

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: Popis práce česky

Klíčová slova: Klíčová slova

Title:

Thermohydraulic model of training reactor VR-1

Author: Bc. Jakub Mátl

Abstract: Popis práce anglicky

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 Výhody a nevýhody SYS-TH kódů	18
2 Benchmarková úloha	19
2.1 Popis experimentu	19
2.2 Základní hydraulické komponenty v kódu RELAP5	19
2.3 Model v RELAP5	22
2.4 Výsledky experimentů a výpočtů	23
3 Termohydraulický model palivového článku IRT-4M	25
3.1 Hydraulický model IRT-4M	25
3.1.1 Ověření správnosti modelu	28
3.2 Zjednodušený hydraulický model	29
3.2.1 Ověření správnosti modelu	29
3.3 Termohydraulický model PČ IRT-4M	32
3.4 Sjednocení průtočných kanálů	35
3.4.1 Celkový průtok skrz PČ	35
3.4.2 Ohřev chladiva na výstupu z jednotlivých kanálů (trubek) PČ	36
3.4.3 Výskyt povrchového varu	37
3.4.4 Zhodnocení sjednocení průtočných kanálů	38
3.5 Sjednocení topných komponent	39
4 Termohydraulický model reaktoru VR-1	41
4.1 Referenční model	42
4.1.1 Výsledky	44
4.2 Model NOD01	45
4.2.1 Výsledky	46
4.3 Model NOD02	47
4.3.1 Výsledky	47
4.4 Model NOD03	49
4.4.1 Výsledky	50
4.5 Model NOD04	51
4.5.1 Výsledky	52
5 Závěr	55

Závěr	57
Literatura	59
Přílohy	60
A Přehled modelů	61
B Tabulky	63
C Obrázky	65

Seznam obrázků

2.1	Geometrie testovací trubice [12].	20
2.2	Testovací smyčka [12].	20
2.3	Hydraulické komponenty v programu RELAP5.	21
2.4	Termohydraulický model testovací trubice - RELAP.	22
2.5	Srovnání dutinového koeficientu - exp. BC1.	24
2.6	Srovnání dutinového koeficientu - exp. BC7.	24
2.7	Srovnání dutinového koeficientu - exp. BC9.	24
2.8	Srovnání dutinového koeficientu - exp. BC13.	24
3.1	Radiální řez palivovým článkem IRT-4M.	26
3.2	Radiální řez palivovým článkem IRT-4M v detailu.	26
3.3	Axiální řez palivovým článkem IRT-4M.	26
3.4	Hydraulický model palivového článku IRT-4M.	27
3.5	Průtok a rychlosť v jednotlivých kanálech.	29
3.6	Zjednodušený hydraulický model palivového článku IRT-4M.	30
3.7	Závislost průtoku skrz PČ (bez vytěsnitele) na hydraulickém průměru.	31
3.8	Termohydraulický komplexní model 8-trubkového PČ IRT-4M bez vytěsnitele (Pro lepší vizualizaci byly měřítka komponent 53 až 62 změněna).	33
3.9	Termohydraulický zjednodušený model 8-trubkového PČ IRT-4M bez vytěsnitele (Pro lepší vizualizaci byly měřítka komponent 53-62 změněna).	34
3.10	Axiální a radiální rozložení výkonu v 8-trubkovém PČ IRT-4M - Serpent2.	35
3.11	Ohřev na výstupu z jednotlivých kanálů pro jednotlivé modely.	36
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).	37
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).	37
3.14	Komplexní model	38
3.15	Zjednodušený model	38
3.16	Možný výskyt povrchového bublinkového varu - rovnoměrné rozdělení výkonu (červené nody označují možný výskyt varu, modré přirozenou konvekci bez změny fáze).	38
3.17	Komplexní model	38
3.18	Zjednodušený model	38
3.19	Možný výskyt povrchového bublinkového varu - rozdělení výkonu dle Serpent2 (červené nody označují možný výskyt varu, modré přirozenou konvekci bez změny fáze).	38
4.1	CFD výpočet přirozeného proudění skrze reaktor TRIGA MARK I [7].	42
4.2	Termohydraulický model reaktoru VR-1.	43
4.3	Popis přirozeného proudění skrze palivový článek pro referenční model.	44
4.4	Časový vývoj teplot v jednotlivých nódech trubky 40.	45
4.5	Nodalizace horizontálního obtoku - model NOD01	45
4.6	Průtok skrze AZ reaktoru VR-1 - referenční a renodalizovaný model NOD01.	46

4.7	Průtok skrze trubky 170 - 174 (viz obr. 4.5) - renodalizovaný model NOD01.	46
4.8	Teplotní vývoj v trubce 40 - model NOD01.	47
4.9	Nodalizace vertikálního obtoku - model NOD02	48
4.10	Průtok skrze AZ reaktoru VR-1 - referenční a renodalizovaný model NOD02.	48
4.11	Průtok spojovacími jednotkami (SJ) ve vertikálním obtoku - model NOD02.	49
4.12	Teplotní vývoj v trubce 40 - model NOD02.	49
4.13	Nodalizace horizontálního obtoku - model NOD03	50
4.14	Průtok skrze jednotlivé SJ (S3 a S4) - model NOD03.	50
4.15	Průtok skrze AZ reaktoru VR-1 - referenční a renodalizovaný model NOD03.	51
4.16	Teplotní vývoj v trubce 40 - model NOD03.	51
4.17	Nodalizace horizontálního obtoku - model NOD04	52
4.18	Průtok skrze AZ reaktoru VR-1 - Referenční model a renodalizovaný model NOD01, NOD03 a NOD04.	53
4.19	Průtok skrze jednotlivé SJ (S3 a S4) - model NOD04.	53
4.20	Teplotní vývoj v trubce 40 - model NOD04.	53
C.1	Konstrukce reaktoru VR-1 [1].	66
C.2	Konstrukce reaktoru TRIGA Mark I [7].	67
C.3	Termohydraulický model reaktoru VR-1 - Referenční model (NOD00).	68
C.4	Termohydraulický model reaktoru VR-1 - model NOD01.	69
C.5	Termohydraulický model reaktoru VR-1 - model NOD02.	70
C.6	Termohydraulický model reaktoru VR-1 - model NOD03.	71
C.7	Termohydraulický model reaktoru VR-1 - Model NOD04	72
C.8	Rozložení teplot v trubce 40	73
C.9	Rozložení teplot v trubce 40.	73
C.10	Rozložení teplot v trubce 40.	73
C.11	Průtok skupinou S1 a S2 - model NOD03.	74
C.12	Průtok skupinou S3 a S4 - model NOD03.	74
C.13	Průtok skupinou S5 a S6 - model NOD03.	74
C.14	Průtok skupinou S1 a S2 - model NOD04.	75
C.15	Průtok skupinou S3 a S4 - model NOD04.	75
C.16	Průtok skupinou S5 a S6 - model NOD04.	75

Seznam tabulek

2.1	Podmínky pro ověření modelu [12].	23
3.1	Relativní objemové průtoky skrze palivový článek (s odpovídajícím vytěsnitelem).	28
3.2	Celkový objemový průtok 8-trubkovým PČ (s vytěsnitelem).	28
3.3	Rozložení rychlostí v kanálech 8-trubkového PČ (s vytěsnitelem).	28
3.4	Průtok v komplexním a zjednodušeném modelu PČ (bez vytěsnitele) pro různé hydraulické průměry.	31
3.5	Rozměry ekvivalentních HS pro PČ IRT-4M a jejich napojení na jednotlivé trubky (viz Obr. 3.8 a 3.9).	32
3.6	Rozložení výkonu v 8-trubkovém PČ IRT-4M dle programu Serpent.	35
3.7	Celkový průtok skrz PČ pro komplexní a zjednodušený model při rovnoměrném rozdělení výkonu a rozdělením dle programu Serpent2.	36
3.8	Ohřev chladiva na výstupu z PČ pro jednotlivé kanály (RV - rovnoměrný výkon, S - výkon dle Serpent2, KM & JM - komplexní a zjednodušený model).	37
3.9	Geometrie sjednocené HS.	39
A.1	Přehled použitých modelů PČ IRT-4M (Modely označené hvězdičkou byly vytvořeny i pro 6-trubkovou a 4-trubkovou konfiguraci).	61
A.2	Přehled nodalizací modelu školního reaktoru VR-1.	61
B.1	Geometrie 8-trubkového palivového článku IRT-4M [13]	63
B.2	Průběh výkonu jednoho PČ.	63

Úvod

Kapitola 1

Termohydraulické systémové kódy

1.1 Úvod

SYS-TH kódy jsou obecně založeny na numerickém řešení rovnic dvoufázového proudění, které je popsáno rovnicemi zákona zachování hmoty, hybnosti a energie pro kapaliny a plyny, zákonem zachování hmotnosti pro nekondenzující plyny a stavovými rovnicemi. Kódy mohou řešit jak 1-D, tak i trojrozměrnou problematiku proudění. Počet rovnic se může měnit v závislosti na fázi proudící látky a geometrii modelované problematiky. Nedílnou součástí vývoje numerických SYS-TH kódů je pak také verifikace a validace, která je prováděna například srovnáním výsledků s škálovanými experimenty či s daty přímo z jaderné elektrárny. Přestože termohydraulické kódy byly (a stále jsou) za poslední tři dekády neustále vyvíjeny, získávané výsledky jsou stále zatíženy chybami, které mohou být způsobeny nepřesnostmi numerického řešení, nevhodně zvolenými vztahy, nedostatkem znalostí okrajových a počátečních podmínek či efekty nodalizace. [9]

1.2 Oblasti aplikace

Systémové kódy jsou považovány za multifyzikální výpočetní programy schopné simulovat 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).

1.3 Výhody a nevýhody SYS-TH kódů

Většina užívaných systémových kódů má možnost volné nodalizace jednotlivých termohydraulických součástek. K popisu komplexního 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 [9].

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 modely škrcení, nucené proudění podchlazené či nasycené kapaliny nebo nastavení ztrátového součinitele v případě trubek či pístů [9].

Kód RELAP5 byl vyvinut jakožto systémový "best-estimate" kód pro popis PIE (postulovaných iniciačních událostí) na lehkovodních reaktorech. Množství experimentálně určených vztahů použitých při vývoji kódu RELAP5 bylo odvozeno a stanoveno pro využití na energetické reaktory, avšak cílem mnohých studií (např. [11, 2]) je aplikace i na výzkumné reaktory [5]. Pro většinu výzkumných reaktorů je důležitý správný popis odvodu tepla jak pro dlouhodobou přirozenou konvekci, tak při LOFA havárii (loss of flow accident). Velký vliv může mít právě strukturalizace celého modelu a nodalizace jednotlivých součástek.

