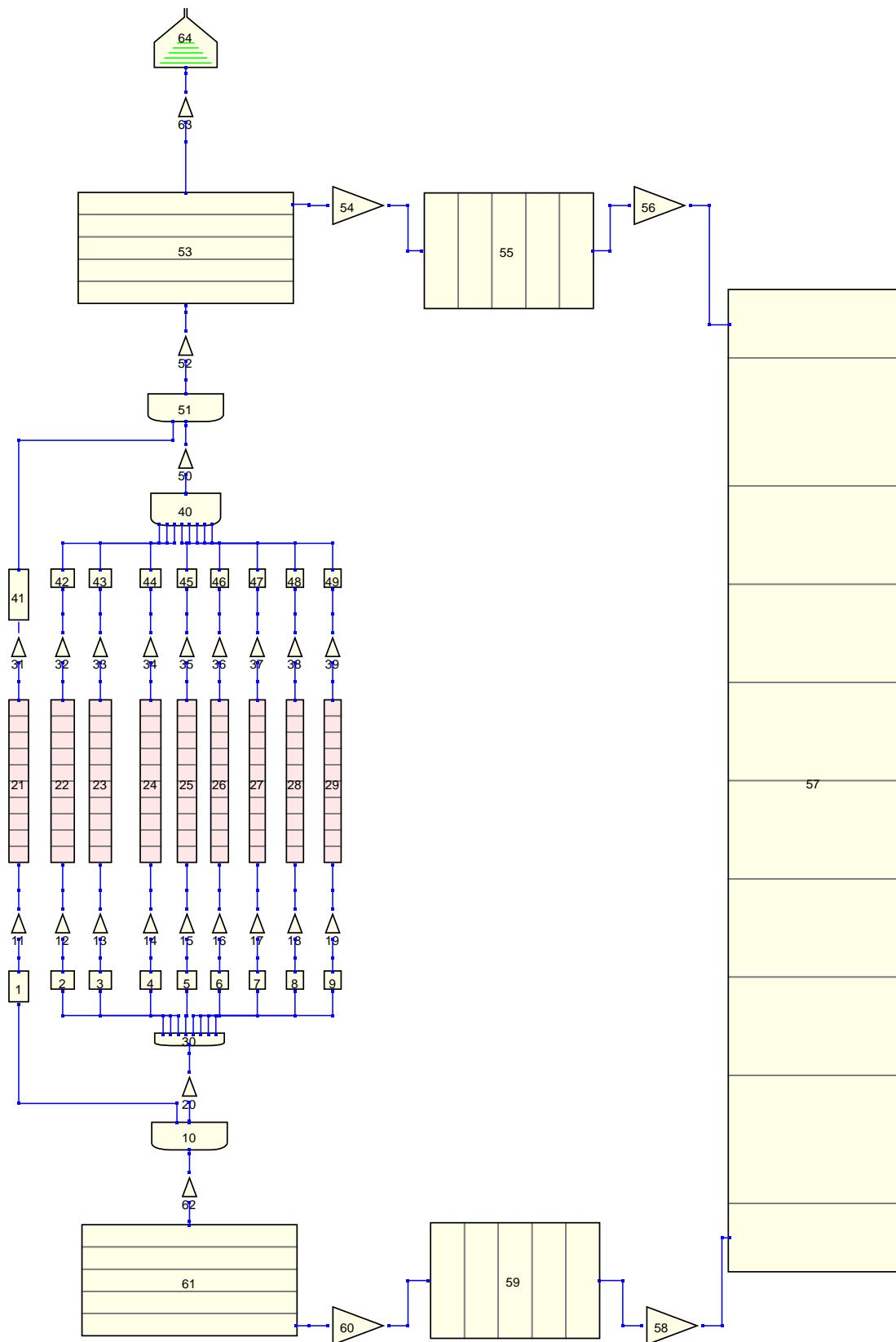
Pro ohřev vody v PČ můžeme předpokládat následující zjednodušený vztah:

$$\Delta T_{cool} = \frac{Q}{\rho G c_p} = \frac{Q}{\rho w A c_p}, \quad (3.2)$$

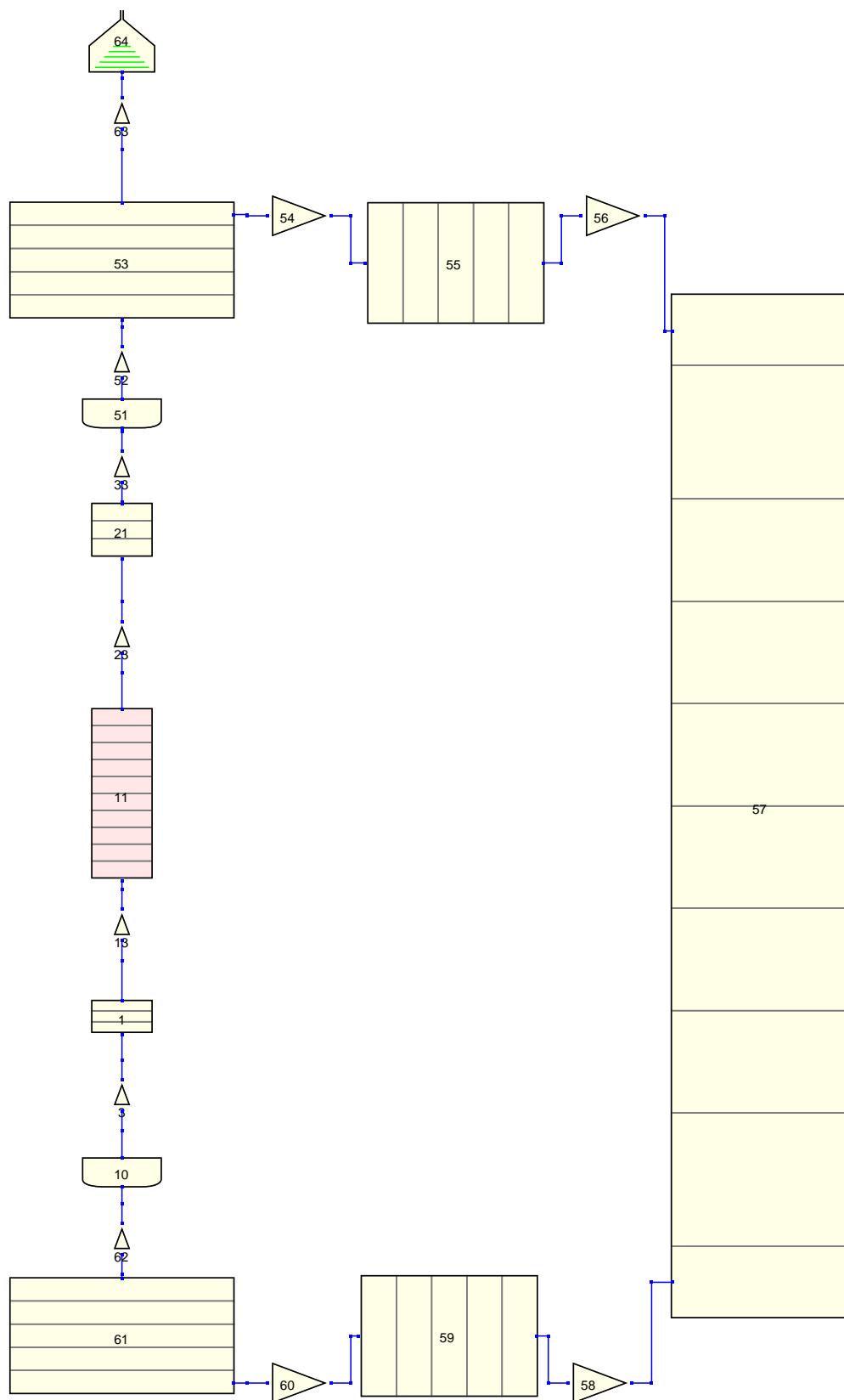
kde Q (W) je tepelný výkon, ρ (kg/m^3) je hustota, c_p ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$) měrná tepelná kapacita a A (m^2) je průtočná plocha. Pro termohydraulický model bude uvažováno rovnoměrné rozložení výkonu a rozložení výkonu vycházející z programu Serpent2. Jelikož je celkový výkon pro obě rozdělení totožný, je očekávatelné, že i celkový průtok bude velice podobný. Největší rozdíly se dají očekávat v rozdělení teplot a tudíž i možném výskytu varu.

Tabulka 3.5: Rozměry ekvivalentních HS pro PČ IRT-4M a jejich napojení na jednotlivé trubky (viz Obr. 3.8 a 3.9).

HS	Komplexní model			Zjednodušený model		
	r_i (mm)	r_o (mm)	V_i	V_o	V_i	V_o
1	40,17	41,77	22	21	11	11
2	35,99	37,59	23	22	11	11
3	31,82	33,42	24	23	11	11
4	27,65	29,25	25	24	11	11
5	23,47	25,07	26	25	11	11
6	19,30	20,90	27	26	11	11
7	15,12	16,72	28	27	11	11
8	9,05	10,65	29	28	11	11



Obrázek 3.8: Termohydraulický komplexní model 8-trubkového PČ IRT-4M bez vytěsnitele (Pro lepší vizualizaci byly měřítka komponent 53 až 62 změněna).



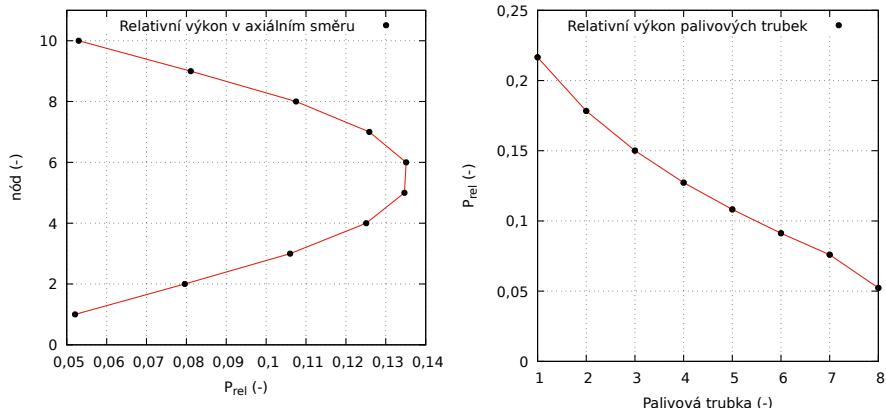
Obrázek 3.9: Termohydraulický zjednodušený model 8-trubkového PČ IRT-4M bez vytěsnitele (Pro lepší vizualizaci byly měřítka komponent 53-62 změněna).

Pro vytvoření zdroje tepla v PČ byla uvažována dvě rozložení výkonu, a to rovnoměrné rozdělení a distribuce výkonu dle výpočetního programu Serpent2. V obou případech byl studován

průtok, ohřev a výskyt povrchového bublinkového varu při přechodu z komplexního na zjednodušený model. Celkový výkon byl nastaven na $1,5 \cdot 10^5$ W, přičemž pro rovnoměrné rozdělení se předpokládal zlomek výkonu v každém nódu 0.0125 (8 trubek, v každé 10 nódů), tedy každý nód produkuje 1875 W. Rozložení výkonu z programu Serpent2 je uvedeno v tab. 3.6 a na Obr. 3.10.

Tabulka 3.6: Rozložení výkonu v 8-trubkovém PČ IRT-4M dle programu Serpent.

Nód (-)	$P_{\text{rel}}^{\text{ax}} (-)$	Palivová trubka	$P_{\text{rel}}^{\text{trubka}} (-)$
10	0,053	1	0,22
9	0,081	2	0,18
8	0,108	3	0,15
7	0,126	4	0,13
6	0,135	5	0,11
5	0,135	6	0,09
4	0,125	7	0,08
3	0,106	8	0,05
2	0,080		
1	0,052		



Obrázek 3.10: Axiální a radiální rozložení výkonu v 8-trubkovém PČ IRT-4M - Serpent2.

Axiální nodalizace palivových trubek v programu Serpent byla uvažována ve shodě s nodalizací trubek 21-29 viz Obr. 3.8, resp. trubky 11 viz Obr. 3.9.

3.4 Sjednocení průtočných kanálů

Cílem následujícího textu je popsat problematiku sjednocení průtočných kanálů, porovnat výsledky komplexního a zjednodušeného modelu (viz Obr. 3.8 a 3.9) pro dvě různé rozdělení výkonu a ověřit správnost zjednodušeného modelu. Sledovanými veličinami jsou celkový průtok skrz PČ (viz sekce 3.4.1), ohřev vody na výstupu z jednotlivých kanálů (viz sekce 3.4.2) a možný výskyt povrchového bublinkového varu (viz sekce 3.4.3).

3.4.1 Celkový průtok skrz PČ

Jak bylo výše odhadováno, tak při konjukci kanálů nedochází k zásadní změně v celkovém průtoku viz tab. 3.7. Vliv rozložení výkonu na průtok je možné považovat za bezvýznamný.

Tabulka 3.7: Celkový průtok skrz PČ pro komplexní a zjednodušený model při rovnoměrném rozdelení výkonu a rozdelením dle programu Serpent2.

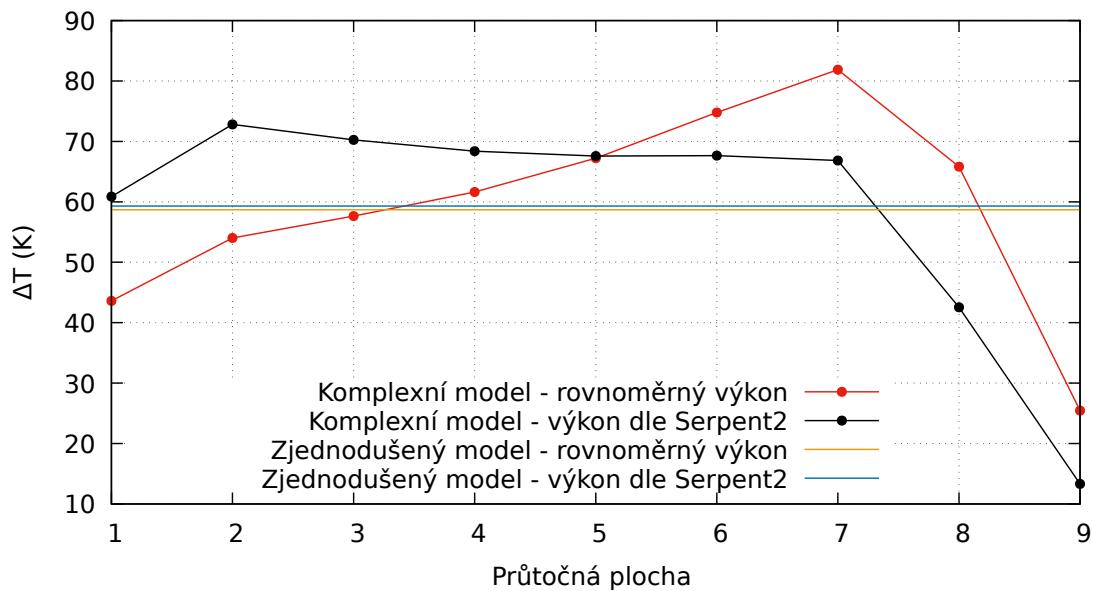
Rozložení výkonu & Model	G (m ³ /h)
Rovnoměrný výkon - komplexní model	2,246
Serpent2 - komplexní model	2,247
Rovnoměrný výkon - zjednodušený model	2,262
Serpent2 - zjednodušený model	2,261

Z hlediska zachování celkového průtoku nevykazuje sjednocení kanálů výrazné rozdíly.

3.4.2 Ohřev chladiva na výstupu z jednotlivých kanálů (trubek) PČ

Z Obr. 3.11 a tab. 3.8 je vidět, že ohřev chladiva při rozdelení dle programu Serpent je značně rovnoměrnější, což jistě ovlivní i možný výskyt povrchového varu. Na Obr. 3.11 je pro porovnání s komplexním modelem uveden ohřev na výstupu ze zjednodušeného modelu (jeden kanál). Maximální kanál v případě rovnoměrného rozdelení odpovídá trubce 27 (průtočná plocha 7 viz obr. 3.1), což je stejný výsledek jako v [9]. V případě rozdelení dle programu Serpent je maximální ohřev v trubce 22 (průtočná plocha 2 viz obr. 3.1). Celkově ovšem výsledky korespondují s [9].