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 [12]. Z [8] 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

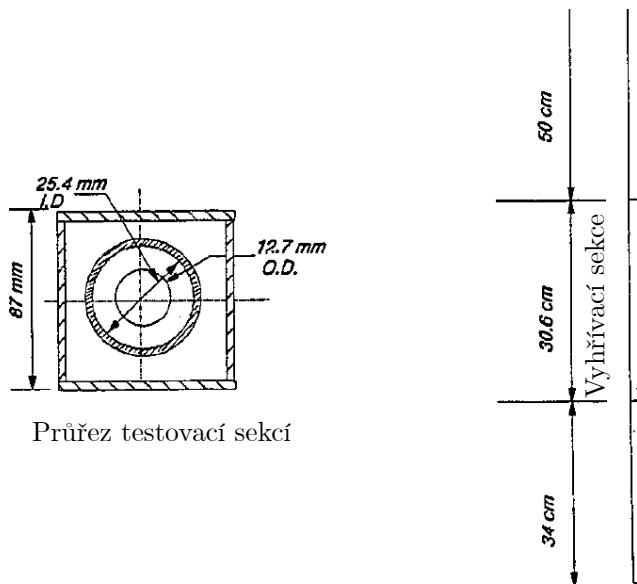
Experimenty popisované v [12] se týkaly podchlazeného varu a kondenzace ve vertikálním kanálu. Postup zahrnoval cirkulaci vody kanálem, která byla před vstupem do průtočného kanálu v podchlazeném stavu s teplotou pod bodem varu. Poté byla kapalina ohřívána konstantní rychlostí a tepelný tok byl měřen 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.

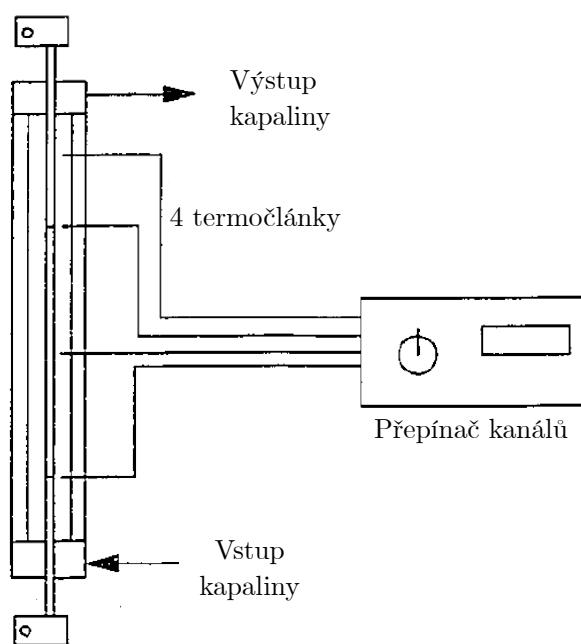
Během experimentu byly rovněž použity vysokorychlostní kamery, které pořizovaly snímky procesů varu a kondenzace uvnitř kanálu. To umožnilo podrobnější analýzu příslušných mechanismů přenosu tepla, jako například průběh dutinového koeficientu.

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 [12].

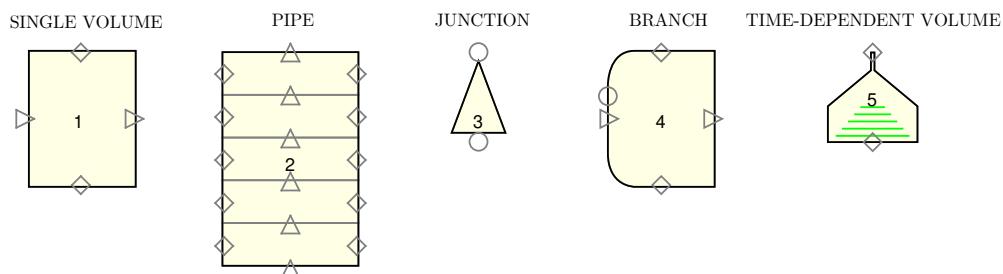


Obrázek 2.2: Testovací smyčka [12].

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 [3].



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 [9]:

- 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.

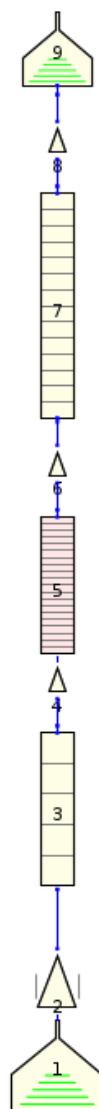
Důležitým aspektem při popisu komplexního problému je propojení jednotlivých součástek, které může mít značný vliv na výsledné proudění. Pro nevhodně strukturovaných propojeních může docházet např. k různým obtokům, protiproudům či cirkulacím. Systémové kódy ve většině případů nabízejí model vytvořit z jednoduchých komponent, a proto je nutné při tvorbě modelu použít „inženýrský odhad“ a využít zkušenosti uživatele [9].

2.3 Model v RELAP5

Cílem této sekce je představit zjednodušený model experimentální sestavy popsané v [12].

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 [12] 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 [12].

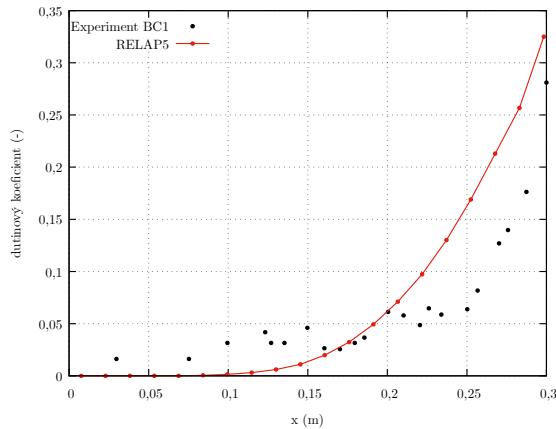
experiment	P (W)	G (kg/m ² s)	p _{in} (kPa)	T _{in} (K)	p _{out} (kPa)
BC1	2607	161,2	114	363,75	103,15
BC7	5869	208,05	114	356,65	103,15
BC9	5925	485,34	132	361,85	121,14
BC13	7366	348,94	137	361,15	126,13

2.4 Výsledky experimentů a výpočtu

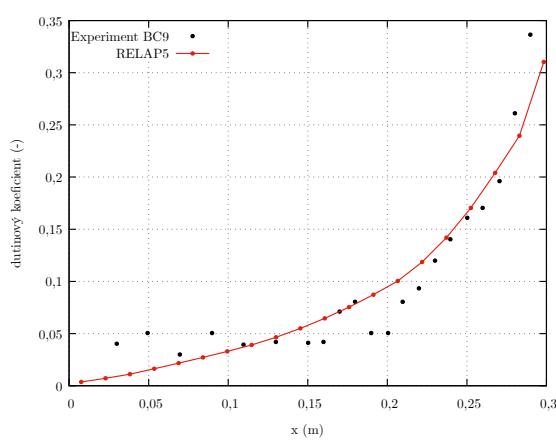
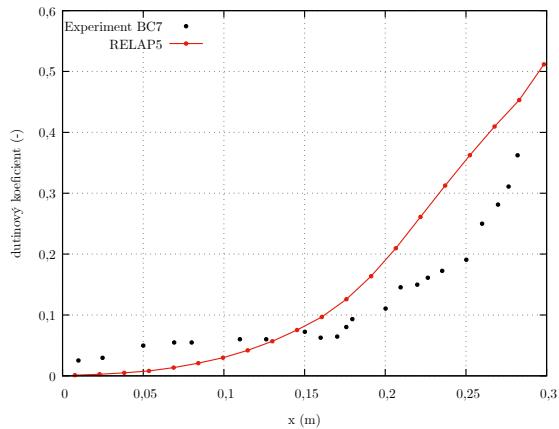
Na Obr. 2.5, 2.6, 2.7 a 2.8 jsou vykresleny průběhy dutinového koeficientu v vyhřívané sekci testovací trubice. Ve všech případech je možné rozdělit oblasti na silně podchlazenou oblast („Highly subcooled region“) a slabě podchlazenou oblast („Low subcooling region“). Přechod mezi těmito regiony je nazýván „Onset of significant void“ a ve všech případech je situován ve výšce okolo 0,2 m [8].

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.

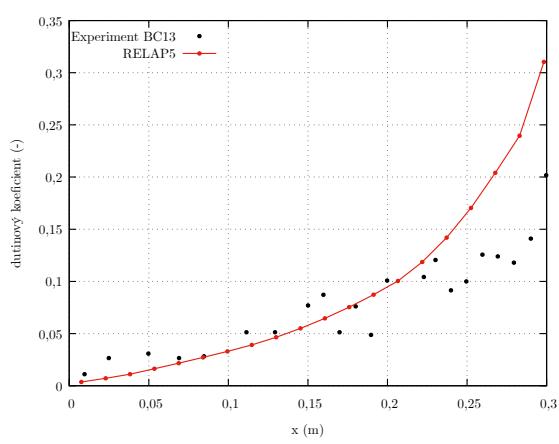
Při porovnání dutinového koeficientu vycházejícího z modelu 2.4 a výsledků z [8] lze pozorovat obdobné odchylky od experimentálních dat. Přestože se jedná o rozdílný model a rozdílnou verzi programu RELAP5, tak lze vytvořený model považovat za dostatečně přesný.



Obrázek 2.5: Srovnání dutinového koeficientu - exp. BC1.
Obrázek 2.6: Srovnání dutinového koeficientu - exp. BC7.



Obrázek 2.7: Srovnání dutinového koeficientu - exp. BC9.
Obrázek 2.8: Srovnání dutinového koeficientu - exp. BC13.