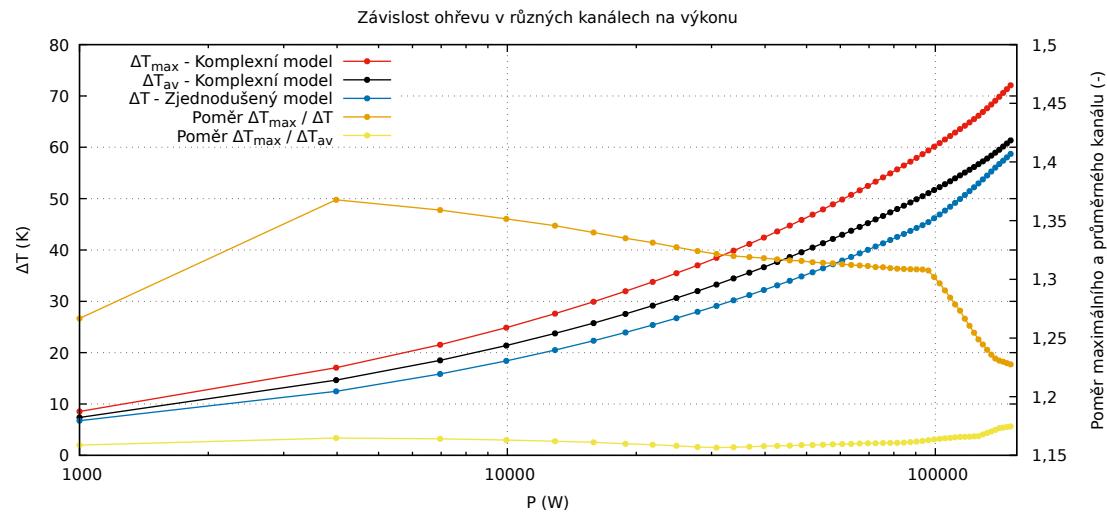
Z tab. 3.8 a Obr. 3.12 a 3.13 lze soudit, že nejtíživějším problémem při sjednocení trubek do zjednodušeného kanálu je právě ztráta informace o maximální teplotě ohřevu. Proti této ztrátě hráje fakt, že podíl rozdílu teplot v maximálním kanálu a zjednodušeném modelu zůstává pro naprostou většinu výkonů velice stálý. V obou případech rozložení výkonu se tento faktor pohybuje okolo hodnoty 1,13. Vliv zjednodušení je více komentován v sekci 3.4.4.



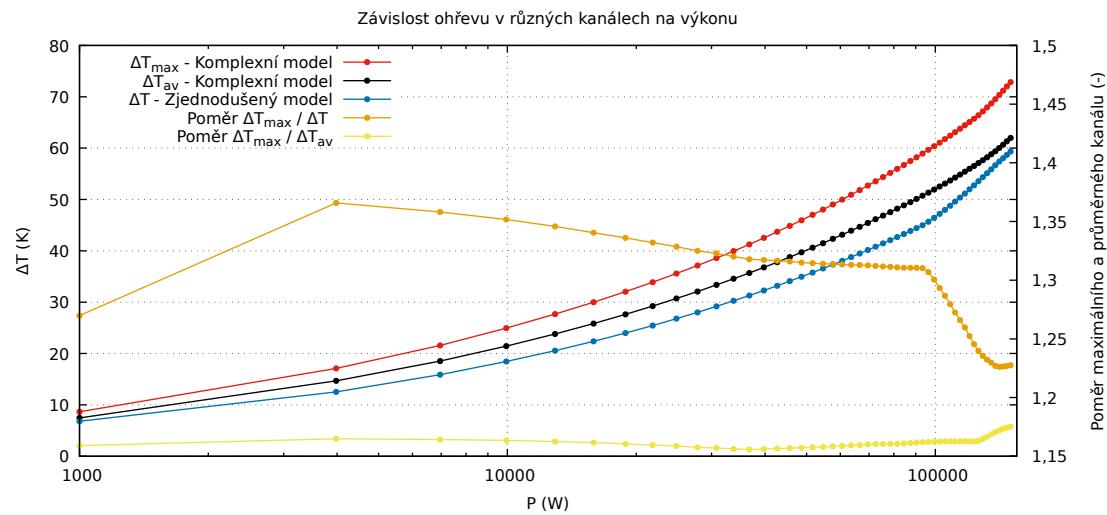
Obrázek 3.11: Ohřev na výstupu z jednotlivých kanálů pro jednotlivé modely.

Tabulka 3.8: Ohřev chladiva na výstupu z PČ pro jednotlivé kanály (RV - rovnoměrný výkon, S - výkon dle Serpent2, KM & JM - komplexní a zjednodušený model).

ΔT_{out} (K)	Trubka								
	21	22	23	24	25	26	27	28	29
RV - KM	43,6	54,0	57,7	61,6	67,2	74,8	81,9	65,8	25,5
S - KM	60,9	72,8	70,3	68,4	67,6	67,6	66,9	42,6	13,3
RV - JM	58,7								
S - JM	59,3								



Obrázek 3.12: Závislost ohřevu pro komplexní a zjednodušený model - rovnoměrný výkon (poměr teplot je poměr rozdílu teploty na výstupu z kanálu zjednodušeného modelu a komplexního modelu).



Obrázek 3.13: Závislost ohřevu pro komplexní a zjednodušený model - výkon dle Serpent2 (poměr teplot je poměr rozdílu teploty na výstupu z kanálu zjednodušeného modelu a komplexního modelu).

3.4.3 Výskyt povrchového varu

Možný výskyt varu v této sekci představuje stav, kdy teplota HS je vyšší než teplota sytosti kapaliny. Výkon jedné HS představující trubku PČ je $1,875 \cdot 10^4$ W, tedy celkový výkon PČ je

$1,5 \cdot 10^5$ W. Jak již bylo avizováno, tak při rozdělení výkonu dle programu Serpent je rozdělení teplot daleko rovnoměrnější, cž vede i k rovnoměrnějšímu výskytu možného povrchového bublinkového varu. Zároveň lze ale pozorovat, že konstrukce trubek nemá na možný výskyt povrchového varu vliv.

Nód (-)	HS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
10	■							
9		■						
8			■					
7				■				
6					■			
5						■		
4							■	
3								■
2								■
1								■

Obrázek 3.14: Komplexní model

Nód (-)	HS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
10		■						
9		■						
8			■					
7				■				
6					■			
5						■		
4							■	
3								■
2								■
1								■

Obrázek 3.15: Zjednodušený model

Obrázek 3.16: Možný výskyt povrchového bublinkového varu - rovnoměrné rozdělení výkonu (červené nody označují možný výskyt varu, modré přirozenou konvekci bez změny fáze).

Nód (-)	HS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
10		■						
9							■	
8								■
7								■
6								■
5								■
4								■
3	■	■	■	■	■	■	■	■
2	■	■	■	■	■	■	■	■
1	■	■	■	■	■	■	■	■

Obrázek 3.17: Komplexní model

Nód (-)	HS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
10		■						
9								■
8								■
7								■
6								■
5								■
4								■
3	■	■	■	■	■	■	■	■
2	■	■	■	■	■	■	■	■
1	■	■	■	■	■	■	■	■

Obrázek 3.18: Zjednodušený model

Obrázek 3.19: Možný výskyt povrchového bublinkového varu - rozdělení výkonu dle Serpent2 (červené nody označují možný výskyt varu, modré přirozenou konvekci bez změny fáze).

3.4.4 Zhodnocení sjednocení průtočných kanálů

Sjednocení průtočných kanálů nenaznačují žádný velký problém pro další použití. Největším problémem je právě ztráta informace o maximálním ohřevu, což může být do jisté kompenzováno již zmiňovaným „faktorem ohřevu“. Ukazuje se, že tento faktor zůstává konstantní pro široké rozmezí výkonů a je možné tedy provést odhad maximální teploty na výstupu z PČ. Dále se ukazuje, že

rozložení výkonu způsobuje rovnoměrnější ohřev a možný výskyt povrchového bublinkového varu. Sjednocení na možný povrchový var nemá velký vliv. Největším problémem pro bezpečnostní analýzy by v tomto případě byla situace, kdy by v maximálním kanálu docházelo k objemovému varu. Vznik objemového varu ovšem není součástí základních projektových podmínek ani rozšířených projektových podmínek [9, 16].

3.5 Sjednocení topných komponent

Pro analýzu přirozeného proudění skrz PČ IRT-4M dává smysl využít počet HS odpovídající počtu palivových trubek, tedy 8 topných jednotek. Pro analýzu celé aktivní zóny reaktoru VR-1 by bylo třeba vložit okolo 8×16 HS, což by mohlo být problematické. Proto dává smysl vytvořit zjednodušený model se sjednocenými topnými komponentami. Při přechodu na jednu zjednodušenou HS je třeba zachovat stejnou teplosměnnou plochu a hydraulický průměr. V tab. 3.9 geometrie této HS uvedena. Vnější průměr sjednocené HS v tomto případě převyšuje vnější rozměr palivové trubky 1 viz tab. B.1, což je konstruktem požadavku na zachování teplosměnné plochy a hydraulického průměru. Tato HS chováním reprezentuje komplexní sadu 8 HS a je dále využitá jakožto zdroj tepla pro PČ v termohydraulickém modelu VR-1. Zjednodušený model PČ s sjednocenou HS bude dále označován jako „jednotkový model“. Rozdíl zjednodušeného a jednotkového modelu je pouze v HS, geometrie trubek a obtoku zůstává stejná. Axiální rozložení výkonu odpovídá tab. 3.6 uvedené v předchozí sekci.

Tabulka 3.9: Geometrie sjednocené HS.

r_o (mm)	210,11
r_i (mm)	207,82
h (mm)	588

3.5.1 Výpočet a zhodnocení sjednocení HS

Analogicky k předchozí části jsou v tab. 3.10 uvedeny parametry pro zjednodušený model (1 průtočná trubka a 8 HS) a jednotkový model (1 průtočná trubka a 1 sjednocená HS). Namísto možného výskytu povrchového varu je v tabulce uvedena maximální teplota HS.

Tabulka 3.10: Celkový průtok, ohřev a maximální teplota HS pro zjednodušený a jednotkový model.

TH model	zjednodušený (serpent)	jednotkový	rel. odch. (%)
G (m^3/h)	2,261	2,258	0,11
ΔT (K)	59,31	59,38	0,12
$T_{\text{HS},\text{max}}$ (K)	384,85	383,54	0,34

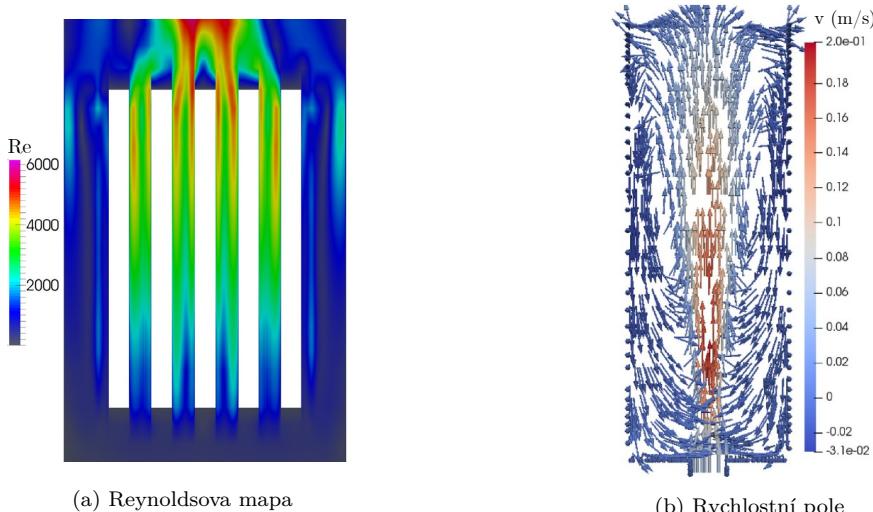
Změna v průtoku chladiva skrz PČ a změna ohřevu je zanedbatelná, maximální teplota HS se liší o méně než 0,5 %. Z uvedených výsledků vyplývá, že je možné považovat jednotkový model za způsobilý dalším výpočtům. Oproti zjednodušenému modelu je výhodou redukovaný počet HS, který by při složitějších výpočtech AZ mohl být komplikovaný.

Kapitola 4

Termohydraulický model reaktoru VR-1

Studium přirozené konvekce na školním reaktoru VR-1 je klíčové pro zajištění bezpečného provozu tohoto zařízení. Při studiu nucené konvekce je průtok sledovaným objemem určen jako vstupní parametr, resp. jako okrajová podmínka. Pro přirozenou konvekci není průtok vstupním parametrem, ale je odvozen z teplotního gradientu a je dáno modelem samotného reaktoru. U výzkumných reaktorů bazénového typu (např. VR-1, TRIGA Mark II) musí být model reaktoru rozšířen o reaktorovou nádobu, aby bylo možné odhadnout celkový průtok skrze zónu [12]. Cílem této kapitoly je popis termohydraulického modelu školního reaktoru VR-1 a studium vlivu nodalizace obtoku na přirozené proudění.

Na obr. 4.1a je pomocí CFD kódu uvedena Reynoldsova mapa, resp. rychlostní pole v případě přirozeného proudění skrze AZ reaktoru TRIGA Mark II (geometrie reaktoru TRIGA je zobrazena v příloze na obr. C.2). Reaktor TRIGA Mark II a školní reaktor VR-1 mají obdobnou konstrukci a oba jsou bazénového typu (viz obrázek C.1 v příloze). Z obrázků 4.1a a 4.1b vyplývá, že nejvíce turbulentní proudění nastává v prostoru nad aktivní zónou, tedy i v horní části vertikálního obtoku skrz reaktorovou nádobu. Obrázek 4.1b naznačuje, že změna teplotního gradientu nad aktivní zónou vede k vzniku inverze proudění a tvorbě smyček. Z tohoto důvodu se tato kapitola soustředí především na studium této oblasti (viz obrázek 4.2). Dále je oblast volného objemu nad aktivní zónou označena jako "horizontální obtok" a komponenta 44 jako "vertikální obtok".



Obrázek 4.1: CFD výpočet přirozeného proudění skrze reaktor TRIGA MARK II [12].

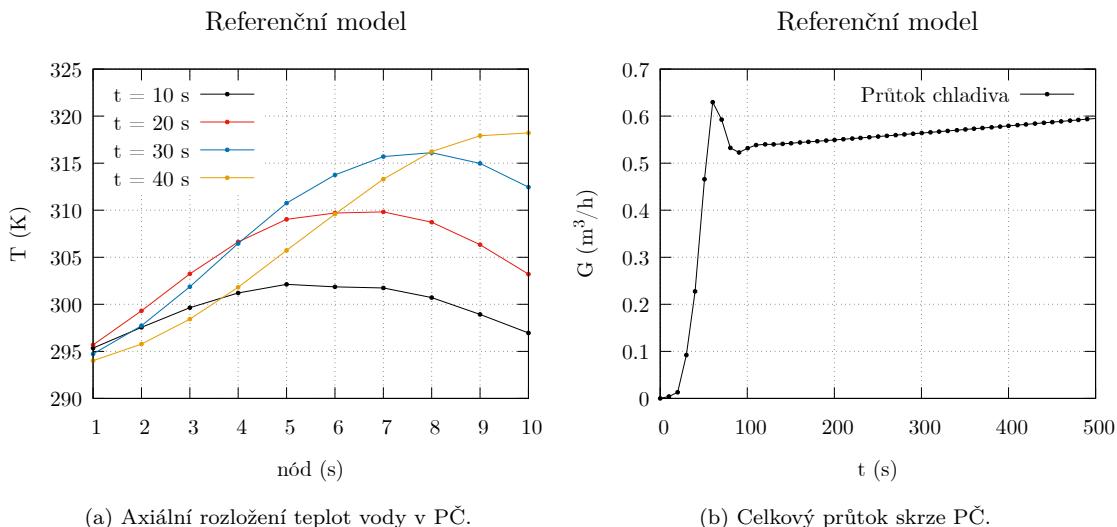
4.1 Referenční model

V této práci [9] byl při tvorbě modelu školního reaktoru VR-1 opuštěn koncept dvoukanálového uspořádání, který využíval "průměrný" a "maximální" kanál pro reprezentaci aktivní zóny reaktoru. Místo toho byla aktivní zóna sestavena z 16 palivových článků (PČ), z nichž každý byl reprezentován jednotkovým modelem (viz sekce 3.5). Kvůli omezenému počtu připojitelných komponent k jednotce BRANCH (komponenta 100 a 102) byla aktivní zóna reprezentována dvěma skupinami po osmi PČ, které byly propojeny spojovací jednotkou. Všechny jednotkové modely vychází z modelu 8-trubkového PČ bez vytěsnitele, přičemž axiální rozložení výkonu jednotlivých PČ odpovídá tabulce 3.6. Geometrie trubek horizontálního a vertikálního obtoku je stejná jako v modelu, který je popsán na obrázcích 3.8 a 3.9. Zapojení komponent 40-48 vychází z práce [9]. Model na obrázku 4.2 je označen jako "referenční", resp. jako model NOD00. Nodalizace reaktoru bude podrobněji rozebrána v následujících kapitolách.

V případě referenčního modelu je horizontální obtok napojen až v posledním nódu trubky 40. Voda je vytlačena z AZ až na úroveň hladiny, kde se odpojuje do horizontálního obtoku. V tomto uspořádání je teplotní gradient mezi výstupem z AZ reaktoru a TDV 50 představující volnou hladinu největší (tlak $1,5 \cdot 10^5$ Pa Pa a teplota vody 297 K). Nikde v trubce 40 nedochází k ochlazení bočním vtokem. U referenčního modelu je proto očekáván nejvyšší průtok.

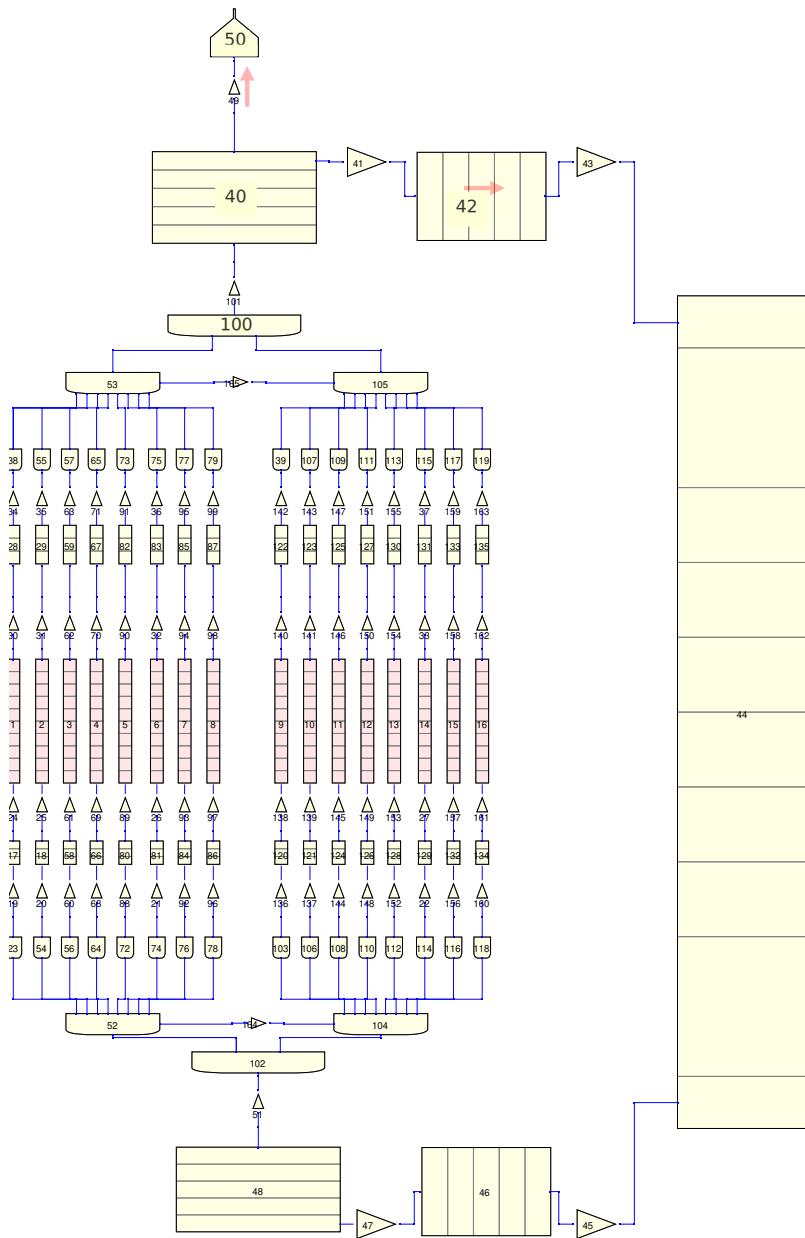
Výkon školního reaktoru VR-1 je pro studium přirozeného proudění příliš nízký ($1 \cdot 10^2$ W, nárazově $5 \cdot 10^2$ W). Proto je v následujícím textu uvažován výkon jednoho PČ $1 \cdot 10^4$ W (celkový výkon AZ $1,6 \cdot 10^5$ W), při kterém je studium přirozené konvekce názornější. Stále se jedná o jednofázové proudění podchlazené kapaliny. Průběh výkonu jednotkového modelu PČ je uveden v příloze v Tab. B.2 (více o jednotkovém modelu v sekci 3.5). Aktivní zóna je tvořena 16 PČ, každý článek má výkon $1,0 \cdot 10^5$ W. Celkový výkon reaktoru dosahuje v čase 20 s $1,6 \cdot 10^5$ W. Na obr. 4.3a je uvedeno rozdělení teplot chladiva v PČ v čase 10 s, 20 s, 30 s a 40 s po dosažení výkonu $1,0 \cdot 10^5$ W. Celkový průtok PČ je uveden na obr. 4.3b.

4.1.1 Výsledky



Obrázek 4.3: Popis přirozeného proudění skrze palivový článek pro referenční model.

Na obr. 4.3a a 4.3b lze pozorovat vznik přirozeného proudění chladiva v palivovém článu (PČ) v závislosti na čase a výkonu. Po dosažení výkonu 10^4 W v čase 10 s je rozložení teplot symetrické, což odpovídá symetrii výkonu po axiální ose. V dalších časových krocích se teplotní maximum posouvá

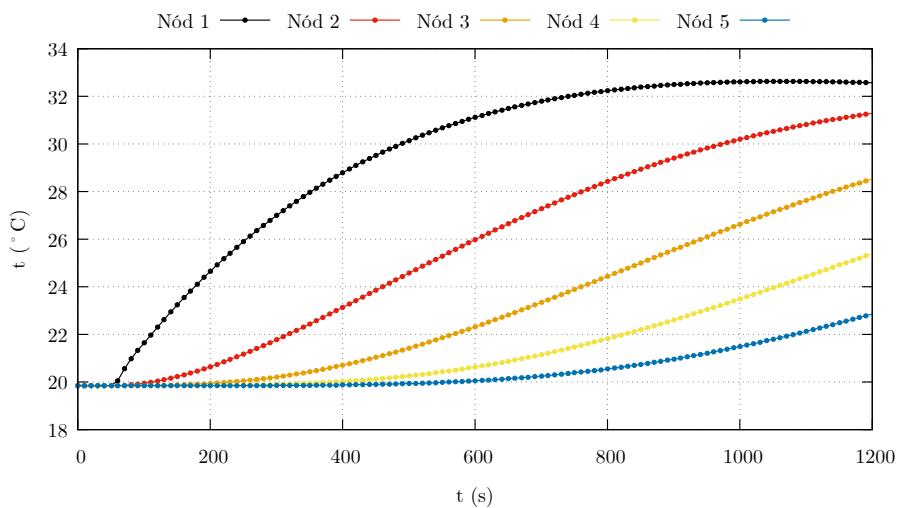


Obrázek 4.2: Termohydraulický model reaktoru VR-1.

zhruba o 1 nód za 10 s v důsledku vzniku přirozené konvekce. Proudění ohřívaného objemu vede ke snížení teploty v dolní části palivového článku vlivem promíchávání se vstupujícím chladivem.

Na stejném obrázku je také vykreslen časový průběh průtoku chladiva skrze PČ. Vliv časového zpoždění je zde také pozorovatelný. V čase 0-60 s dochází k nárůstu průtoku v důsledku ohřevu chladiva v AZ reaktoru. Vyšší průtok v tomto případě způsobuje lepší přestup tepla a tedy i nižší teplotní gradient mezi AZ a vstupem do horizontálního obtoku, což vede ke snížení průtoku až do času 90 s. Následně se průtok ustálí okolo 100 s a hodnota průtoku lineárně roste. Důvodem je absence teplotních ztrát v modelu.

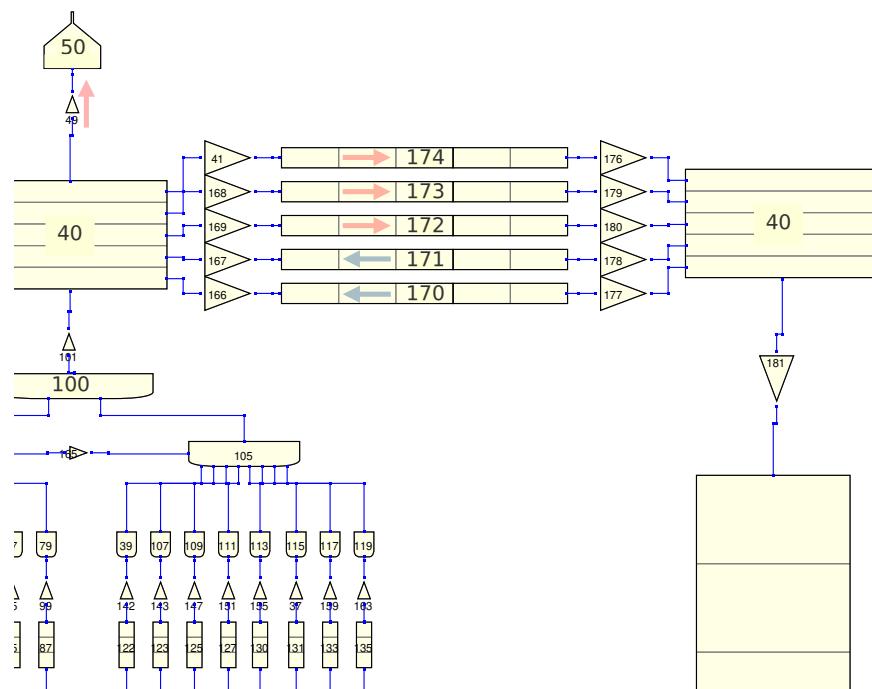
Na obrázku 4.4 jsou zobrazeny teploty v trubce 40 pro jednotlivé nody. Teplota v nódě 1 se po 800 s ustálí, přičemž dochází k postupnému ohřevu výše položených nódů. Jelikož model neuvažuje tepelné ztráty, tak není jisté jak by vypadalo rozložení teplot době delší než 1200 s. Fyzikální význam by byl diskutabilní. Podrobnější rozložení teplot je popsáno v příloze na obrázcích C.8a až C.10b.



Obrázek 4.4: Časový vývoj teplot v jednotlivých nodech trubky 40.

4.2 Model NOD01

V referenčním modelu reaktoru VR-1 v programu RELAP5 je při simulaci přirozeného proudění předpokládána absence recirkulace ve volném objemu nad AZ, neboť je v tomto případě ohřátá voda nucena proudit až na úroveň vodní hladiny, kde se dochází k vstupu do horizontálního obtoku z posledního nódů trubky 40. Ve skutečnosti však může při přirozeném proudění docházet k odpojení vody v libovolné výšce objemu vytyčeného nad aktivní zónou. Z tohoto důvodu je trubka 42 nahrazena pěti horizontálními trubkami (trubka 170-174) viz obr. 4.5, přičemž celkový objem těchto trubek je zachován. Kompletní model je prezentován na obr. C.4 v příloze.



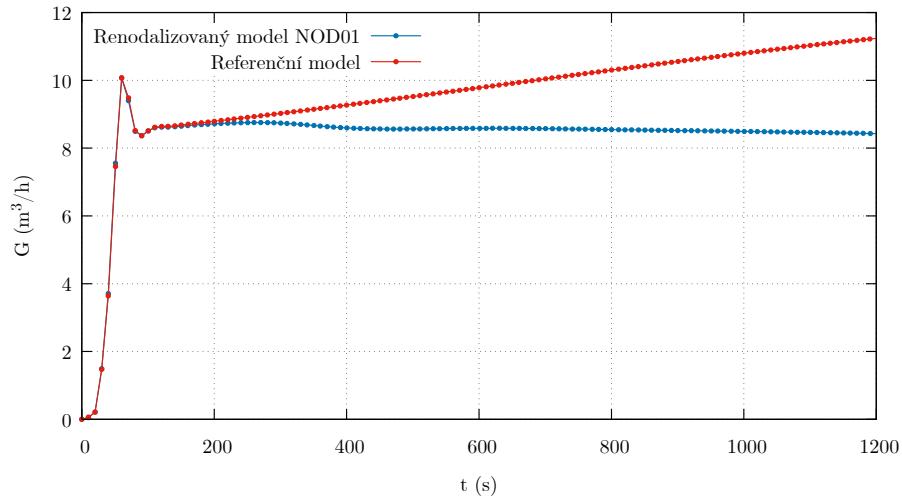
Obrázek 4.5: Nodalizace horizontálního obtoku - model NOD01

4.2.1 Výsledky

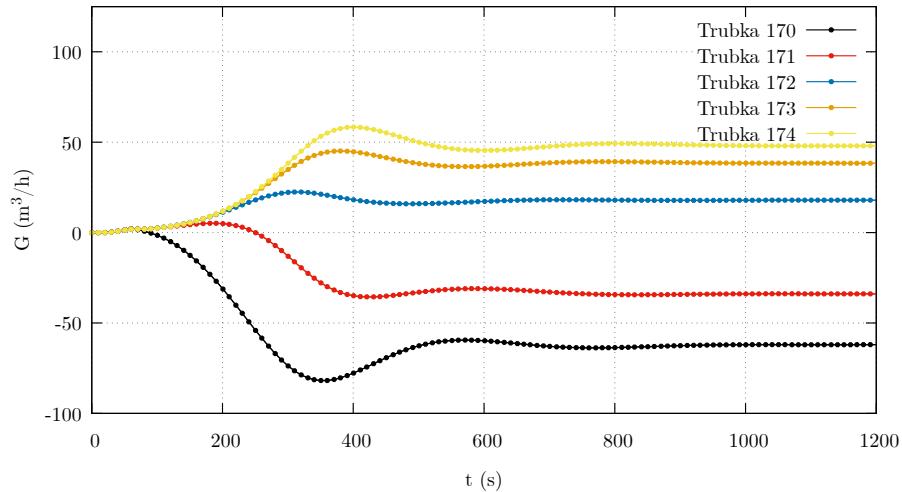
Z předchozího textu vyplývá, že hlavními sledovanými parametry pro srovnání referenčního a renodalizovaného modelu jsou celkový průtok skrze aktivní zónu, průtok skrze jednotlivé trubky horizontálního obtoku a rozložení teplot chladiva v trubce 40.

Renodalizovaný model NOD01 prokazuje identické chování jako referenční model v intervalu 0-200 s. Po ustálení průtoku je hodnota G(t) pro model NOD01 v čase konstantní, zatímco v referenčním modelu roste s konstantní rychlostí. Při pozorování horizontálního obtoku se ukazuje, že na rozdíl od referenčního modelu dochází k inverzi proudění v trubkách 170 a 171. Ohrádě chladivo teče vzhůru a v horizontálním kladném směru proudí trubkou 172, 173 a 174 do trubky 175, kde dochází k promíchávání. Část chladiva se následně vrací trubkou 170 a 171, kde v trubce 40 ochlazuje chladivo vystupující z AZ. Situace je ilustrována na Obr. 4.5.

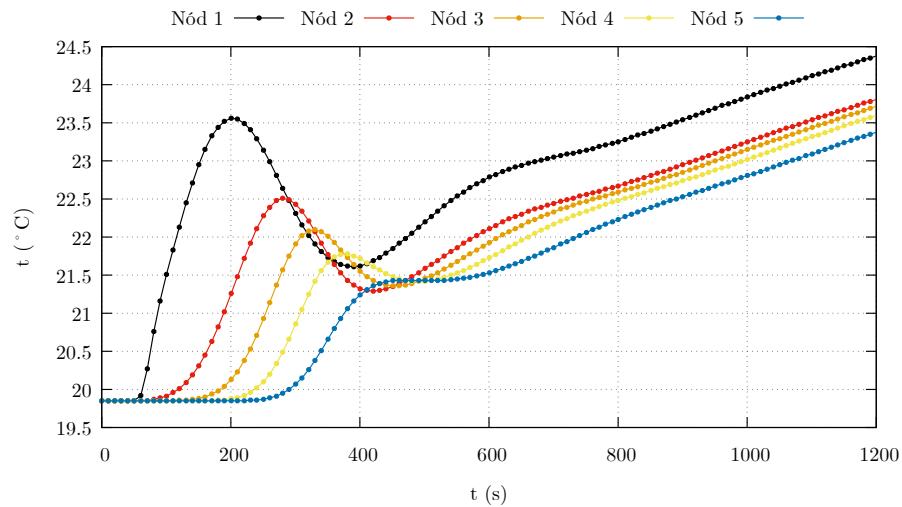
Toto promíchání chladiva s ochlazenou kapalinou vstupující z trubek 170 a 171 má vliv na rozložení teplot v objemu trubky 40 viz příloha obr. C.8a až C.10b. Renodalizovaný model NOD01 tak více odpovídá reálné situaci. Je třeba zmínit, že model NOD01 neobsahuje tepelné ztráty, což má za následek konstantní nárůst teploty. Otázkou zůstává, do jaké míry je možné tento ohřev považovat za reprezentativní.



Obrázek 4.6: Průtok skrze AZ reaktoru VR-1 - referenční a renodalizovaný model NOD01.



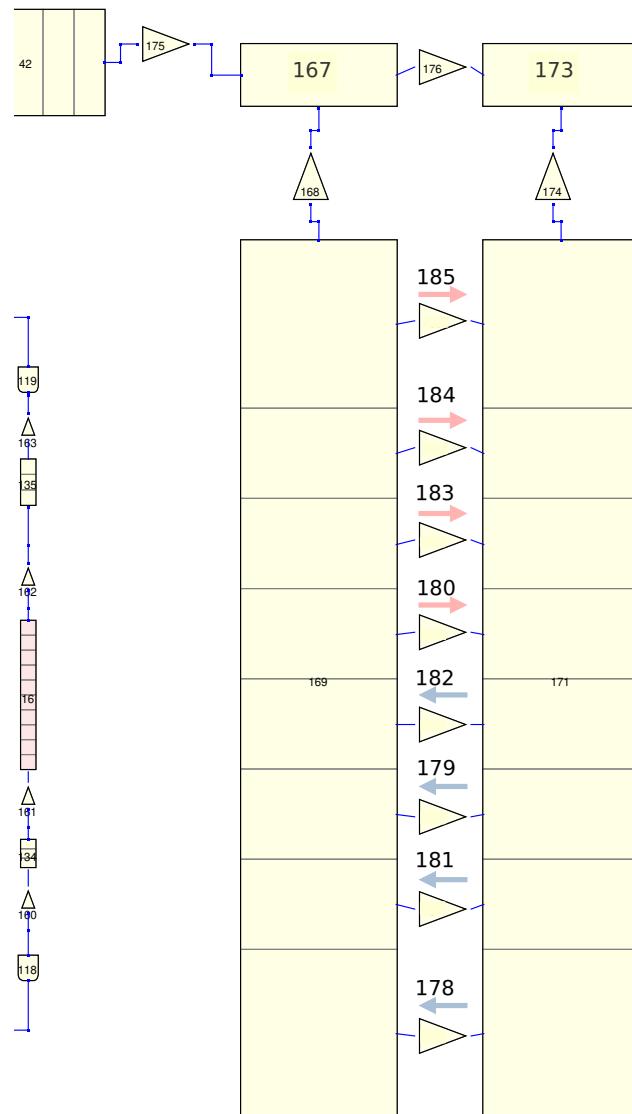
Obrázek 4.7: Průtok skrze trubky 170 - 174 (viz obr. 4.5) - renodalizovaný model NOD01.