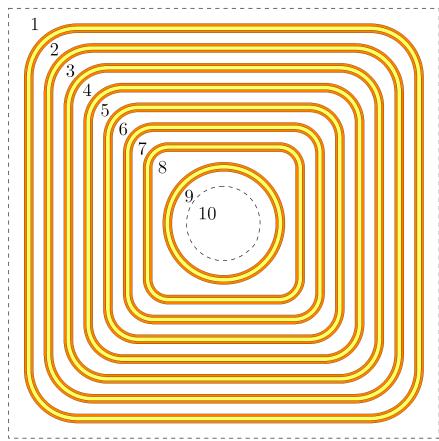
Kapitola 3

Termohydraulický model palivového článku IRT-4M

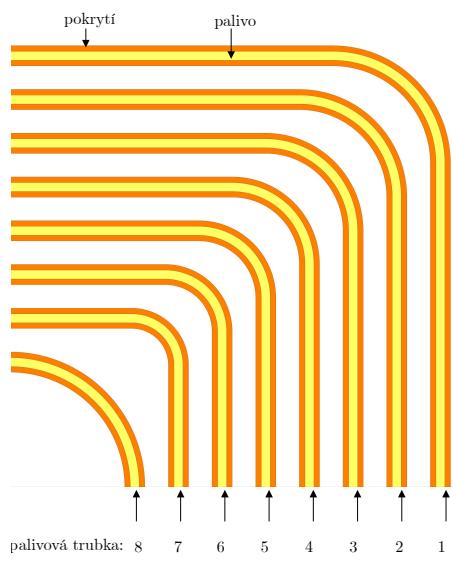
Pro vytvoření termohydraulického modelu školního reaktoru VR-1 byl použit program RELAP5, přičemž samotná tvorba byla rozdělena do několika sekcí. Jelikož možnosti modelování různých geometrií jsou v programu RELAP5 značně omezené, pro správnou interpretaci a zachování fyzikálních dějů byl nejdříve vytvořen 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

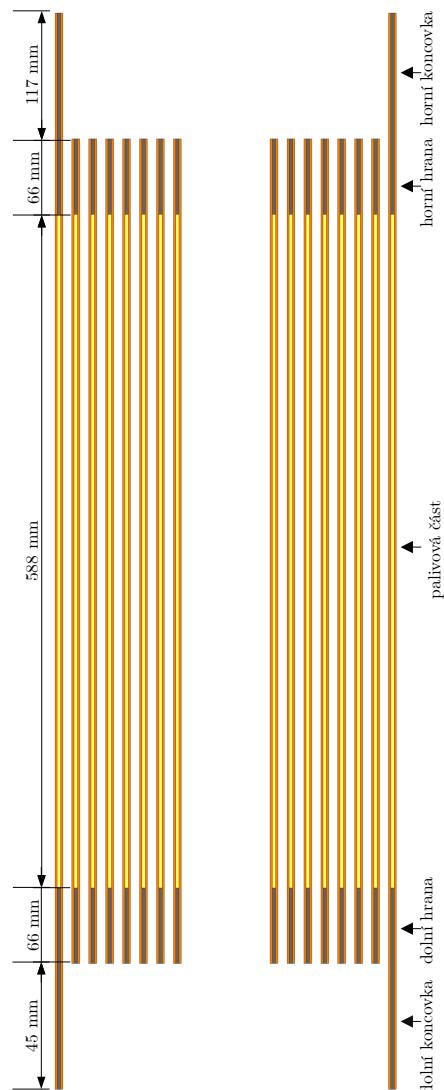
Palivo IRT-4M je tvořeno 8, 6 nebo 4 koncentrickými čtvercovými trubkami se zakulacenými rohy s možností vložení vytěsnitele pro rovnoměrnější průtok. Geometrie a konstrukce použitá pro vytvoření modelu vychází z dokumentu [13]. Na Obr. 3.1 a 3.3 je vykreslen radiální a axiální průřez 8-trubkovým palivem 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).



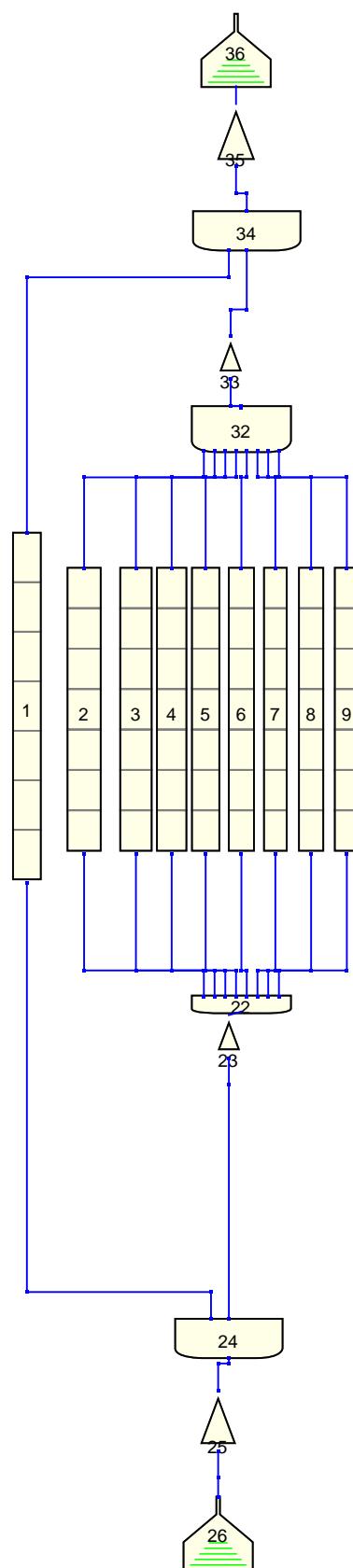
Obrázek 3.1: Radiální řez palivovým článkem IRT-4M.



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 [4], 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 [13] (výsledky jsou označeny jako referenční).

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

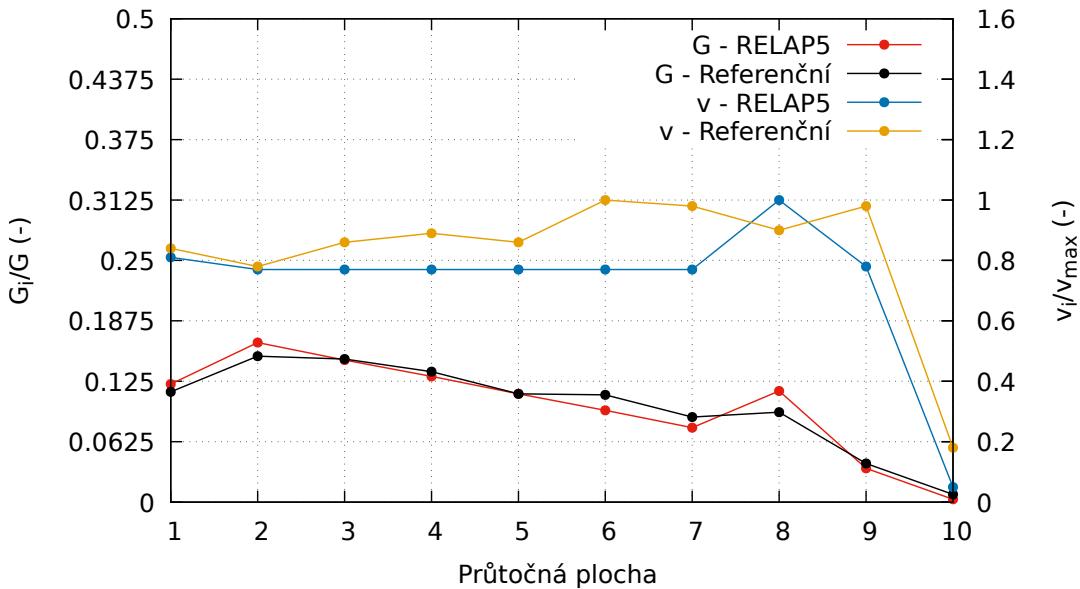
Průtočná plocha	G_i/G (-)					
	8-trubkový PČ		6-trubkový PČ		4-trubkový PČ	
	RELAP5	Referenční	RELAP5	Referenční	RELAP5	Referenční
1	0,122	0,114	0,145	0,130	0,182	0,173
2	0,165	0,151	0,194	0,173	0,243	0,229
3	0,147	0,148	0,174	0,170	0,218	0,224
4	0,130	0,135	0,153	0,155	0,192	0,205
5	0,112	0,112	0,132	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

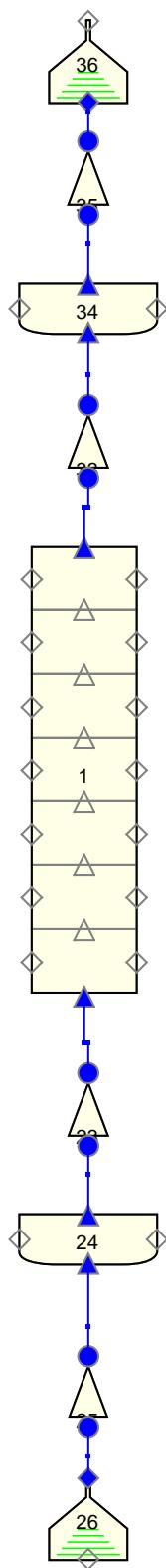
V aktivní zóně reaktoru VR-1 je okolo 16 palivových článků, což dává okolo 160 průtočných kanálů (při uvažování 8-trubkových PČ S vytěsnitelem) pro celý model reaktoru. Pro lepší použitelnost modelu při výpočtech obsahujících externí 3D kinetiku je vhodnější vytvořit zjednodušený model palivového článku 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:

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

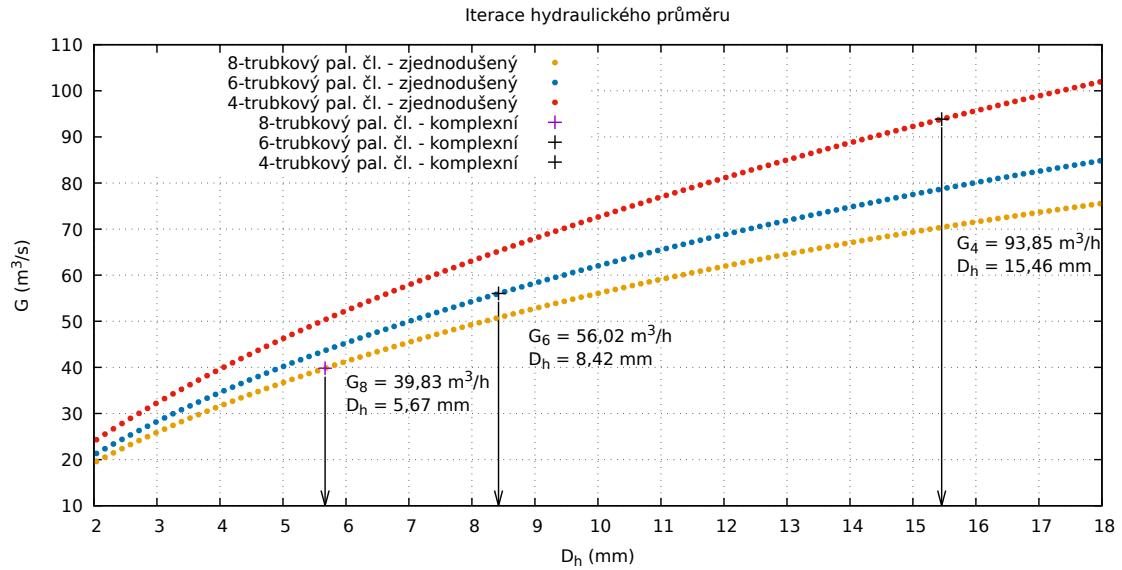
kde S , resp. o je celková průtočná plocha, resp. celkový omočený obvod palivového článku. Následně byl průměr iterován pro získání průtoku z komplexního modelu viz Obr. 3.7. Zjednodušený hydraulický model PČ uvedený na Obr. 3.6 je v následujících kapitolách využit k vytvoření termohydraulického „jednotkového“ 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 k situaci nuceného proudění na reaktoru VR-1 nedochází a je nutné vytvořit model, který bude co nejlépe popisovat jak přirozené proudění skrz PČ, tak i chování zdroje tepla. Z [4] 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 modelu byla pro samotný PČ převzata geometrie 3.4, u zjednodušeného pak geometrie 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 [4]. Rozměry jednotlivých HS komponent jsou uvedeny v tabulce 3.5. Při přechodu z komplexního na zjednodušený model je třeba ověřit zachování fyzikálních veličin [4]:

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

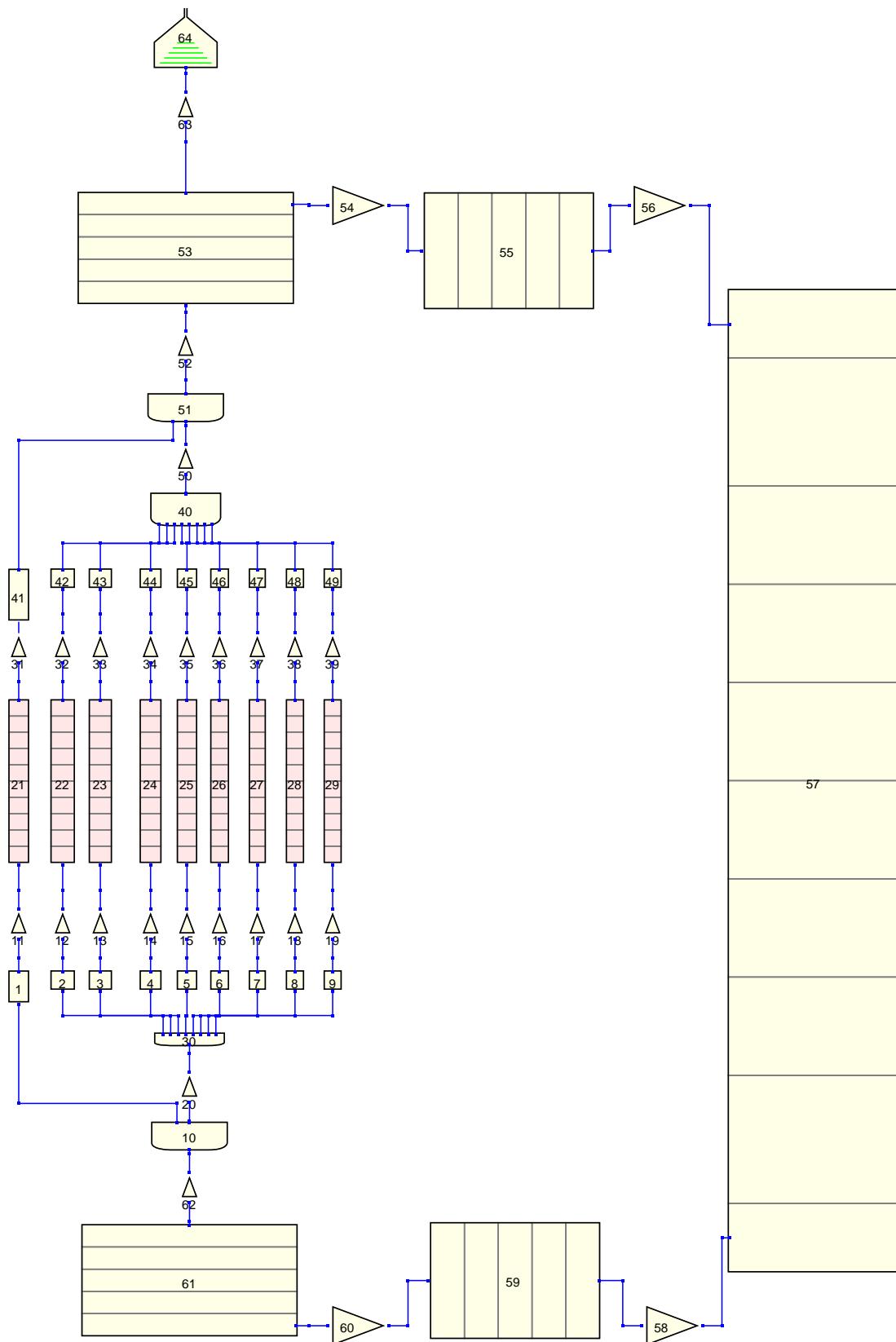
Pro ohřev vody v PČ můžeme předpokládat následující zjednodušený vztah:

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

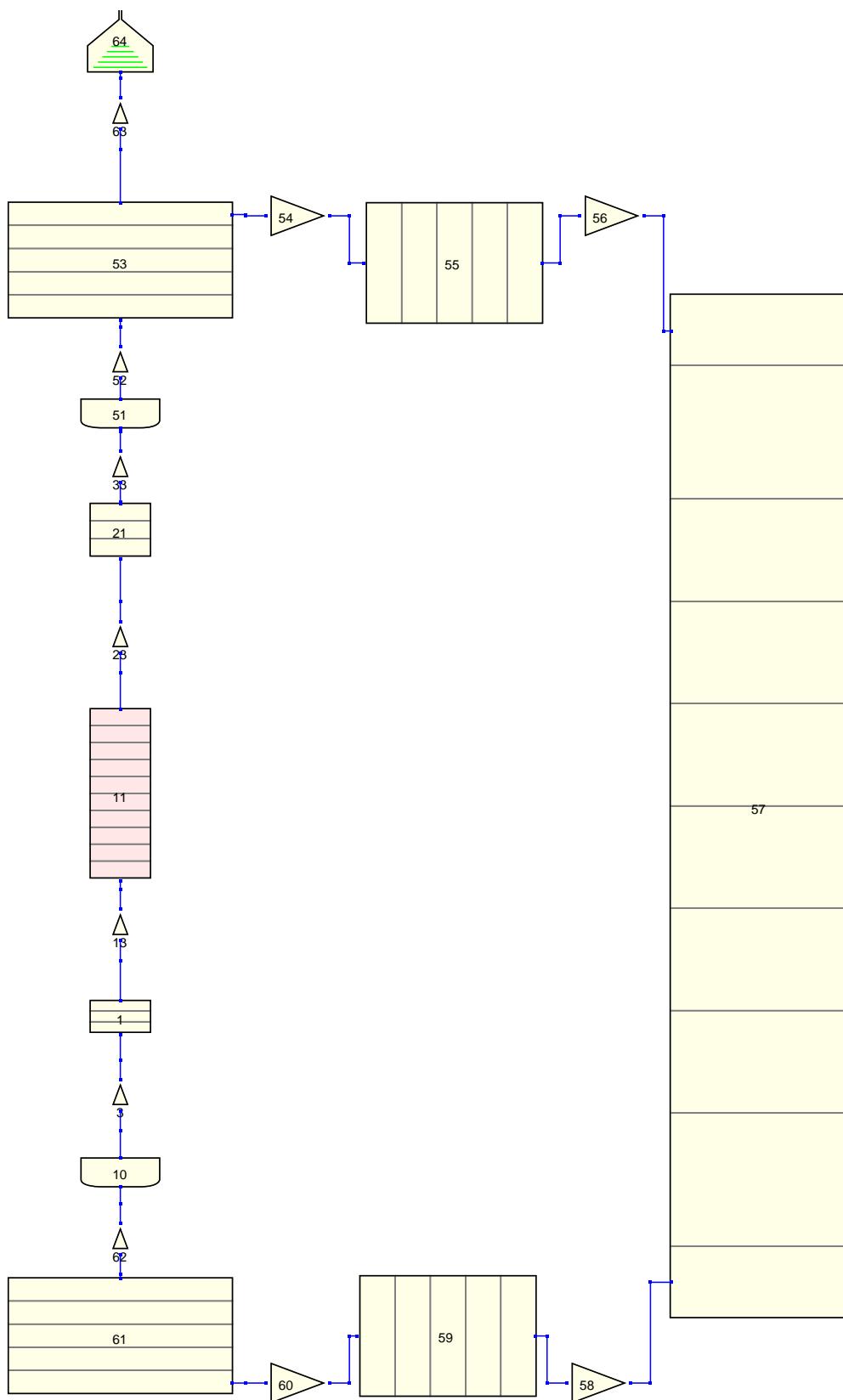
kde Q (W) je tepelný výkon, ρ (kg/m^3) je hustota, c_p ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$) měrná tepelná kapacita a A (m^2) je průtočná plocha. Pro termohydraulický model bude uvažováno rovnoměrné rozložení výkonu a rozložení výkonu vycházející z programu Serpent2. Jelikož je celkový výkon pro obě rozdělení 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).



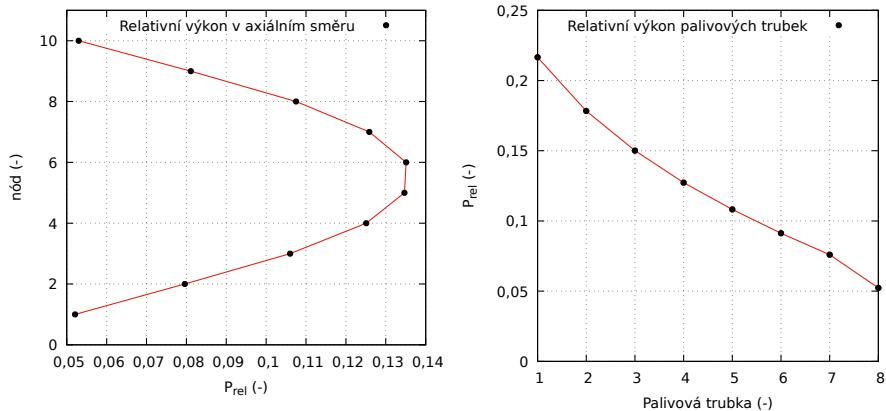
Obrázek 3.9: Termohydraulický zjednodušený model 8-trubkového PČ IRT-4M bez vytěsnitele (Pro lepší vizualizaci byly měřítka komponent 53-62 změněna).

Pro vytvoření zdroje tepla v PČ byl uvažováno rovnoměrné rozdělení výkonu a rozdělení dle výpočetního programu Serpent2. V obou případech byl studován průtok, ohřev a výskyt povr-

chového 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 byla uvažována ve shodě s nodalizací trubek 21-29 viz Obr. 3.8, resp. trubky 11 viz Obr. 3.9. V axiálním směru byla každá HS rozdělena na 10 nódů, přičemž zlomek celkového výkonu každé palivové trubky byl odlišný.