Obrázek 4.8: Teplotní vývoj v trubce 40 - model NOD01.

4.3 Model NOD02

Druhý renodalizovaný model s označením NOD02 je konstruován za účelem studia vlivu nodalizace vertikálního obtoku. Konstrukce vertikálního obtoku i s výslednými směry proudění je ilustrována na obrázku 4.9 a kompletní schéma modelu je uvedeno na obr. C.5 v příloze. Vertikální obtok je sestaven symetricky, přičemž celkový objem trubek a kontrolních objemů je zachován. Trubka 44 v referenčním modelu je nahrazena párem propojených trubek s označením 169 a 171, které umožňují vzniku přičného proudění a redistribuci průtoku ve vertikálním směru v obou trubkách.

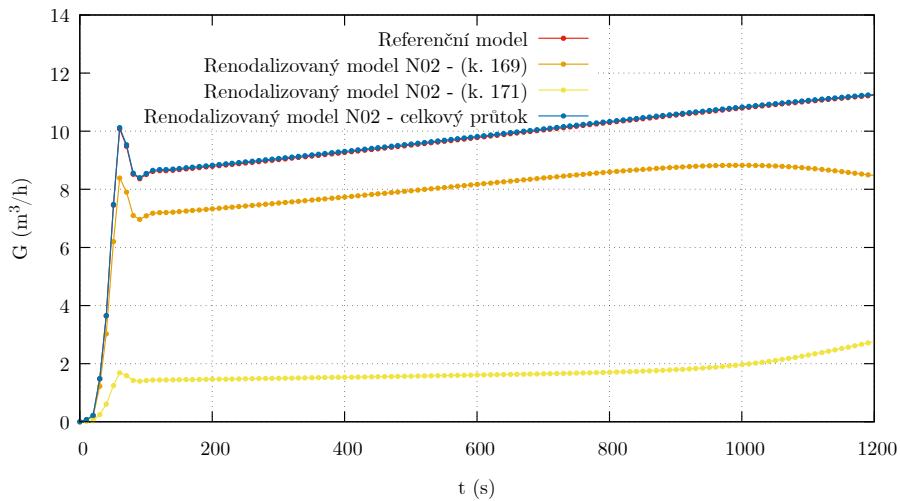


Obrázek 4.9: Nodalizace vertikálního obtoku - model NOD02

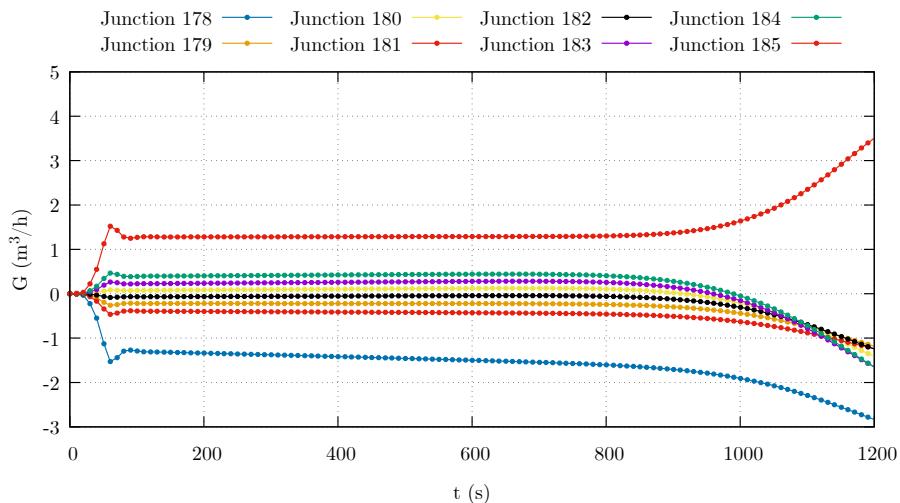
4.3.1 Výsledky

Průtok skrze aktivní zónu reaktoru je v případě modelu NOD02 totožný s referenčním viz obr. 4.10. Teplota v kontrolním objemu 167 je 293 K (teplota okrajové podmínky stanovené TDV 50 viz příloha obr. C.5). Je možné dále očekávat rozdílný průtok v obou směrech skrze SJ 178 až 185, a to z důvodu asymetrickému propojení s horizontálním obtokem. Průtok ve vertikálním obtoku je ilustrován na obrázcích 4.11 a 4.10. Průtok jednotlivými SJ mezi trubkou 169 a 171 se po ustálení drží konstantní hodnoty. V čase okolo $1 \cdot 10^3$ s ovšem dochází k náhlé redistribuci průtoku. Obrázek

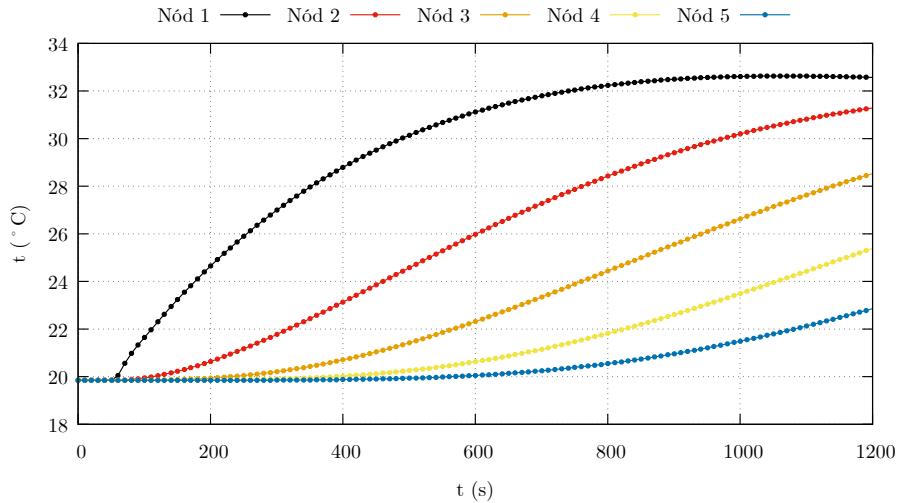
4.11 naznačuje, že změnu v proudění v čase okolo 1000 s by mohlo způsobit ohřáté chladivo proudící z AZ do vrchní části vertikálního obtoku. Ani model NOD02 neobsahuje tepelné ztráty, což může způsobit nestabilní chování.



Obrázek 4.10: Průtok skrze AZ reaktoru VR-1 - referenční a renodalizovaný model NOD02.



Obrázek 4.11: Průtok spojovacími jednotkami (SJ) ve vertikálním obtoku - model NOD02.

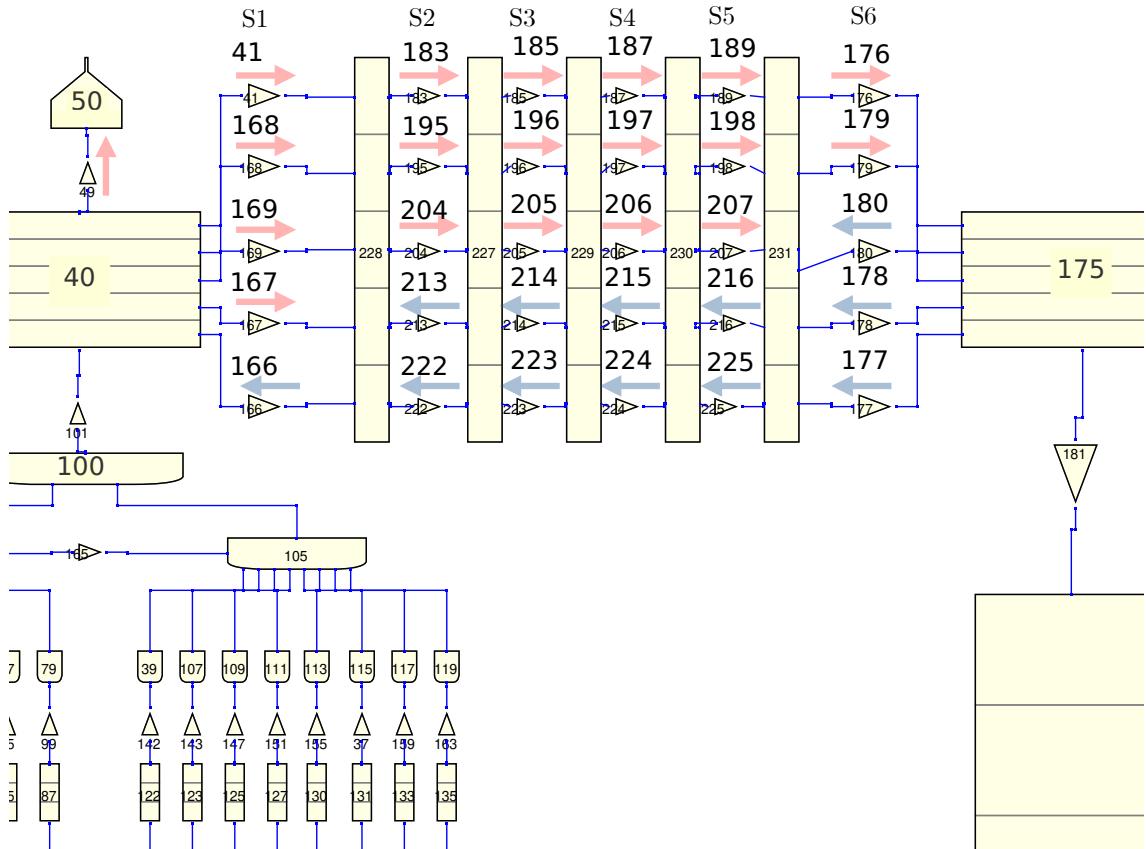


Obrázek 4.12: Teplotní vývoj v trubce 40 - model NOD02.

4.4 Model NOD03

Model reaktoru NOD03 rozvíjí možnost vzniku recirkulace ve volném objemu vody nad aktivní zónou reaktoru. Horizontálně orientované trubky jsou nahrazeny vertikálními, které jsou propojeny pomocí spojovacích jednotek. Díky tomu může voda proudit v každé trubce po celé výšce vodního sloupce nad aktivní zónou reaktoru. Model je uveden v příloze na obr. C.6. Objem horizontálního obtoku (součet všech kontrolních objemů) je zachován. Konstrukce a směry proudění jsou ilustrovány na obr. 4.13. Spoje jsou rozděleny do skupin S1 až S8 pro lepší orientaci.

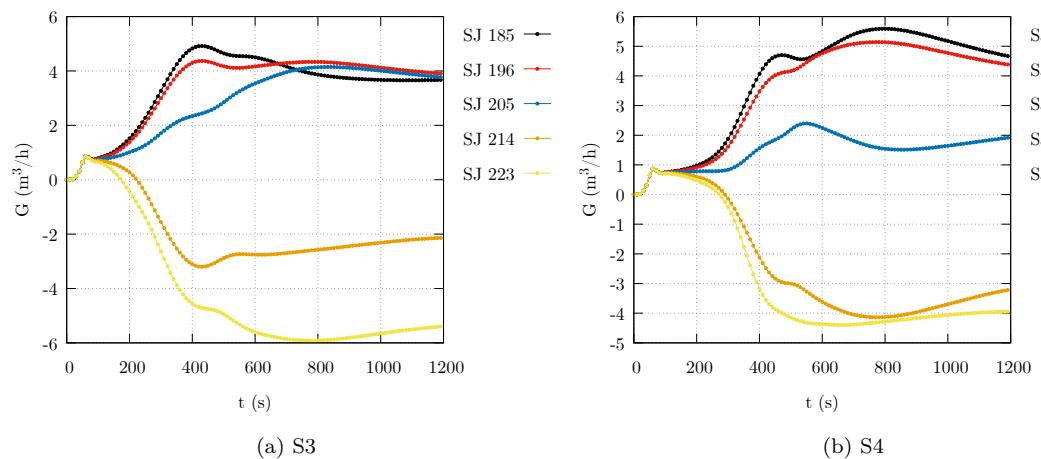
Je otázkou, zda jsou následující výsledky reprezentativní a mají fyzikální význam. Hlavním problémem je stabilita výpočtu, která není zaručena a při takto komplexním proudění může dojít k nesprávným řešením viz následující sekce.



Obrázek 4.13: Nodalizace horizontálního obtoku - model NOD03

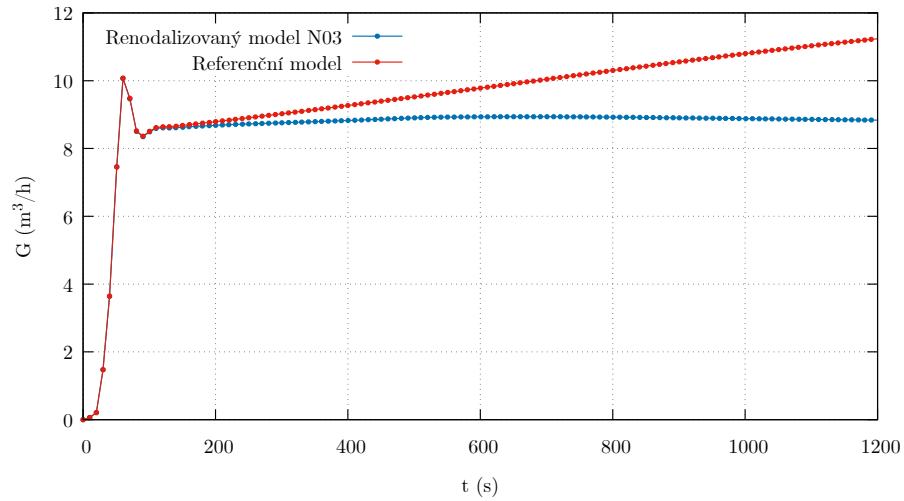
4.4.1 Výsledky

V souladu s předchozími případy je na obrázku 4.15 prezentováno srovnání průtoku skrze AZ s referenčním modelem. V porovnání s modelem NOD01 lze pozorovat podobné chování, přičemž kolem 200 s dochází k ustálení toku na kvazistacionární hodnotu (viz obrázek 4.6). Průtok v jednotlivých skupinách SJ je problematický a chaotický, přičemž k ustálení průtoku nedochází viz obr. 4.14a a 4.14b. Grafy pro všechny skupiny jsou uvedeny v příloze viz obr. C.11a až C.13b.

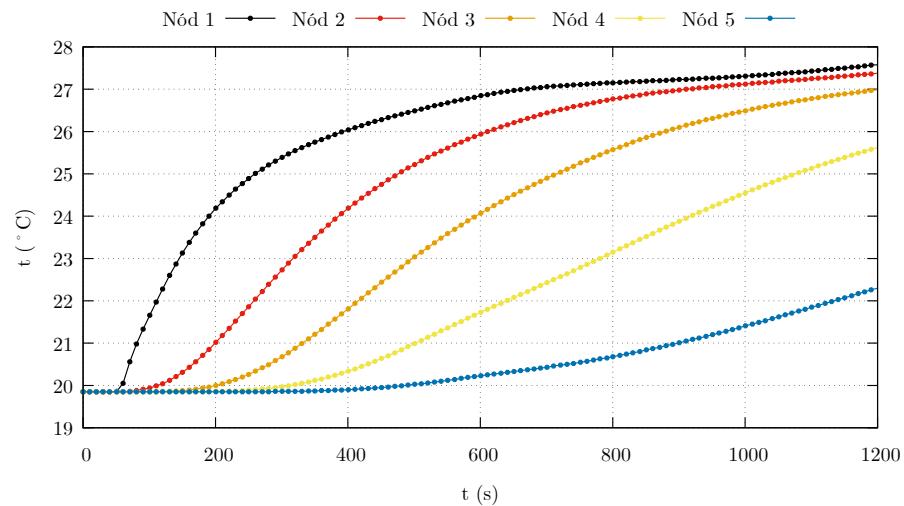


Obrázek 4.14: Průtok skrze jednotlivé SJ (S3 a S4) - model NOD03.

V obrázku 4.16 jsou vykresleny teploty chladiva v jednotlivých nódech trubky 40. Na rozdíl od celkového průtoku je časový vývoj teplot analogický spíše referenčnímu modelu.