3.4 Sjednocení průtočných kanálů

Cílem následujícího textu je popsát 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.

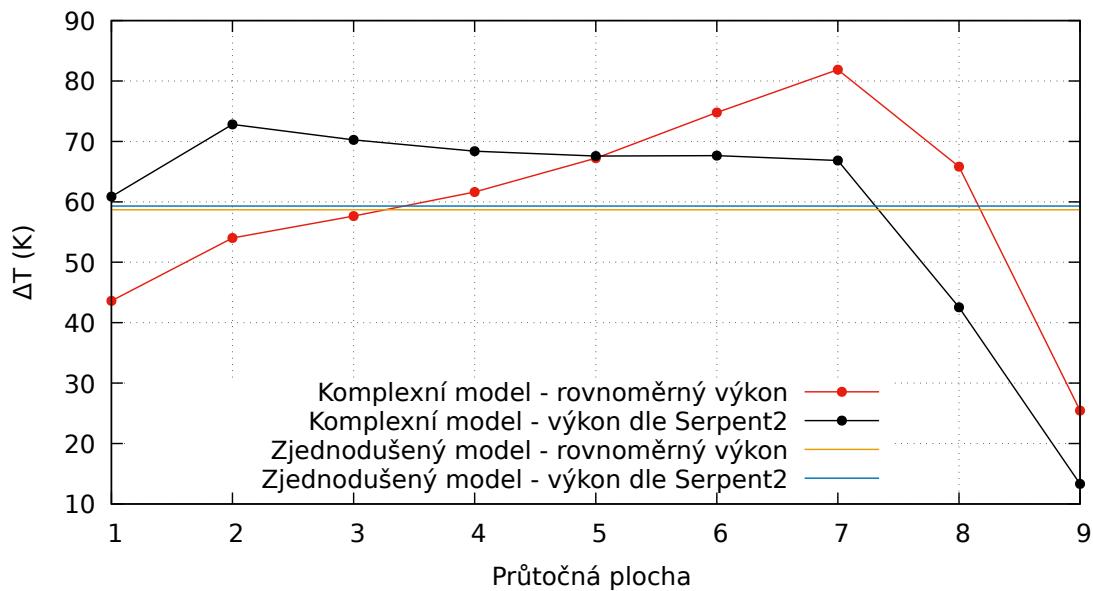
Rozložení výkonu & Model	G (m ³ /h)
Rovnoměrný výkon - komplexní model	2,246
Serpent2 - komplexní model	2,247
Rovnoměrný výkon - zjednodušený model	2,262
Serpent2 - zjednodušený model	2,261

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 ohřev na výstupu ze zjednodušeného modelu vykresle po celé délce grafu pro porovnání s komplexním modelem. Maximální kanál v případě rovnoměrného rozdelení odpovídá trubce 27, což je stejný výsledek jako v [4]. V případě rozdelení dle programu Serpent je maximální ohřev v trubce 22. Celkově ovšem výsledky korespondují s [4].

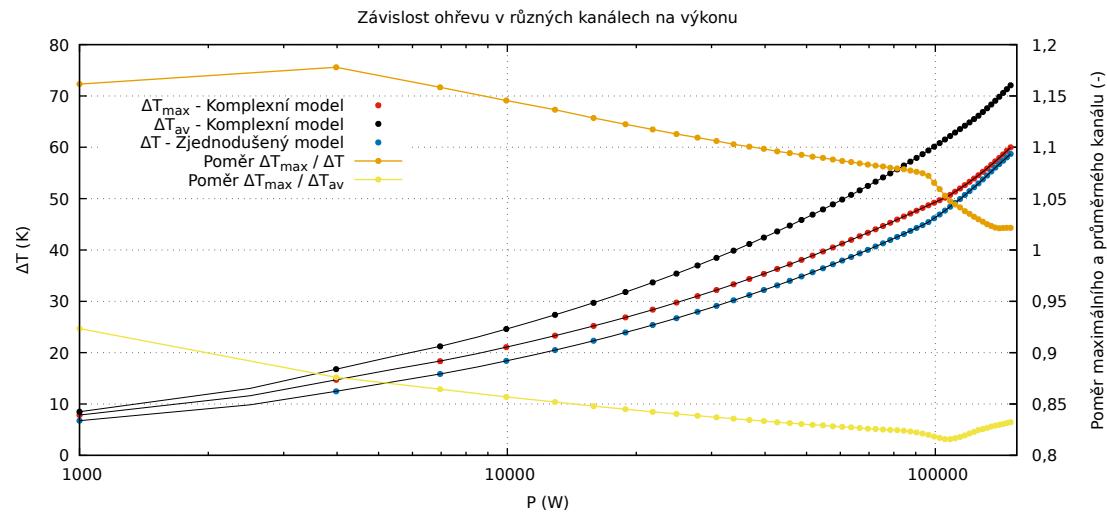
Z Tab. 3.8 a Obr. 3.12 a 3.13 lze soudit, že nejtíživějším problémem při sjednocení trubek do zjednodušeného kanálu je právě ztráta informace o maximální teplotě ohřevu. Proti této ztrátě hraje fakt, že podíl rozdílu teplot v maximálním kanálu a zjednodušeném modelu zůstává pro naprostou většinu výkonů 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.



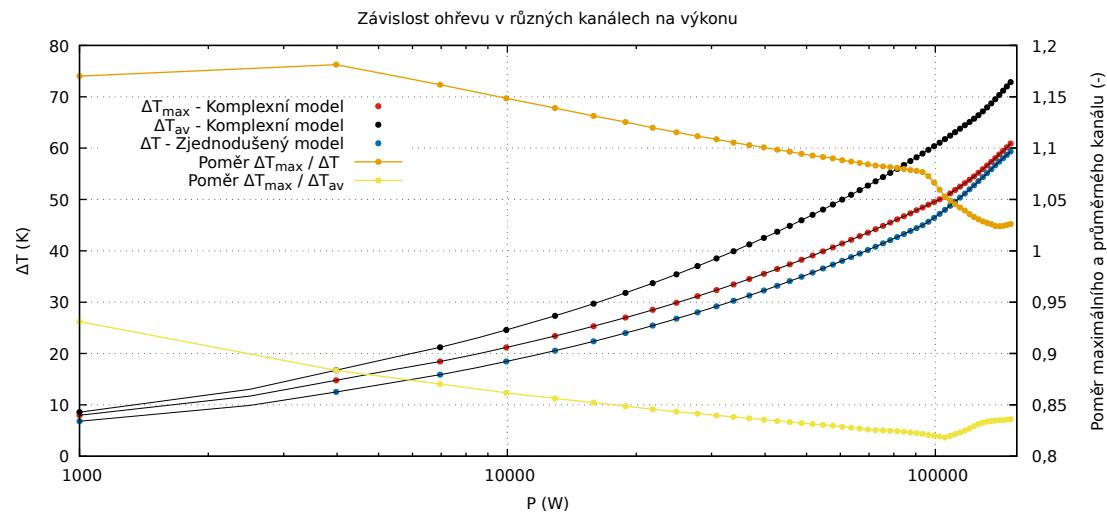
Obrázek 3.11: Ohřev na výstupu z jednotlivých kanálů pro jednotlivé modely.

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	42,55	13,3
RV - JM	58,68								
S - JM	59,31								



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. Jak již bylo avizováno, tak při rozdelení 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.

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

Obrázek 3.14: Komplexní model

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

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).

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

Obrázek 3.17: Komplexní model

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

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 nenaznačuje žádný velký problém pro další použití. Největším problémem je právě ztráta informace o maximálním ohřevu, což může být do jisté kompenzováno již zmínovaným „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 [4, 10].

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 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 je uvedena geometrie sjednocené topné komponenty. Tato HS je využitá jakožto zdroj tepla pro PČ v modelu VR-1. Zjednodušený model PČ s sjednocenou HS bude označován jako „jednotkový model“. Rozdíl zjednodušeného a jednotkového modelu je pouze v HS, geometrie trubek a obtoku zůstává stejná.

Tabulka 3.9: Geometrie sjednocené HS.

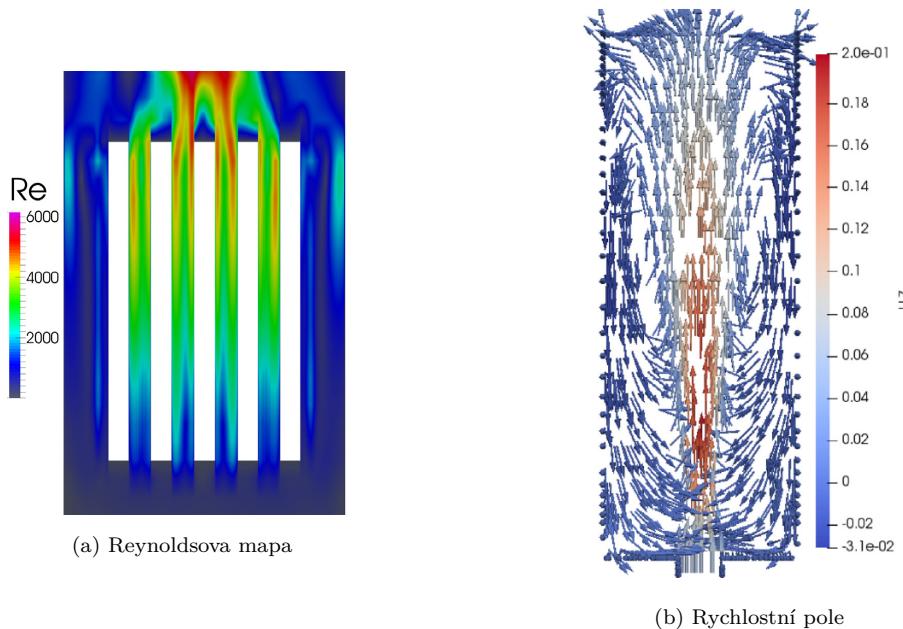
r_o (mm)	210,11
r_i (mm)	207,82
h (mm)	588

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 **modelu samotného reaktoru**. U výzkumných reaktorů bazénového typu, jako je VR-1 a TRIGA, může být model reaktoru rozšířen o reaktorovou nádobu, aby bylo možné odhadnout celkový průtok skrze zónu [7]. Cílem této kapitoly je popis termohydraulického modelu školního reaktoru VR-1 a zkoumat vliv nodalizace obtoku na přirozené proudění.

Na obr. 4.1a byla pomocí CFD kódu vypočítána 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 příloha, obrázek C.1). 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 inverzi proudění a tvorbě **smyček**. Tento důvod se tato kapitola soustředí na popis této oblasti (viz obrázek 4.2). Dále je oblast nad aktivní zónou popsána jako "horizontální obtok" a komponenta 44 jako "vertikální obtok".