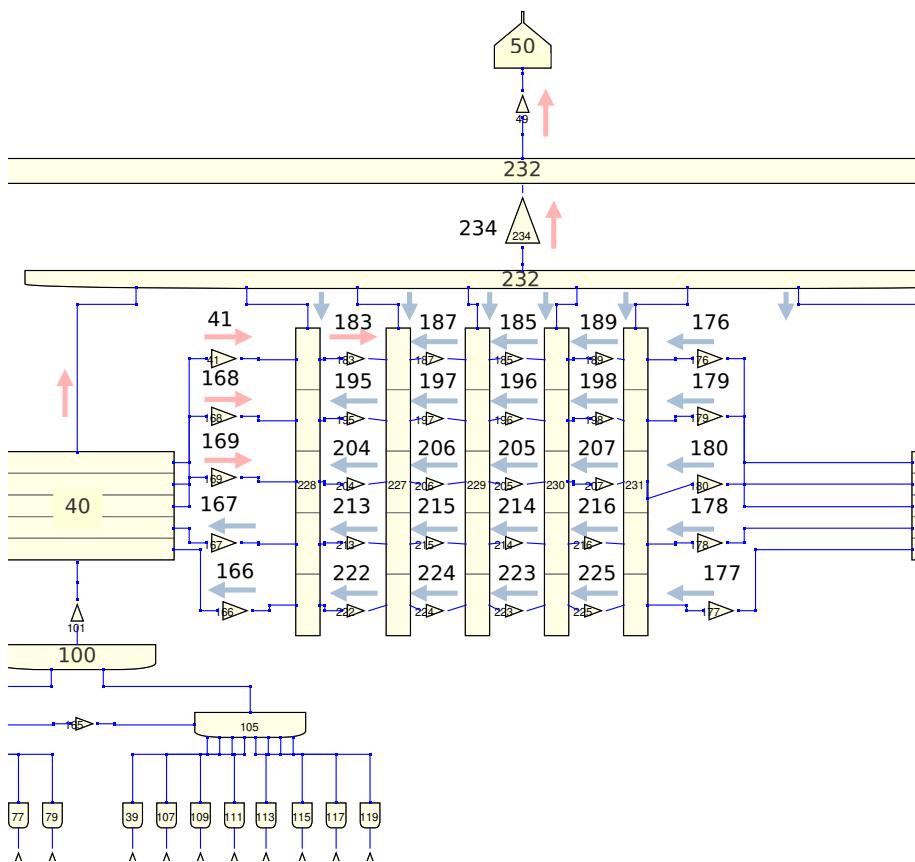
Obrázek 4.15: Průtok skrze AZ reaktoru VR-1 - referenční a renodalizovaný model NOD03.



Obrázek 4.16: Teplotní vývoj v trubce 40 - model NOD03.

4.5 Model NOD04

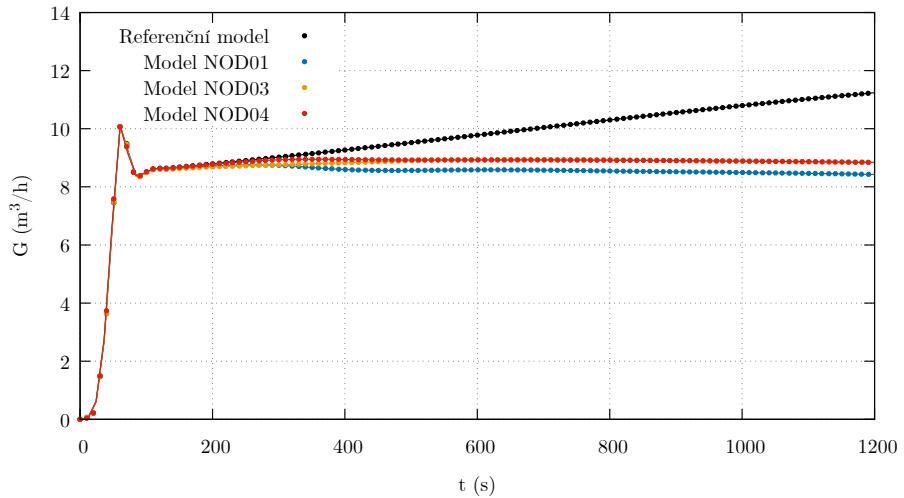
Poslední a nejkomplexnější varianta termohydraulického modelu VR-1 je modifikace modelu NOD03, která částečně vychází z práce [11]. Výsledky získané pro model NOD03 naznačují, že nedochází k ustálení průtoku chladiva skrze jednotlivé skupiny spojovacích jednotek S1 až S6 (více na Obr. C.11a až C.13b v příloze). Důvodem fyzikálně neodpovídajících výsledků je nedostatečně propojená vodní hladina s trubkami horizontálního obtoku. Například kapalina v nódu 5 trubky 231 by musela projít minimálně dalšími 11 komponentami než by dorazila do TDV 50 viz obr. 4.13. Proto byla do modelu přidána vícenásobná spojovací jednotka (BRANCH) 233 a kontrolní objem 232, které propojují vodní hladinu se všemi skupinami S1 až S6.



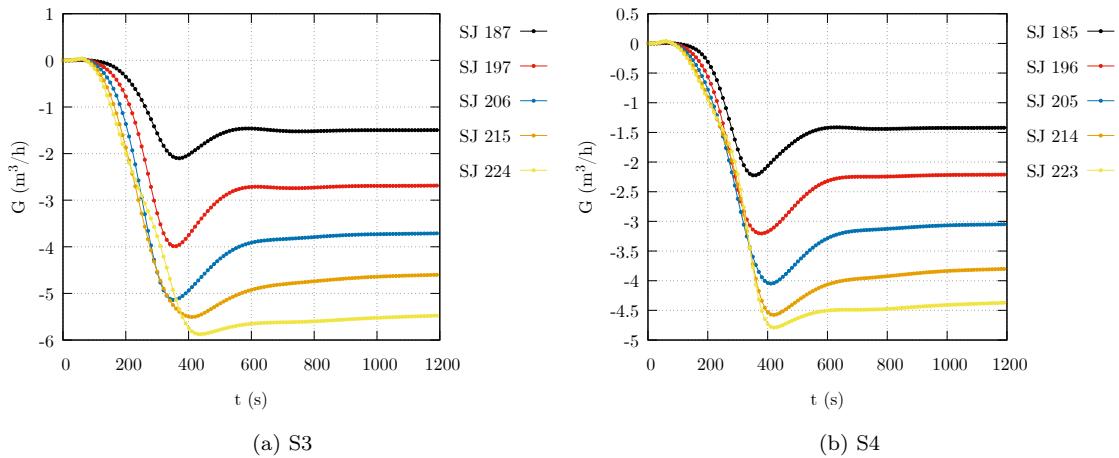
Obrázek 4.17: Nodalizace horizontálního obtoku - model NOD04

4.5.1 Výsledky

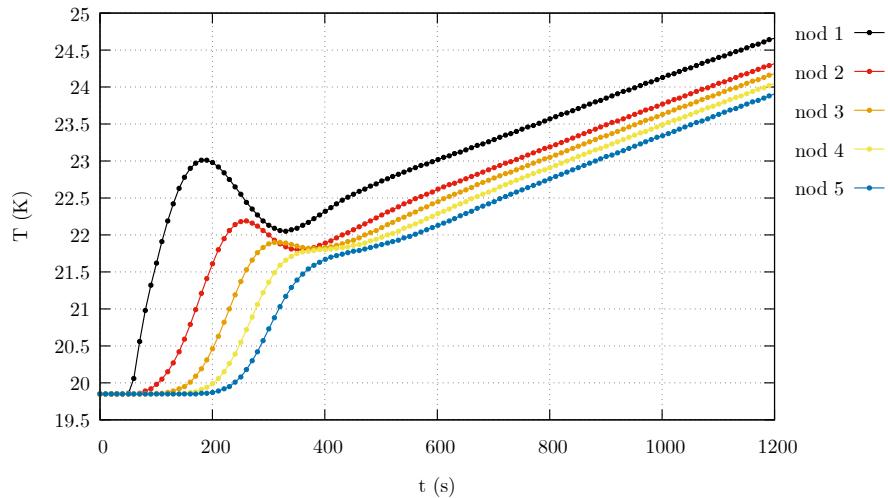
Na obrázku 4.18 je zobrazen celkový průtok chladiva skrz AZ pro referenční model a modely NOD01, NOD03 a NOD04. V případě modelu NOD04 je celkový průtok téměř shodný s modelem NOD03. Dochází však k drastické změně směru proudění ve všech skupinách spojovacích jednotek (SJ), jak je vidět na obrázcích 4.13 a 4.17. Díky odlišné konstrukci vodní hladiny dochází k relativnímu ustálení průtoku v čase okolo 800 s, jak je patrné z obr. 4.19a a 4.19b. Průtok skrz ostatní skupiny je uveden v příloze na obr. C.14a až C.16b.



Obrázek 4.18: Průtok skrze AZ reaktoru VR-1 - Referenční model a renodalizovaný model NOD01, NOD03 a NOD04.



Obrázek 4.19: Průtok skrze jednotlivé SJ (S3 a S4) - model NOD04.



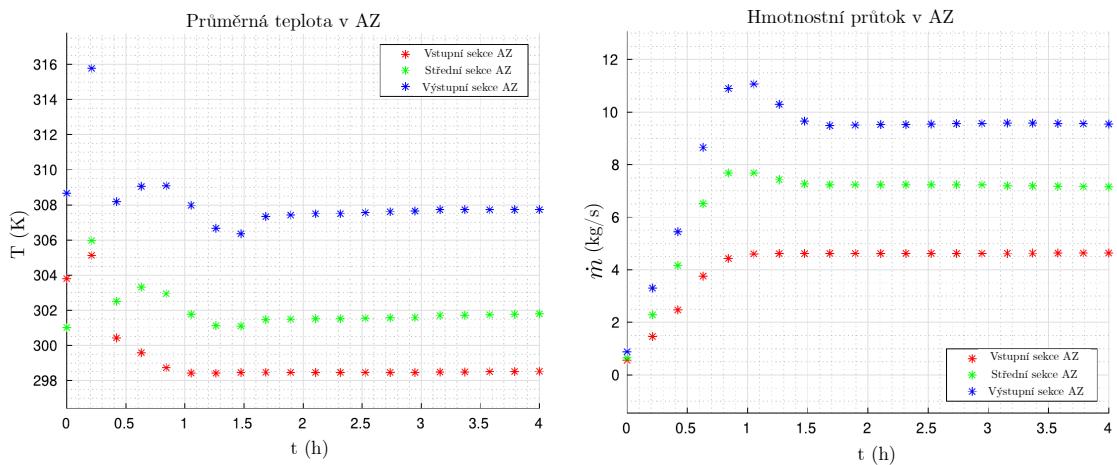
Obrázek 4.20: Teplotní vývoj v trubce 40 - model NOD04.

Kapitola 5

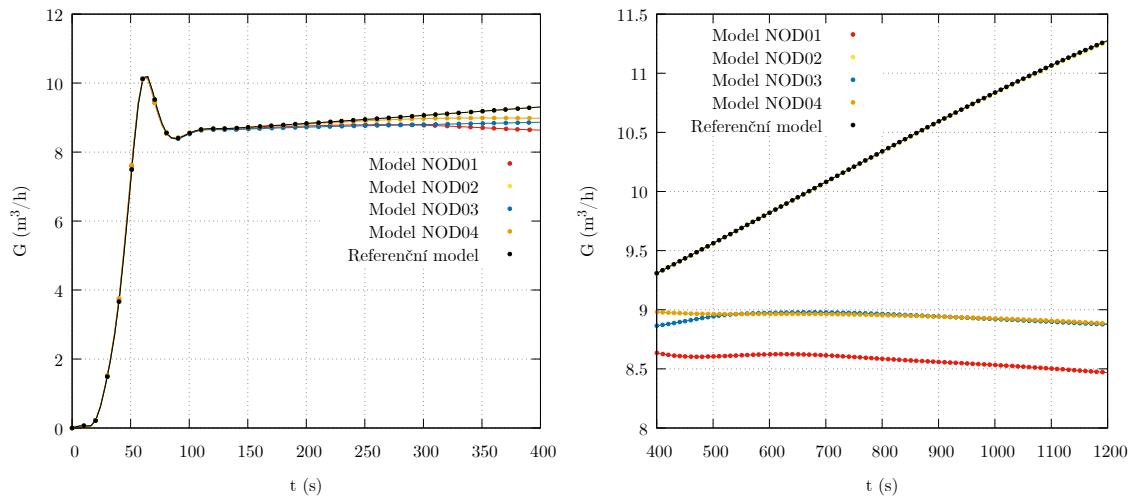
Hodnocení termohydraulických modelů

V této studii bylo zkoumáno 5 různých nodalizací termohydraulického modelu reaktoru VR-1 v programu RELAP5. V této kapitole jsou všechny modely srovnány mezi sebou, porovnány s daty z reaktoru Triga Mark II a okomentovány v souvislosti s bezpečnostními analýzami.

Z analýzy vyplynulo, že referenční model (NOD00) a renodalizovaný model NOD02 mají odlišné chování v porovnání s modely NOD01 a NOD04. Tyto modely neumožňují vzniku recirkulace ve volném objemu na AZ v horizontálním obtoku a dochází k nadhodnocení celkového průtoku (komentář k této problematice je uveden v kapitole 4). Toto nadhodnocení vede díky lepšímu odvodu tepla k celkově nižší výstupní teplotě chladiva. Pro kontext jsou na obr. 5.1 uvedeny grafy využité k validaci termohydraulického CFD modelu reaktoru TRIGA Mark I [12]. V [12] je předpokládán přechodový jev (exkurze výkonu na konstantní hodnotu) za vzniku ustáleného přirozeného proudění, detailní průběh výkonu ale není doložen. Chování průměrných teplot a rychlosť v AZ reaktoru TRIGA lze vztáhnout k výsledkům uvedeným na obr. 5.2 a 5.3.



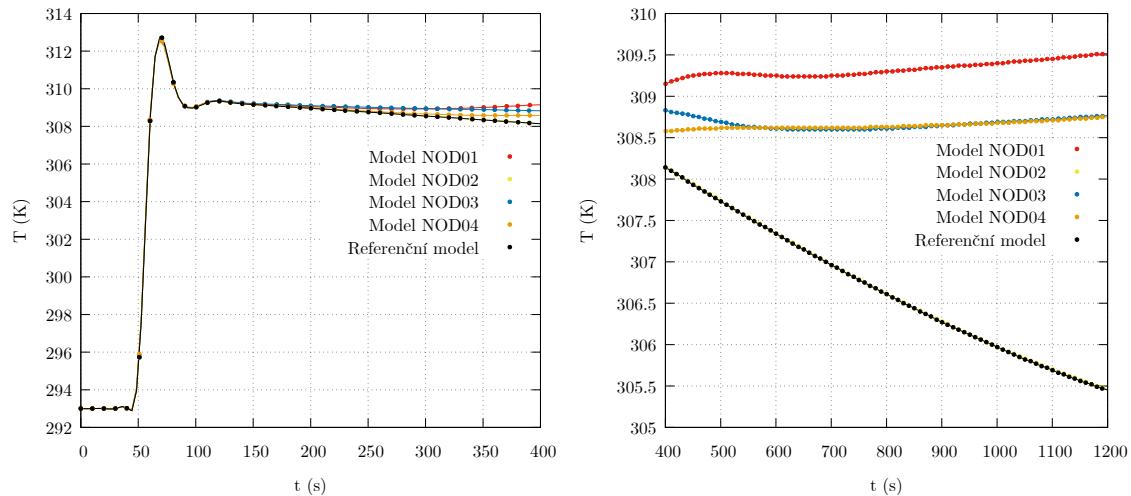
Obrázek 5.1: Průměrné teploty a rychlosti v jednotlivých částech AZ reaktoru TRIGA Mark II (CFD výpočet) [12].



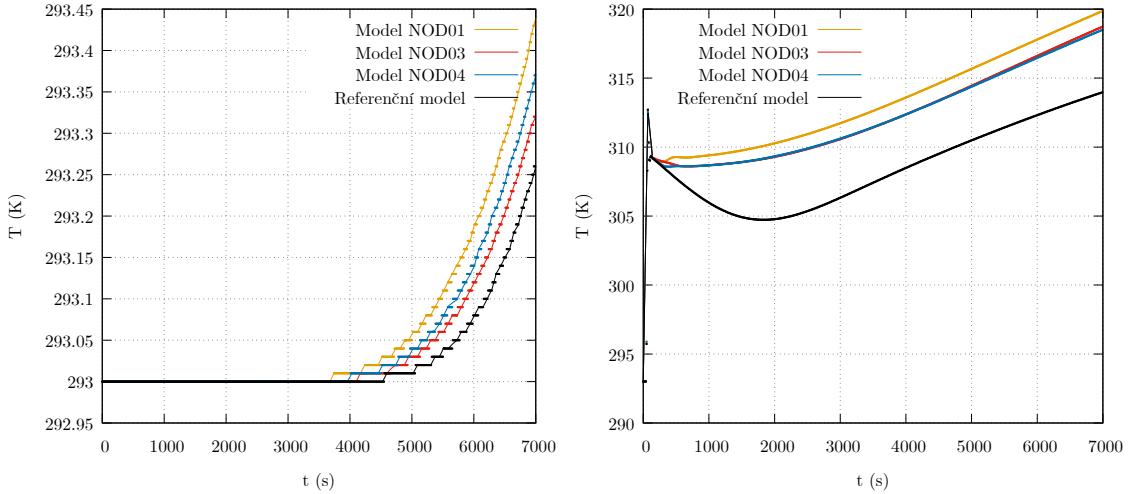
Obrázek 5.2: Průtok skrz AZ reaktoru VR-1 pro jednotlivé modely (RELAP5).