Obrázek 4.1: CFD výpočet přirozeného proudění skrz reaktor TRIGA MARK I [7].

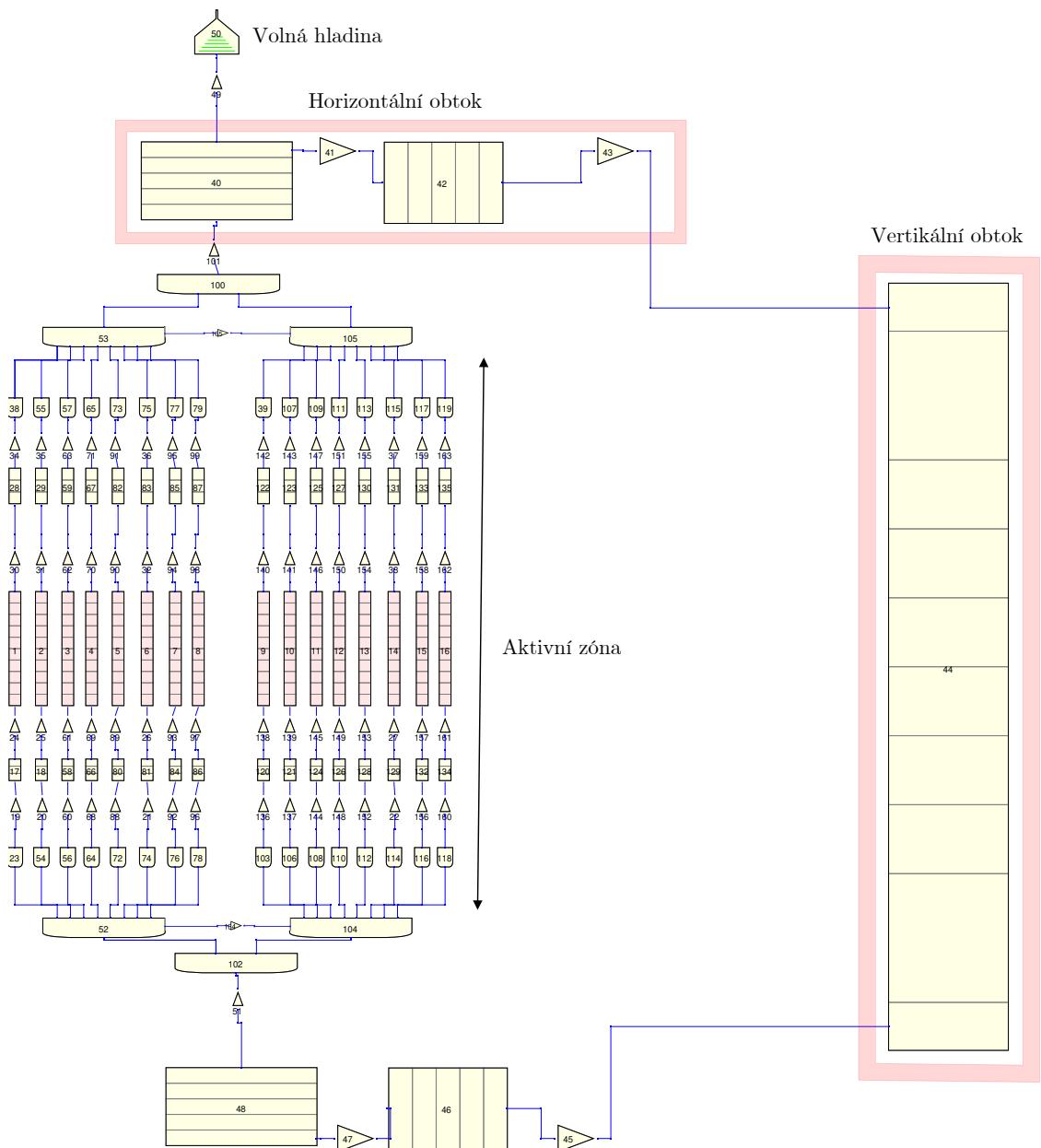
4.1 Referenční model

Oproti předchozí práci [4] byl při tvorbě modelu školního reaktoru VR-1 upuštěno od konceptu dvoukanálového uspořádání, který využíval "průměrný" a "maximální" kanál pro reprezentaci aktivní zóny reaktoru. Místo toho byla aktivní zóna složena z 16 palivových článků (PČ), z nichž každý byl reprezentován jednotkovým modelem (viz sekce 3.5). Kvůli omezenému počtu připojitelných

 komponent byla aktivní zóna reprezentována dvěma skupinami trubek po osmi PČ, které byly propojeny spojovací jednotkou BRANCH. Pro jednoduchost byly všechny jednotkové modely založeny na 8-trubkovém PČ bez vytěsnitele, přičemž rozložení výkonu jednotlivých PČ odpovídalo tabulce 3.6. Geometrie trubek horizontálního a vertikálního obtoku byla stejná jako v modelu popsáném v obrázcích 3.8 a 3.9, a zapojení komponent 40-48 vycházelo z [4]. Model vytvořený podle obrázku 4.2 byl označen jako „referenční“, resp. jako model NOD0. Nodalizace reaktoru bude podrobněji rozebrána v následujících kapitolách.

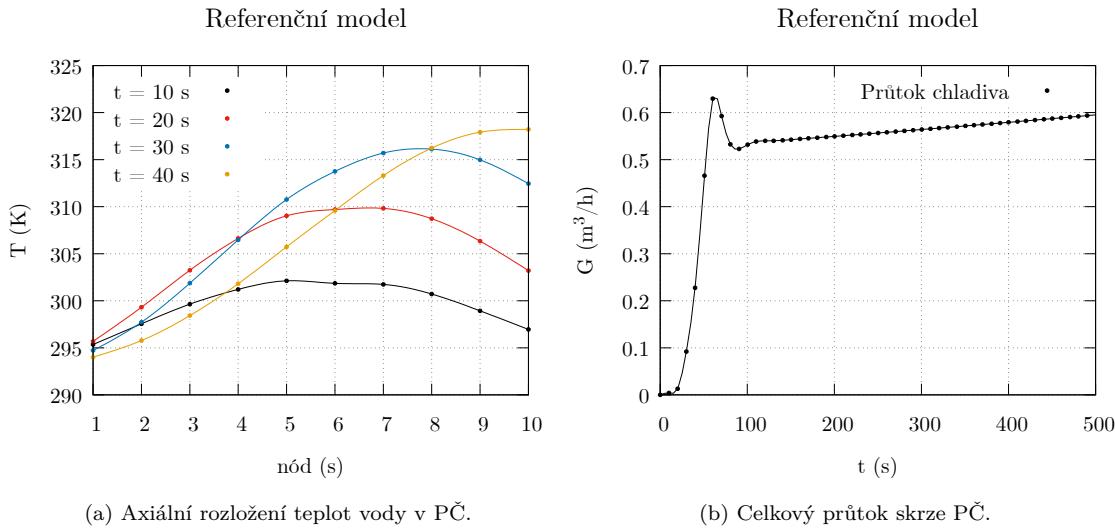
V případě referenčního modelu je horizontální obtok napojen až v posledním nódu trubky 40. Voda je vytlačena z AZ až na úroveň hladiny, kde se odpojuje do horizontálního obtoku. V tomto uspořádání je teplotní gradient mezi výstupem z AZ reaktoru a TDV představující volnou hladinu (tlak $1e5$ Pa a teplota vody 297 K) největší (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 ($1 \cdot 10^3$ W **3**, nárazově $5 \cdot 10^3$ W). Proto bylo v následujícím textu uvažován výkon PČ $10 \cdot 10^4$ W, při kterém je studium přirozené konvekce názornější. Stále se jedná o 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 s výkonem $10 \cdot 10^4$ W. Celkový výkon reaktoru dosahuje 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 $10 \cdot 10^4$ W. Celkový průtok PČ je uveden na obr. 4.3b.



Obrázek 4.2: Termohydraulický model reaktoru VR-1.

4.1.1 Výsledky



(a) Axiální rozložení teplot vody v PČ.

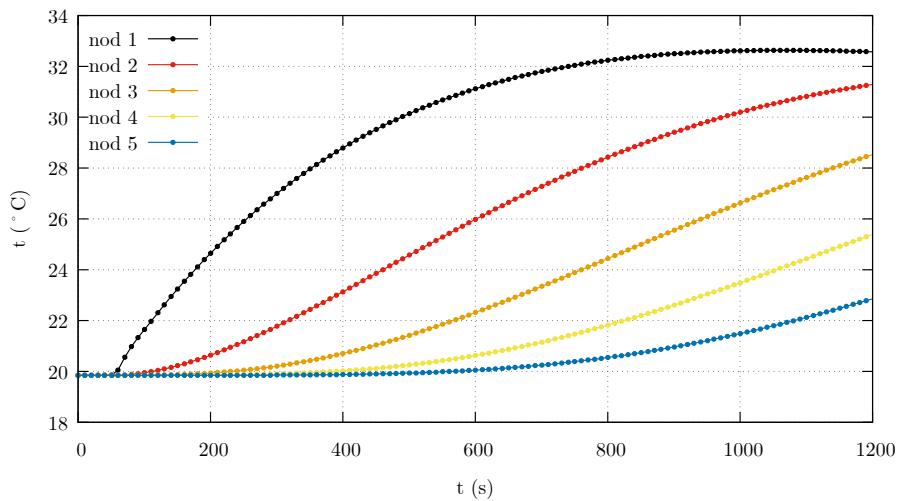
(b) Celkový průtok skrze PČ.

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

Na obr. 4.3a 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 zhruba o 1 nód za 10 s v důsledku vzniku přirozené konvekce. **Toto posunutí vede ke snížení teploty v dolní části palivového článku vlivem promíchávání se vstupním 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.