Z porovnání obr. 5.2 lze soudit, že průtok v referenčním modelu a modelu NOD02 neodpovídá chování CFD výpočtu uvedenému na obr. 5.1. Vzhledem k vyššímu průtoku a tedy lepšímu odvodu tepla se modely NOD00 a NOD02 jeví jako méně konzervativní. Proto by pro výpočet přechodových jevů v rámci bezpečnostních analýz bylo vhodnější využít modely NOD01 a NOD04, které mají nižší a konstantní průtok a tedy se zdají být konzervativnější a stabilnější. Z důvodu nestability popsáne v sekci 4.4 (špatné konstrukce vodní hladiny) není vhodné používat model NOD03 pro další analýzy.

Teplota na výstupu z AZ je nejvyšší v případě modelu NOD01, tedy model se pro analýzu přechodových jevů zdá být v rámci zkoumaných modelů nejvíce konzervativní.



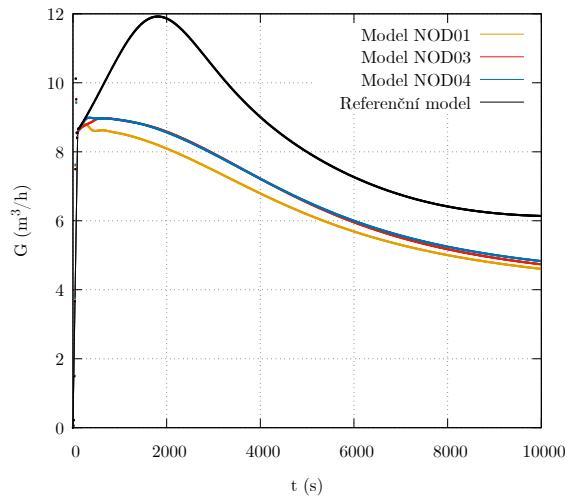
Obrázek 5.3: Teploty chladiva na výstupu z AZ reaktoru VR-1 pro jednotlivé modely (RELAP5).



Obrázek 5.4: Vstupní teplota chladiva pro jednotlivé modely (RELAP5)

Obrázek 5.5: Výstupní teplota chladiva pro jednotlivé modely (RELAP5).

Dále platí, že doba, než dojde k úplné recirkulaci a tedy k nárůstu teploty na vstupu do AZ, je nejnižší u modelů NOD03 a NOD04. Tato skutečnost vyplývá z obr. 5.4. Po dobu kolem 4000 s je vstupní teplota chladiva konstantní. Následně dochází ke schodovitému nárůstu, u kterého lze spekulovat o fyzikálním odvodení. Čas 4000 s ovšem odpovídá rychlosti proudění a konstrukci reaktoru, tedy jako původ tohoto nárůstu lze považovat vstup ohřáté kapaliny do AZ. Model NOD02 není uveden, neboť má identické chování jako referenční model.



Obrázek 5.6: Průtok skrz AZ reaktoru VR-1 pro jednotlivé modely (RELAP5).

Ohřev celkového objemu v reaktorové nádobě vede u všech modelů k poklesu teplotního gradientu a tedy i ke klesajícímu průtoku viz obr. 5.6.

Pro úplnost jsou v tab. 5.1 uvedeny průměrné a maximální teploty HS pro jednotlivé modely. Opět se jako nejkonzervativnější jeví model NOD01, kdy je průměrná a maximální teplota HS nejvyšší. V rámci výpočtů lze ovšem rozdíly mezi jednotlivými modely považovat za zanedbatelné.

Tabulka 5.1: Maximální a průměrné teploty HS pro jednotlivé modely.

Model	T_{av} (K)	T_{max} (K)
NOD00	308,7	313,6
NOD01	309,5	314,9
NOD02	308,7	313,6
NOD03	309,2	314,4
NOD04	309,2	314,3

Celkově z uvedených výsledků vyplývá, že jako vhodné pro analýzu přechodových se jeví renodalizované termohydraulické modely NOD01 a NOD04. V obou případech je charakteristika přirozeného proudění stabilní a chováním odpovídá [12]. Pro bezpečnostní analýzy se může zdát vhodnější model NOD01, který je v porovnání s ostatními modely nejkonzervativnější.

Závěr

Literatura

- [1] *Research Reactor Core Conversion Guidebook, Volume 4: Fuels (Appendices I-K)*. Number 643/4 in TECDOC Series. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna, 1992.
- [2] *Research Reactor Benchmarking Database: Facility Specification and Experimental Data (Revision)*. Number 480 (Rev.1) in Technical Reports Series. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna, 2022.
- [3] M. Azzoune, L. Mammou, M.H. Boulheouchat, T. Zidi, M.Y. Mokeddem, S. Belaid, A. Bousbia Salah, B. Meftah, and A. Boumedien. Nur research reactor safety analysis study for long time natural convection (nc) operation mode. *Nuclear Engineering and Design*, 240(4):823–831, 2010.
- [4] D Bestion. The structure of system thermal-hydraulic (sys-th) code for nuclear energy applications. In *Thermal-Hydraulics of Water Cooled Nuclear Reactors*, pages 639–727. Elsevier, 2017.
- [5] Tomas Bily, Jan Rataj, Ondrej Huml, and Ondrej Chvala. Effect of kinetics parameters on transients calculations in external source driven subcritical vr-1 reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 123:97–109, 2019.
- [6] S. Chatzidakis, A. Hainoun, A. Doval, F. Alhabet, F. Francioni, A. Ikonomopoulos, and D. Ridikas. A comparative assessment of independent thermal-hydraulic models for research reactors: The rsg-gas case. *Nuclear Engineering and Design*, 268:77–86, 2014.
- [7] S. Chatzidakis and A. Ikonomopoulos. Phenomenological investigation of loss of coolant accident in a research reactor facility. *Nuclear Engineering and Design*, 256:341–349, 2013.
- [8] US Nuclear Regulatory Commission et al. Relap5/mod3. 2 code manual: Code structure, system models, and solution methods. *Idaho: National Engineering Laboratory*, 2001.
- [9] F. Fejt. *Analýza termohydraulických modelů reaktoru VR-1 s využitím trojrozměrné kinetiky*. PhD thesis, 2019.
- [10] Afshin Hedayat. Simulation and transient analyses of a complete passive heat removal system in a downward cooling pool-type material testing reactor against a complete station blackout and long-term natural convection mode using the relap5/3.2 code. *Nuclear Engineering and Technology*, 49(5), 2017.
- [11] Xiaofan Hou, Zhongning Sun, and Wenjing Lei. Capability of relap5 code to simulate the thermal-hydraulic characteristics of open natural circulation. *Annals of Nuclear Energy*, 109:612–625, 2017.
- [12] Carolina Introini, Davide Chiesa, Massimiliano Nastasi, Ezio Previtali, Andrea Salvini, Monica Sisti, Xiang Wang, and Antonio Cammi. A complete cfd study on natural convection in the triga mark ii reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 403:112118, 2023.
- [13] Boštjan Končar and Borut Mavko. Modelling of low-pressure subcooled flow boiling using the relap5 code. *Nuclear Engineering and Design*, 220(3):255–273, 2003.

- [14] H. Omar, N. Ghazi, F. Alhabit, and A. Hainoun. Thermal hydraulic analysis of syrian mnsr research reactor using relap5/mod3.2 code. *Annals of Nuclear Energy*, 37(4):572–581, 2010.
- [15] Alessandro Petruzzi and Francesco D’Auria. Thermal-hydraulic system codes in nuclear reactor safety and qualification procedures. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2008, 2008.
- [16] J.; et al. Rataj. Bezpečnostní zpráva školního reaktoru vr-1. Technical report, KJR FJFI ČVUT v Praze, 2017.
- [17] Patrícia A.L. Reis, Antonella L. Costa, Claubia Pereira, Clarysson A.M. Silva, Maria Auxiliadora F. Veloso, and Amir Z. Mesquita. Sensitivity analysis to a relap5 nodalization developed for a typical triga research reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 242:300–306, 2012.
- [18] Obida M Zeitoun. *Subcooled flow boiling and condensation*. PhD thesis, 1994.
- [19] M. Šedlbauer. Individuální program zajišťování kvality a technické bezpečnosti jaderného paliva irt-4m na školním reaktoru vr-1. Technical report, KJR FJFI ČVUT v Praze, 2019.

Příloha A

Přehled modelů

Tabulka A.1: Přehled použitých modelů PČ IRT-4M (Modely označené hvězdičkou byly vytvořeny i pro 6-trubkovou a 4-trubkovou konfiguraci).

Hydraulické modely	Název modelu	Popsán v sekci:
	Komplexní model PČ bez vytěsnitele	3.1
	Komplexní model PČ s vytěsnitelem	3.1
	Zjednodušený model PČ bez vytěsnitele	3.2
	Zjednodušený model PČ s vytěsnitelem	3.2
Termohydraulické modely	Název modelu	Popsán v sekci:
	Komplexní model PČ bez vytěsnitele	3.4
	Zjednodušený model PČ bez vytěsnitele	3.4
	Jednotkový model PČ	3.5

Tabulka A.2: Přehled nodalizací modelu školního reaktoru VR-1.

Termohydraulické modely	Název modelu	Popsán v sekci:
	Referenční model / Model NOD00	4.1
	Model N0D01	4.2
	Model N0D02	4.3
	Model N0D03	4.4
	Model NOD04	4.5

Příloha B

Tabulky

Tabulka B.1: Geometrie 8-trubkového palivového článku IRT-4M [19]

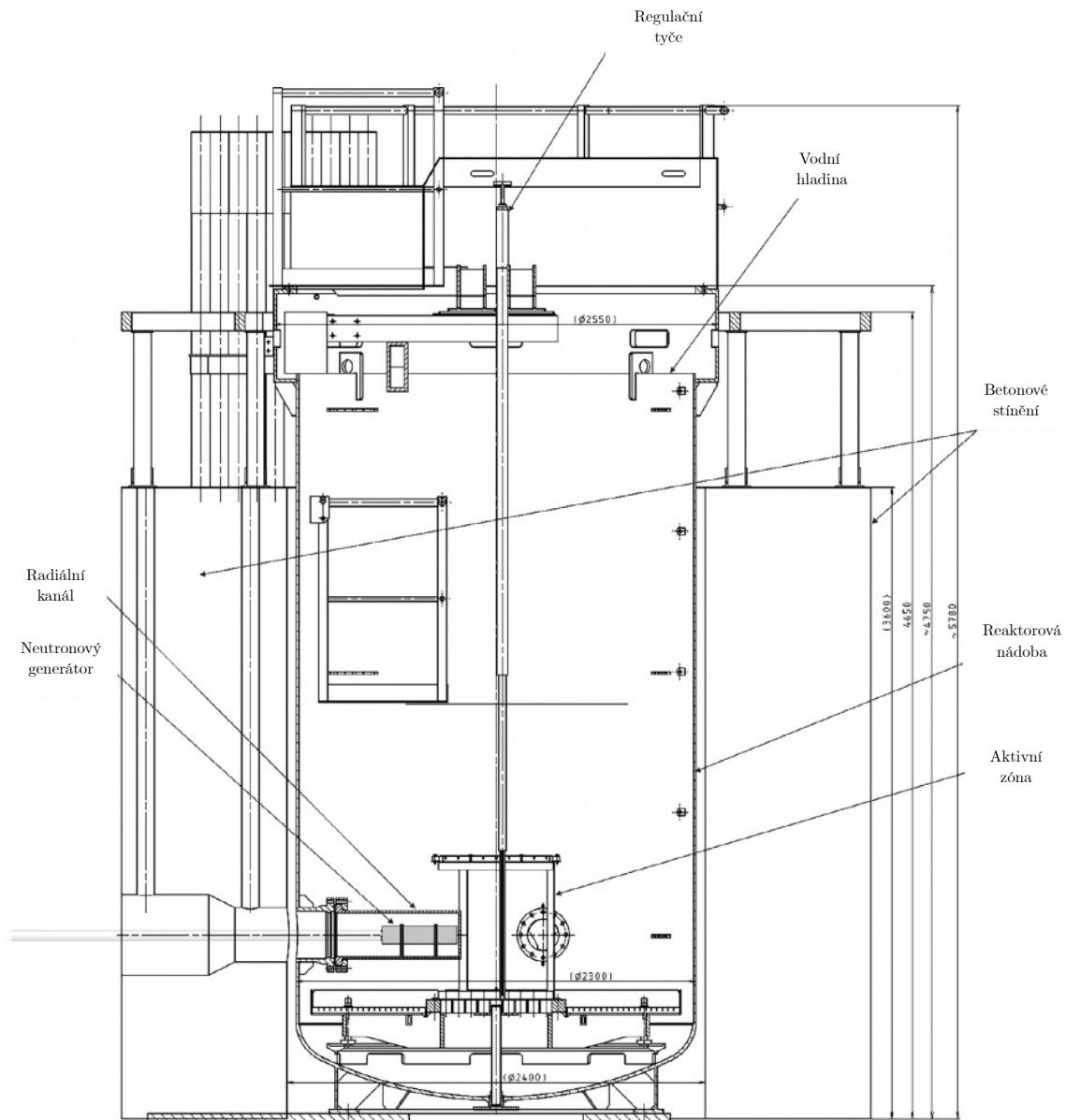
Číslo trubky	1	2	3	4	5	6	7	8
Vnější rozměr trubky (mm)	69,6	62,7	55,8	48,9	42,0	35,1	28,2	\oslash 21,3
Vnitřní rozměr trubky (mm)	66,4	59,5	52,6	45,7	38,8	31,9	25	\oslash 18,1
Vnější rozměr palivové vrstvy	68,7	61,8	54,9	48,0	41,1	34,2	27,3	\oslash 20,4
Vnitřní rozměr palivové vrstvy	67,3	60,4	53,5	46,6	39,7	32,8	25,9	\oslash 19,0
Vnější poloměr zakřivení	9,3	8,5	7,7	6,9	6,1	5,3	4,5	-
Vnitřní poloměr zakřivení	7,7	6,9	6,1	5,3	4,5	3,7	2,9	-
Vnější průměr vytěsnitele (mm)	14							
Vnitřní průměr vytěsnitele (mm)	12							
Průměr vstupního otvoru vytěsnitele (mm)	3							

Tabulka B.2: Průběh výkonu jednoho PČ.

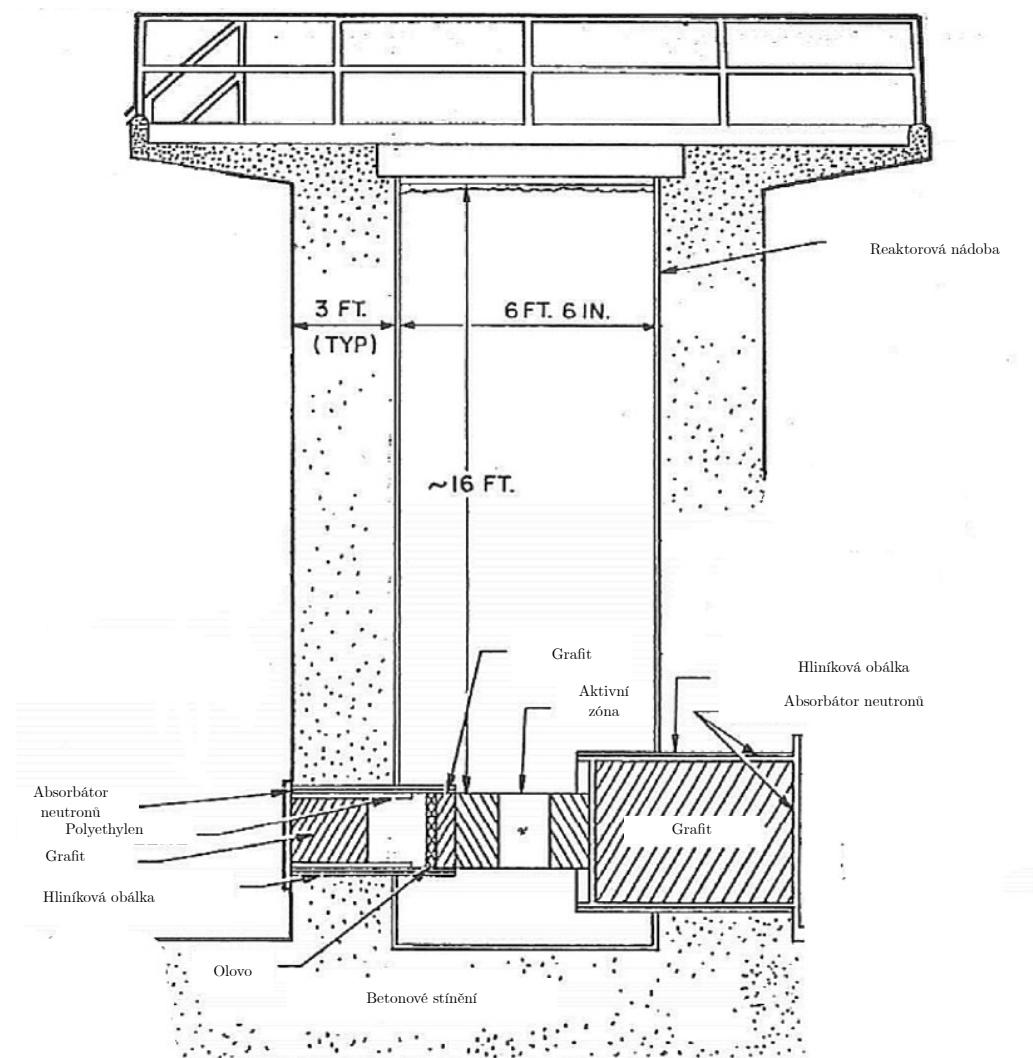
t (s)	P (W)
0	0
10	100
15	1000
20	10^4
30	10^4
...	
1200	10^4

Příloha C

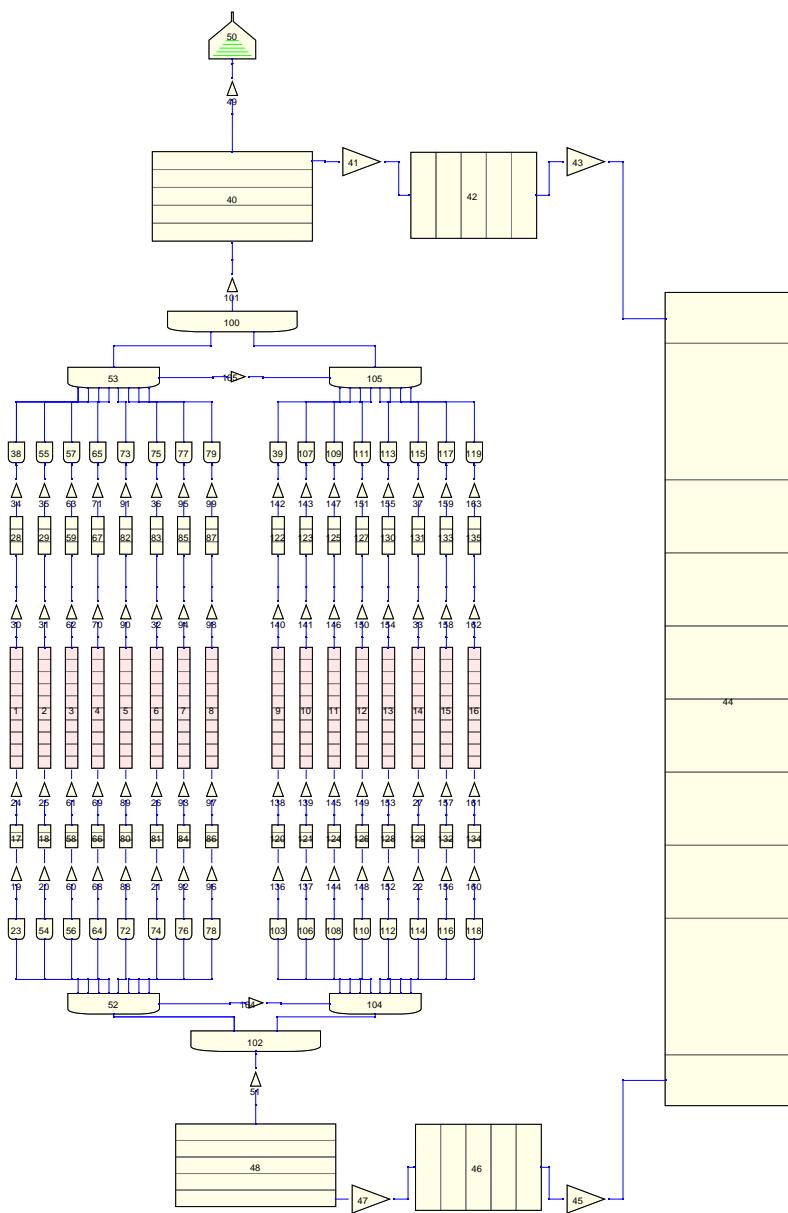
Obrázky



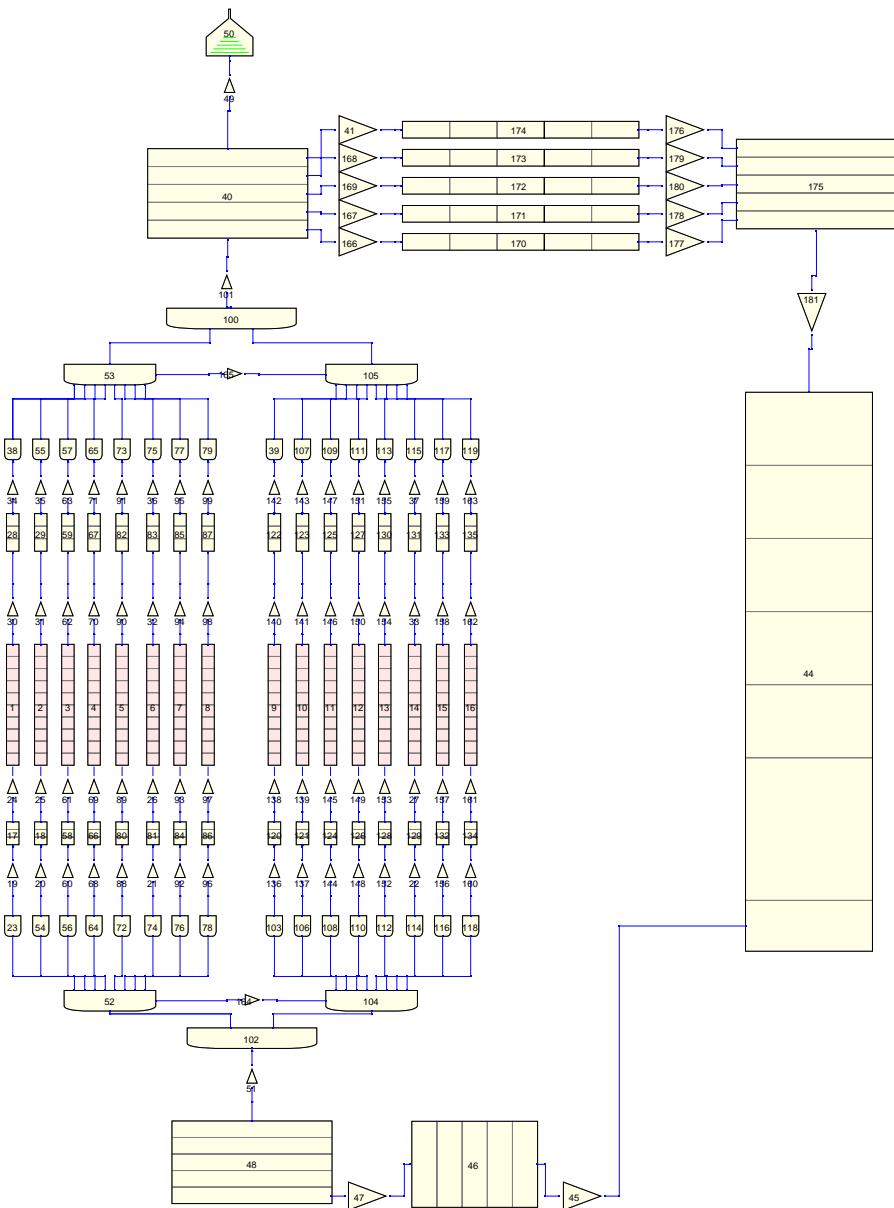
Obrázek C.1: Konstrukce reaktoru VR-1 [5].



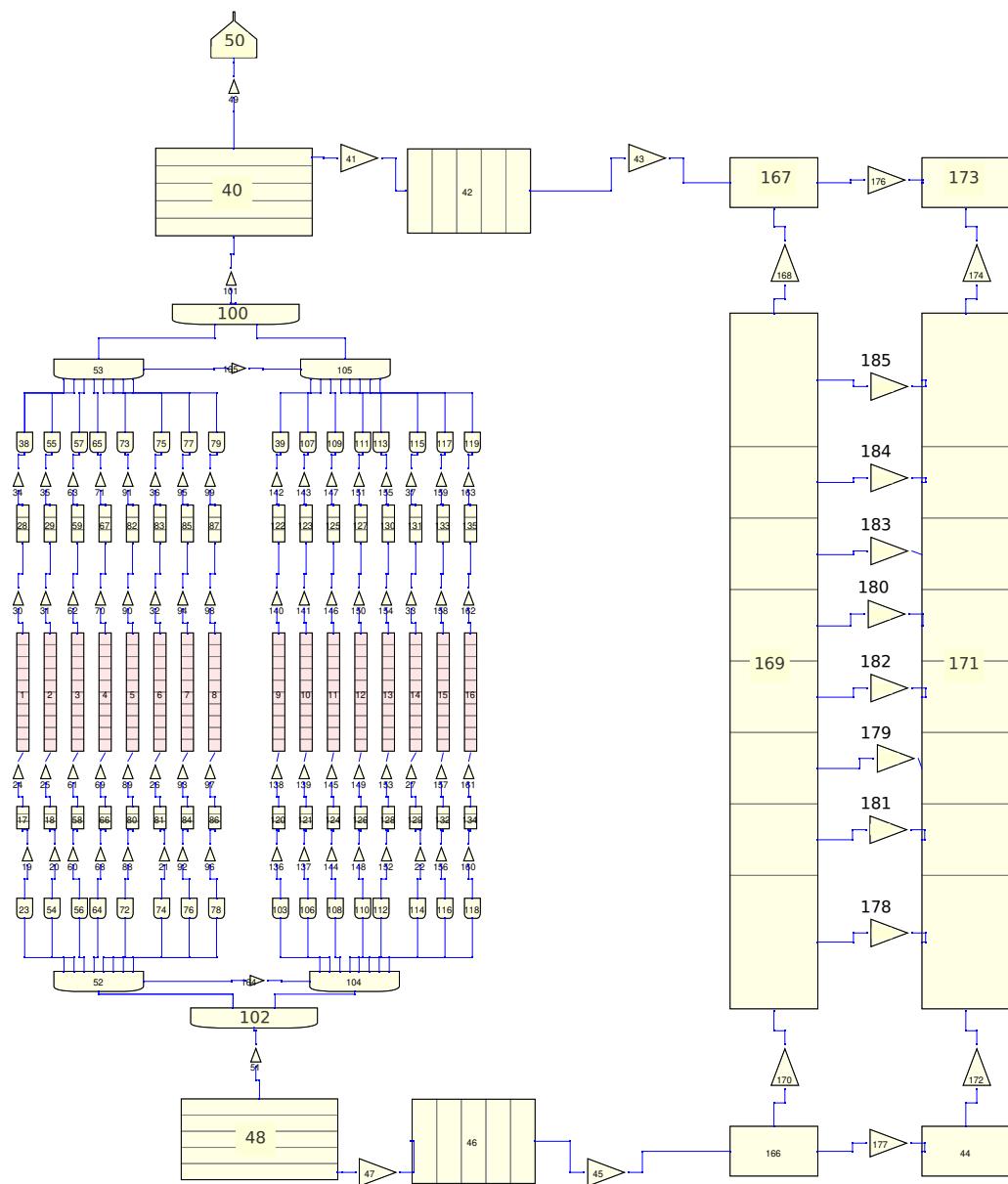
Obrázek C.2: Konstrukce reaktoru TRIGA Mark I [12].



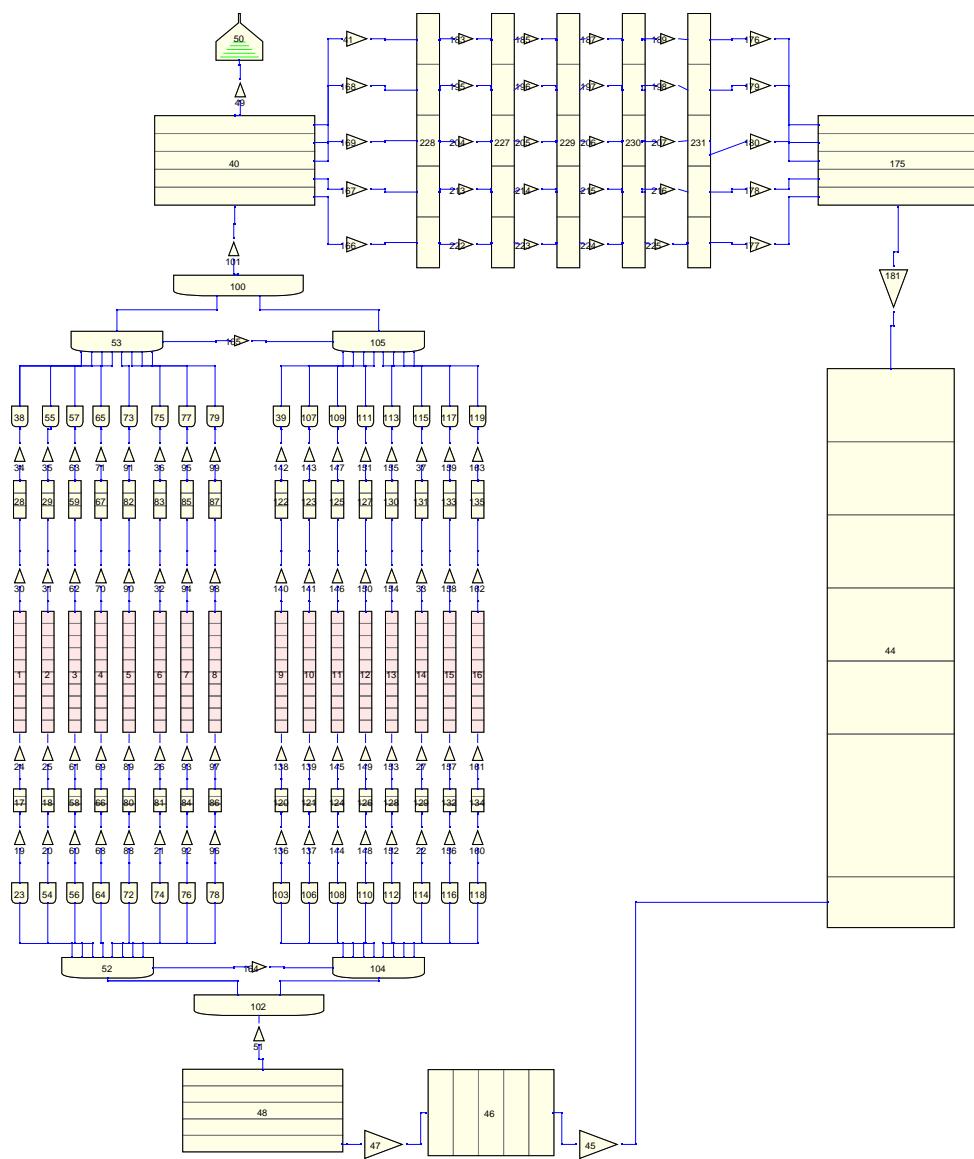
Obrázek C.3: Termohydraulický model reaktoru VR-1 - Referenční model (NOD00).



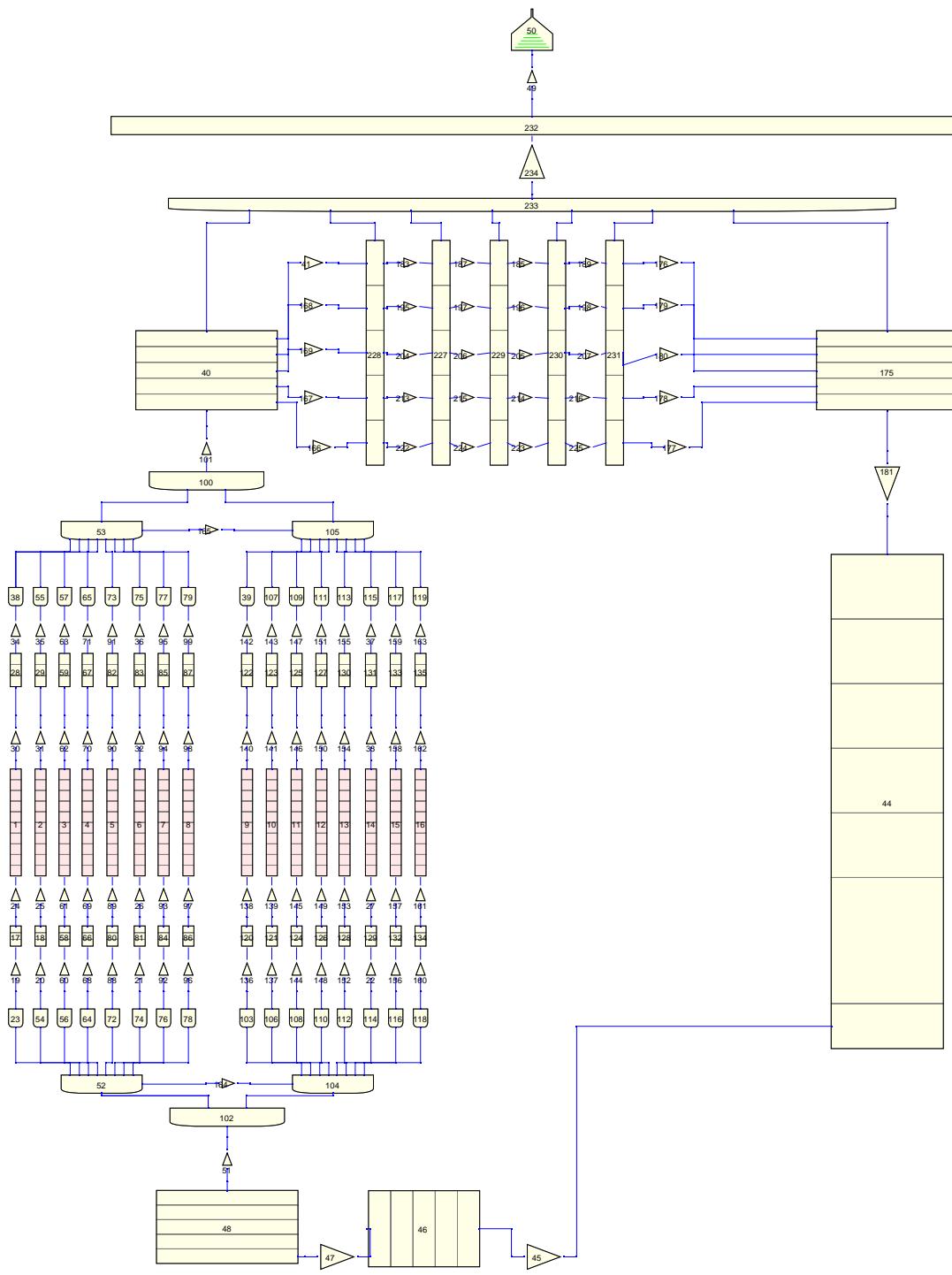
Obrázek C.4: Termohydraulický model reaktoru VR-1 - model NOD01.