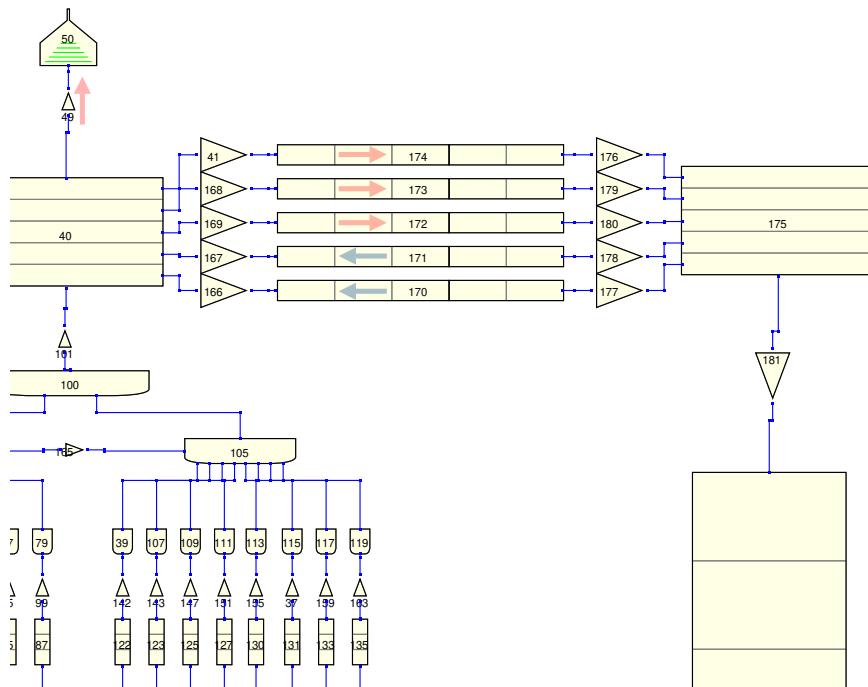
Na obrázku 4.4 jsou zobrazeny teploty v trubce 40 pro jednotlivé nody. Teplota v nódru 1 se po 800 s ustálí, přičemž dochází k postupnému ohřevu výše položených nódů. **Nicméně, jelikož model nezahrnuje odvod tepla, není jisté, jak by vypadalo rozložení teplot po delší době než 1200 s, a jestli by takový výpočet měl fyzikální význam.** Podrobnější rozložení teplot je popsáno v příloze na obrázcích C.8a až C.10b.



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

4.2 Model NOD01

V referenčním modelu reaktoru VR-1 v programu RELAP5 byla při simulaci **vlivu tepla na aktivní zónu** předpokládána absencie recirkulace ve volném objemu nad AZ. V tomto modelu byla ohřátá voda nucena proudit až na úroveň vodní hladiny, kde se odpojila. **Avšak** ve skutečnosti může dojít k odpojení vody v libovolné výšce objemu nad aktivní zónou. Z tohoto důvodu byla trubka 42 nahrazena pěti horizontálními trubkami (trubka 170-174) viz obr. 4.5, přičemž celkový objem těchto trubek zůstal zachován. Kompletní model je prezentován na obr. C.4 v příloze.



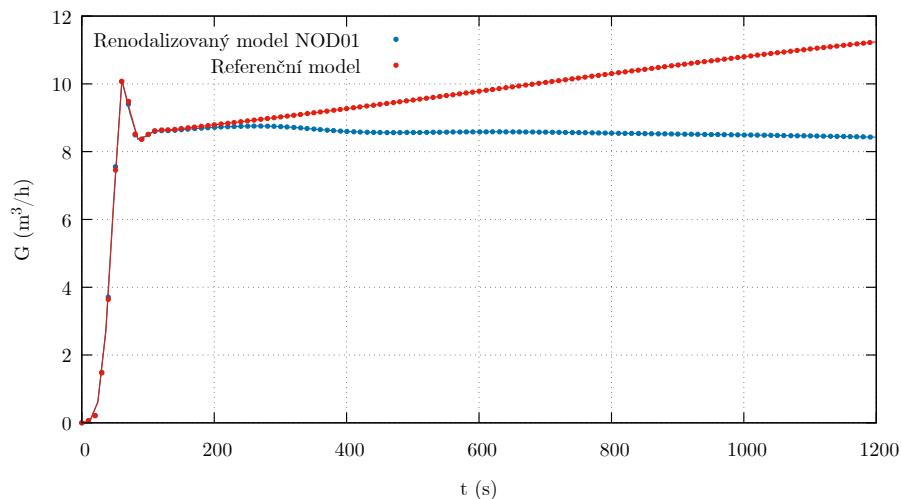
Obrázek 4.5: Nodalizace horizontálního obtoku - model NOD01

4.2.1 Výsledky

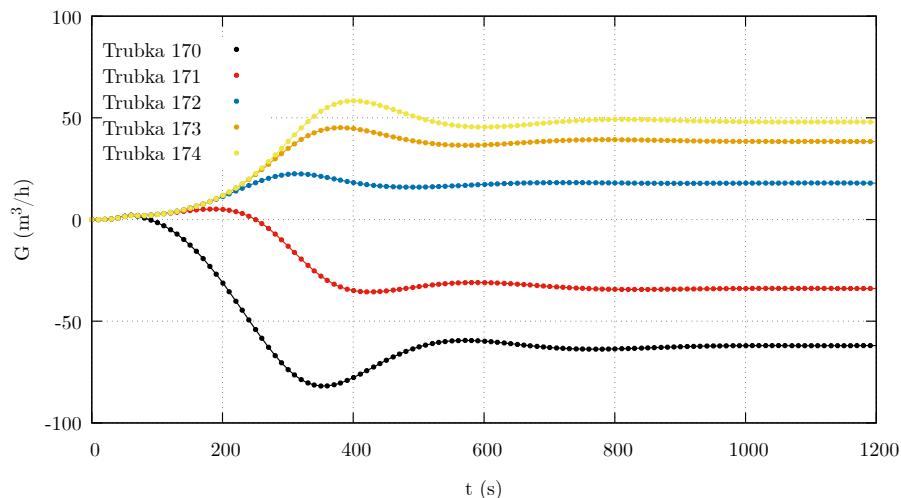
Z předchozího textu vyplývá, že hlavními sledovanými parametry pro srovnání referenčního a renodalizovaného modelu jsou celkový průtok skrze aktivní zónu, průtok skrze jednotlivé trubky horizontálního obtoku a rozložení teplot chladiva v trubce 40.

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 rychlosí. Při pozorování horizontálního obtoku se ukazuje, že na rozdíl od referenčního modelu dochází k inverzi proudění v trubkách 170 a 171. Ohřáté 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.

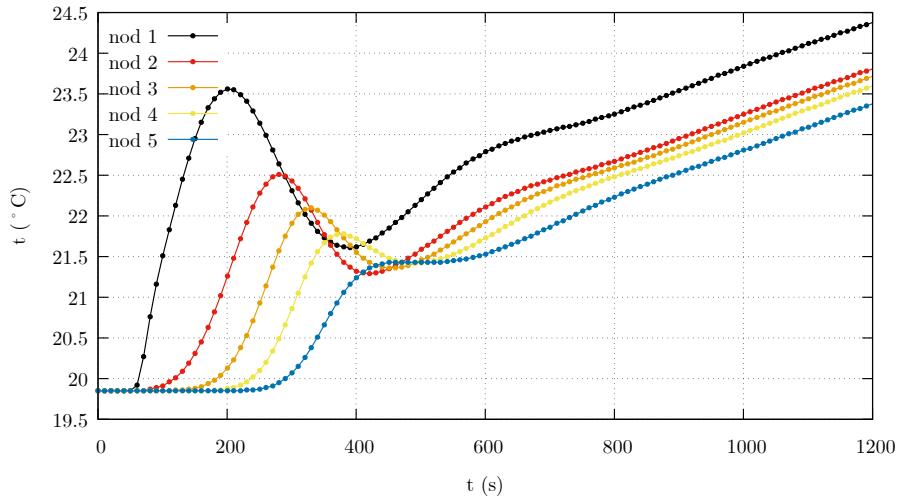
Toto promíchání chladiva s ochlazenou kapalinou vstupující z trubek 170 a 171 má vliv na rozložení teplot v objemu trubky 40 viz příloha obr. C.8a až C.10b. Renodalizovaný model NOD01 tak více odpovídá reálné situaci. Nicméně, je třeba zmínit, že model NOD01 neobsahuje funkci **odvodu tepla**, což má 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.

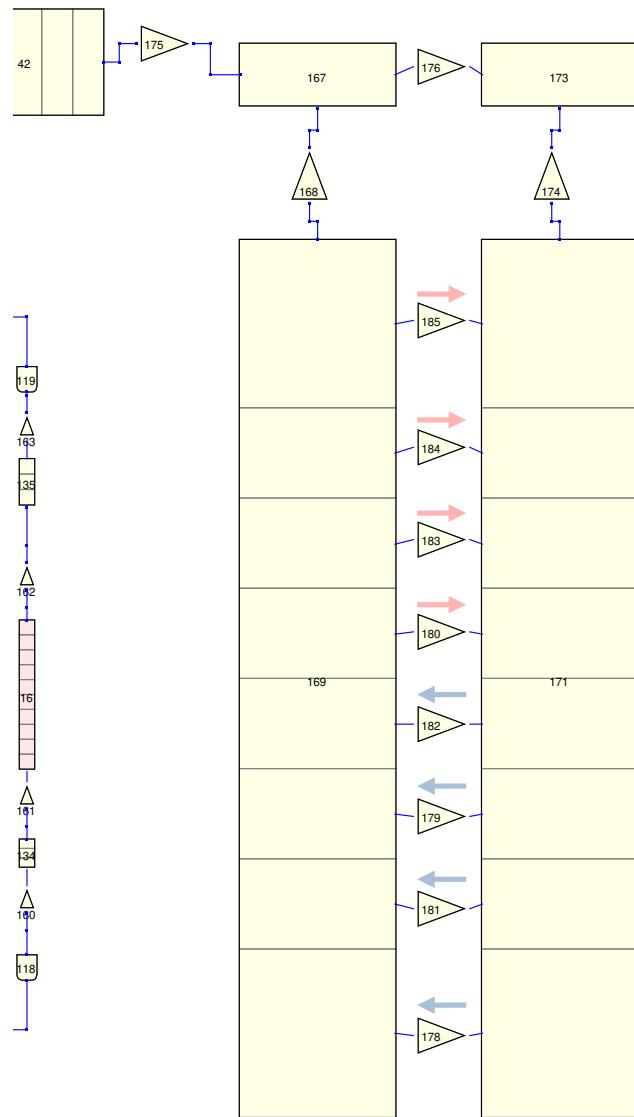
4.3 Model NOD02

Druhý renodalizovaný model s označením NOD02 byl konstruován za účelem zkoumání 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. Vertikální obtok sestaven symetricky, přičemž celkový objem trubek a kontrolních objemů je zachován. Trubka 44 v referenčním modelu byla nahrazena párem propojených trubek s označením 169 a 171, které umožňují vzniku přičného proudění a redistribuci průtoku ve vertikálních trubkách.