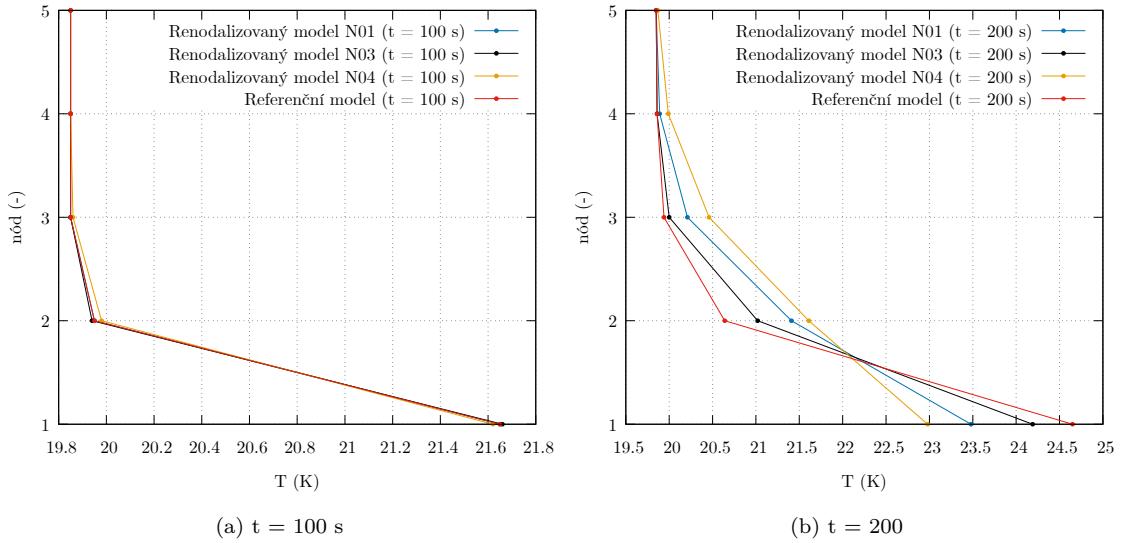
Obrázek C.5: Termohydraulický model reaktoru VR-1 - model NOD02.



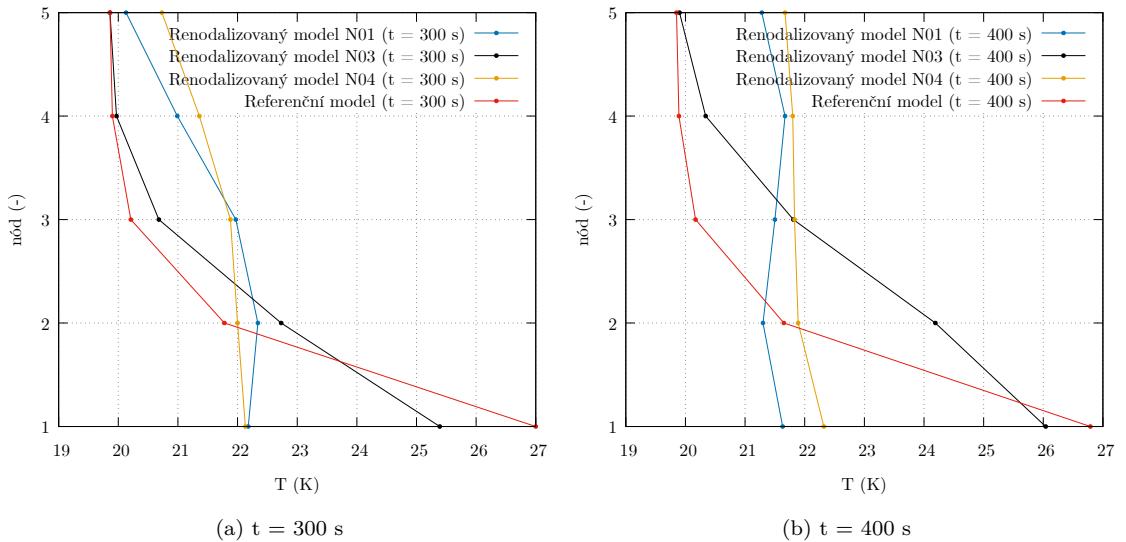
Obrázek C.6: Termohydraulický model reaktoru VR-1 - model NOD03.



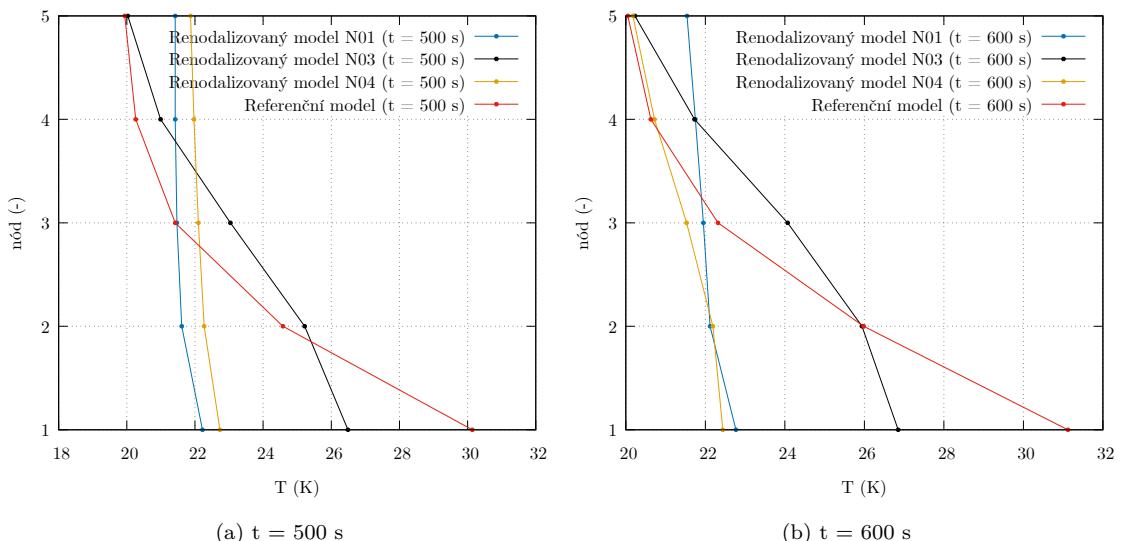
Obrázek C.7: Termohydraulický model reaktoru VR-1 - Model NOD04



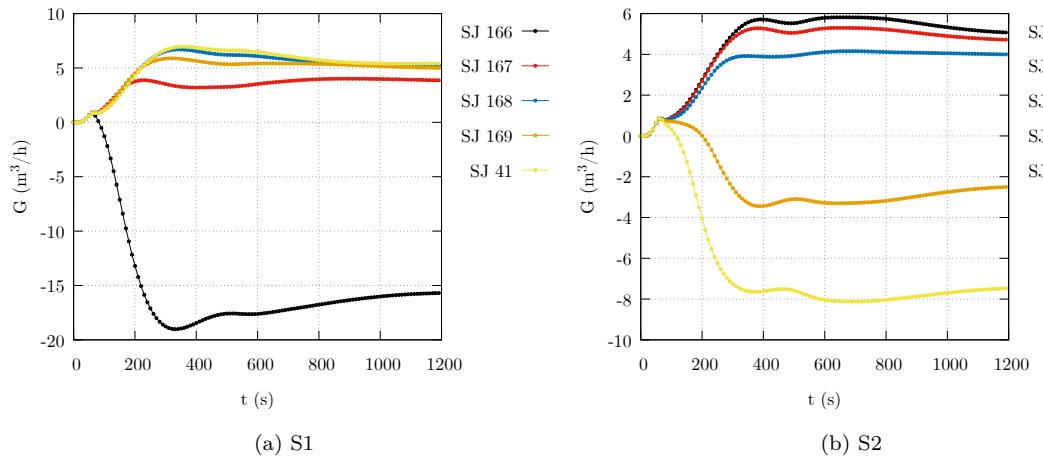
Obrázek C.8: Rozložení teplot v trubce 40



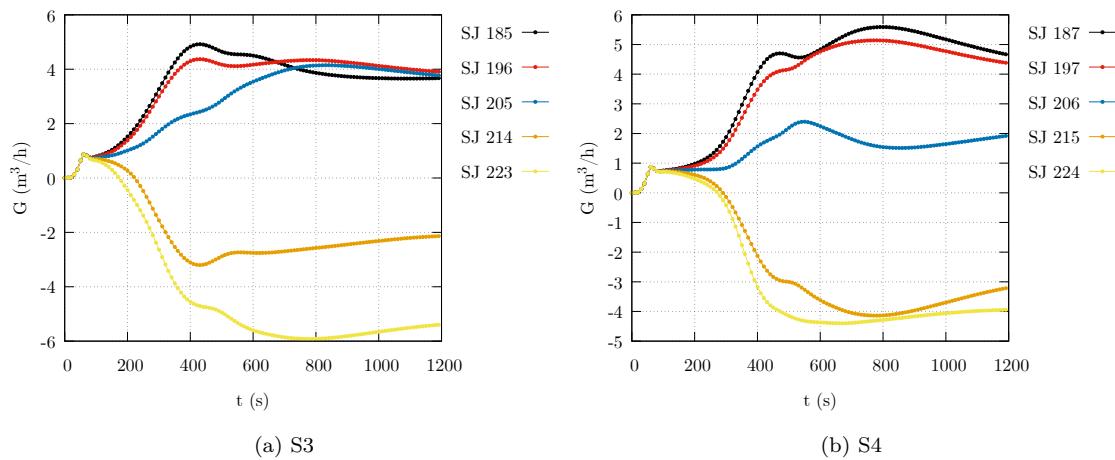
Obrázek C.9: Rozložení teplot v trubce 40.



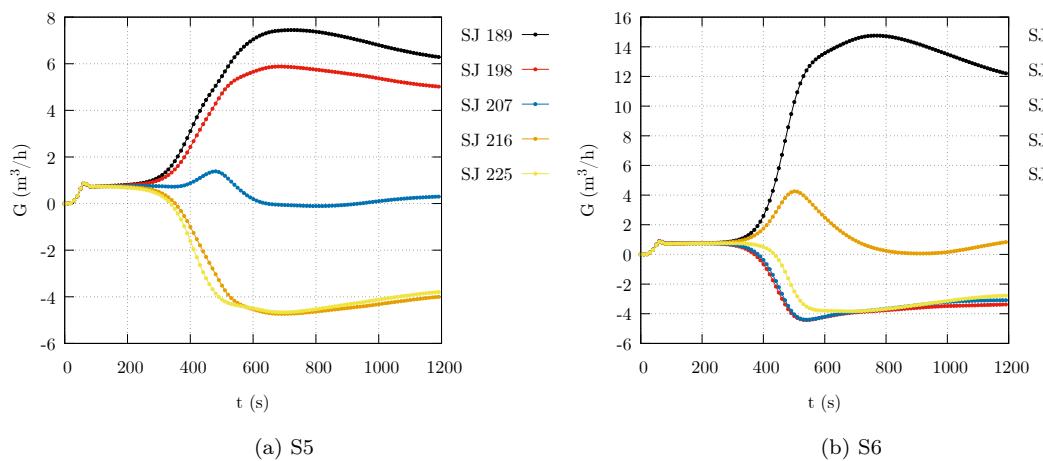
Obrázek C.10: Rozložení teplot v trubce 40.



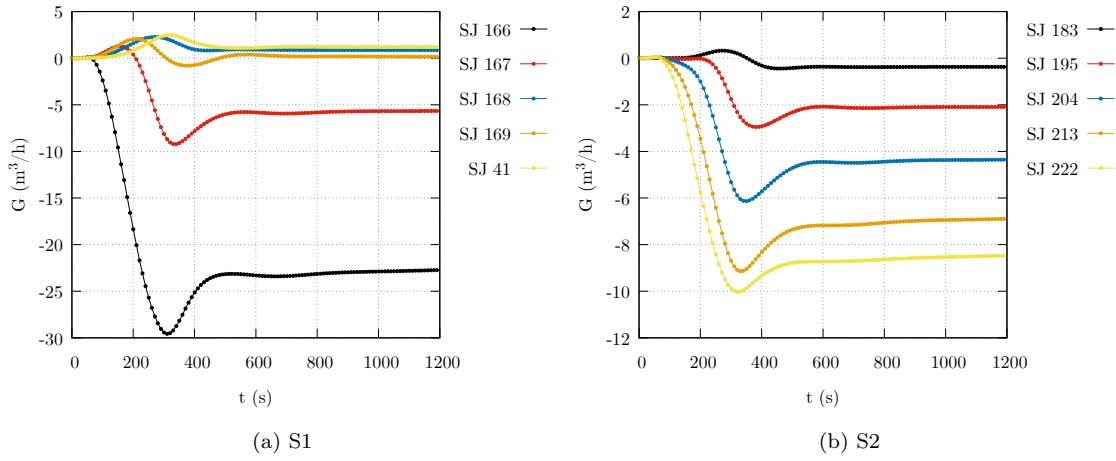
Obrázek C.11: Průtok skupinou S1 a S2 - model NOD03.



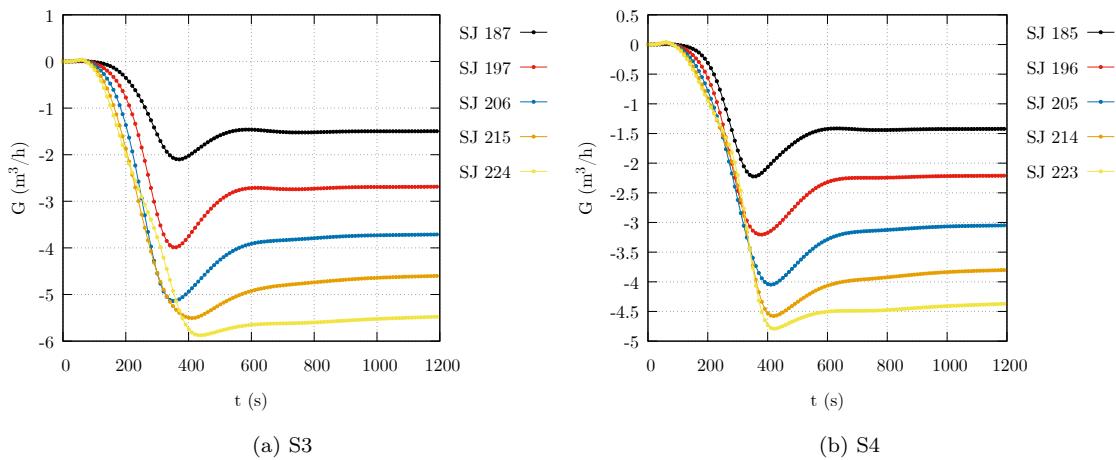
Obrázek C.12: Průtok skupinou S3 a S4 - model NOD03.



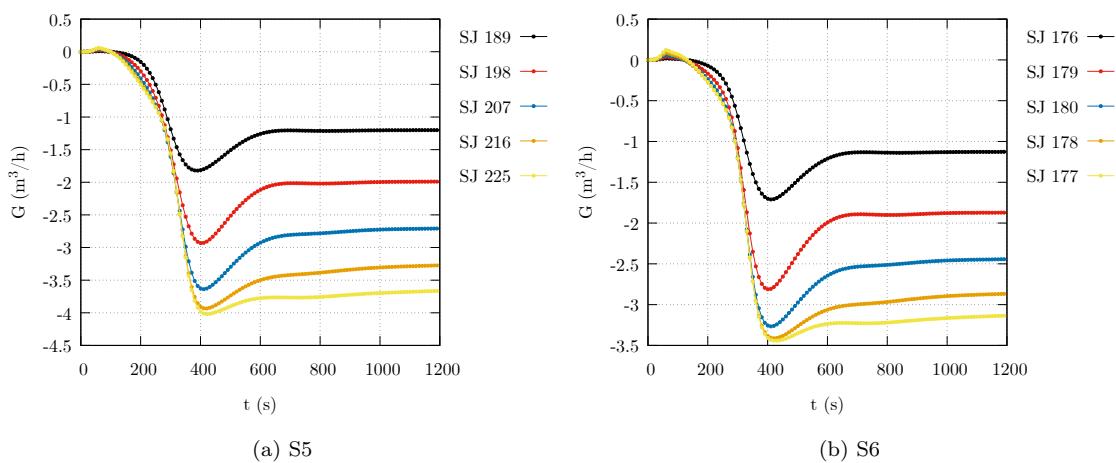
Obrázek C.13: Průtok skupinou S5 a S6 - model NOD03.



Obrázek C.14: Průtok skupinou S1 a S2 - model NOD04.



Obrázek C.15: Průtok skupinou S3 a S4 - model NOD04.



Obrázek C.16: Průtok skupinou S5 a S6 - model NOD04.