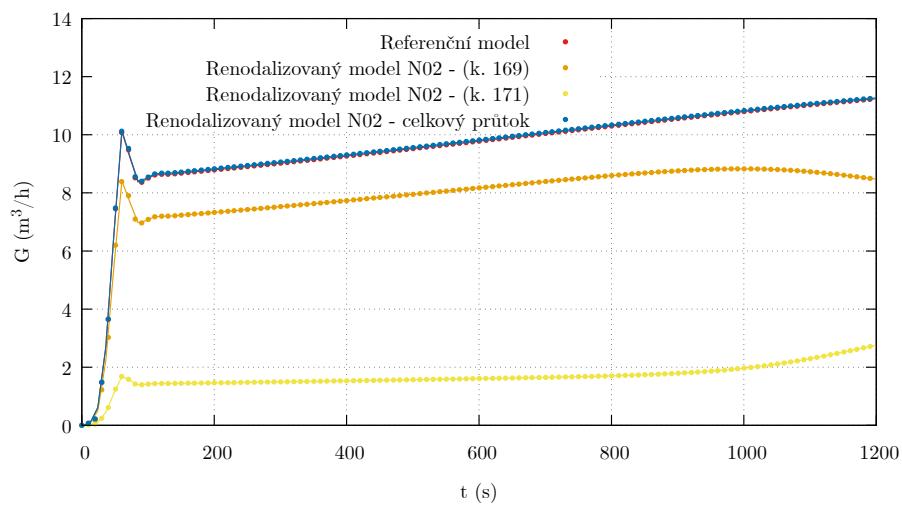
4.3.1 Výsledky

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). Tento fakt naznačuje, že ani v jedné trubce nebude kladný směr proudění. Je očekávána různý průtok skrze SJ 178 až 185, a to v obou směrech. Z předchozích výpočtů je možné odhadovat, že bude existovat kladný průtok skrze výše položené spojovací jednotky a záporný průtok v níže položených jednotkách. Průtok v SJ a v trubkách 169 a 171 je zobrazen na obrázcích 4.11 a ???. Obrázek 4.10 a 4.11 poukazují na nestabilitu modelu NOD02. Průtok jednotlivými SJ mezi trubkou 169 a 171 se po ustálení drží konstantní hodnoty. V čase okolo 1000 s ovšem dochází k náhlé redistribuci průtoku, která je neopodstatněná a nedává fyzikální smysl. Ani model NOD02 neobsahuje tepelné ztráty, což nejspíše způsobilo limitní průtok a nestabilitu.

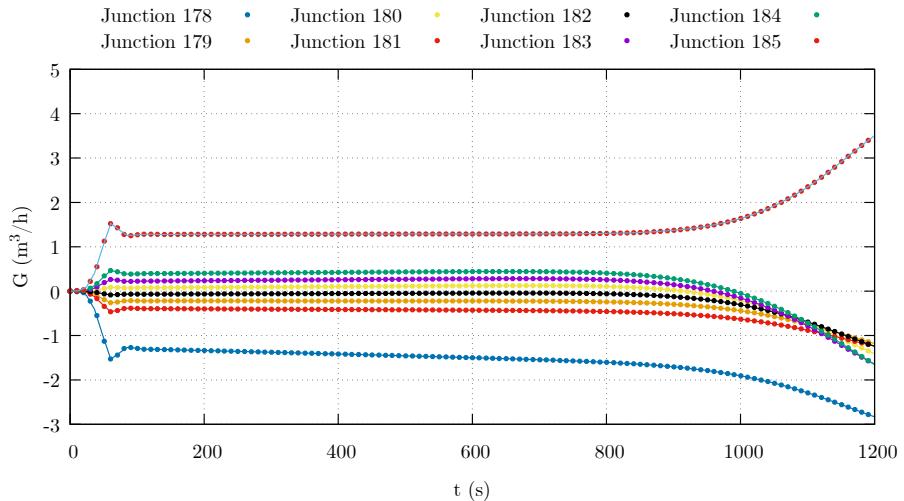




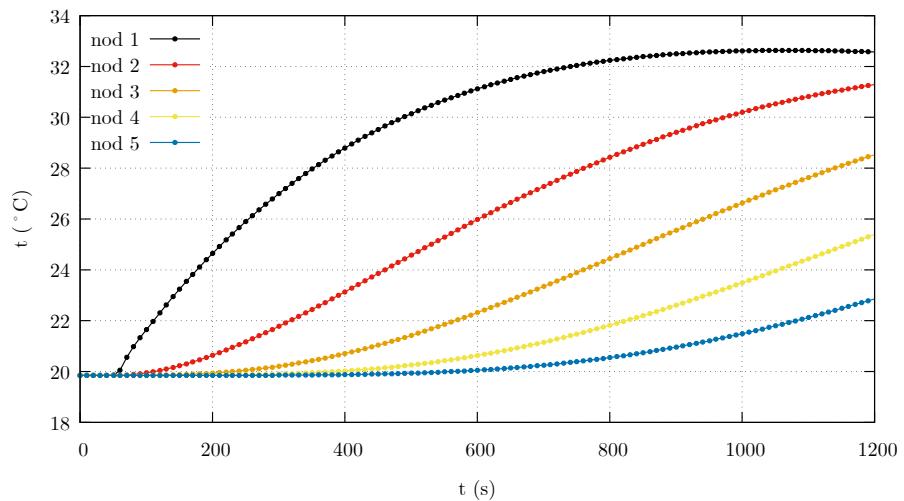
Obrázek 4.9: Nodalizace vertikálního obtoku - model NOD02



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.

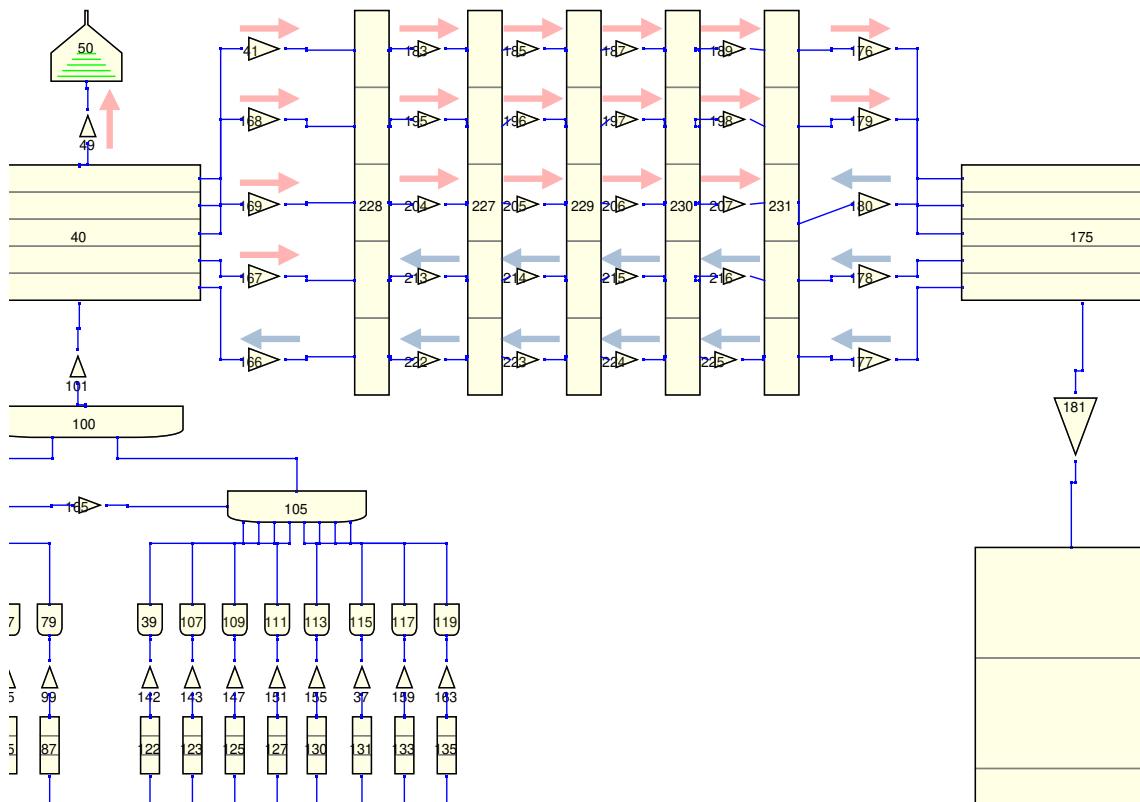


Obrázek 4.12: Teplotní vývoj v trubce 40 - model NOD02.

4.4 Model NOD03

Model reaktoru NOD03 dále rozvíjel možnost vzniku recirkulace ve volném objemu vody nad AZ reaktoru. Horizontálně orientované trubky byly nahrazeny vertikálními, které byly napojeny mezi sebou. Díky tomu se mohla voda pohybovat v každé trubce po celé výšce vodního sloupce nad AZ reaktoru. Model je uveden v příloze na obr. C.6. Objem horizontálního obtoku (součet všech kontrolních objemů) byl i v tomto případě zachován. Konstrukce a výsledné směry proudění jsou ilustrovány na obr. 4.13. Pro lepší orientaci byly spojovací jednotky rozděleny do skupin S1 až S8.

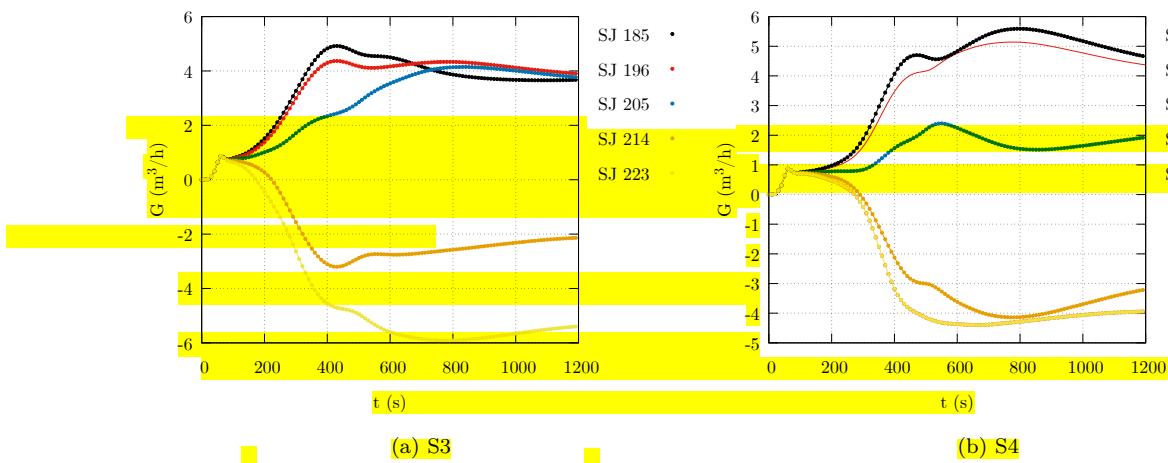
Otázkou je, zda-li jsou dále uvedené výsledky reprezentativní a dávají fyzikální význam. Problematická je stabilita výpočtu, která není zaručena a v případě takto komplexního proudění může docházet k nesprávným řešením.



Obrázek 4.13: Nodalizace horizontálního obtoku - model NOD03

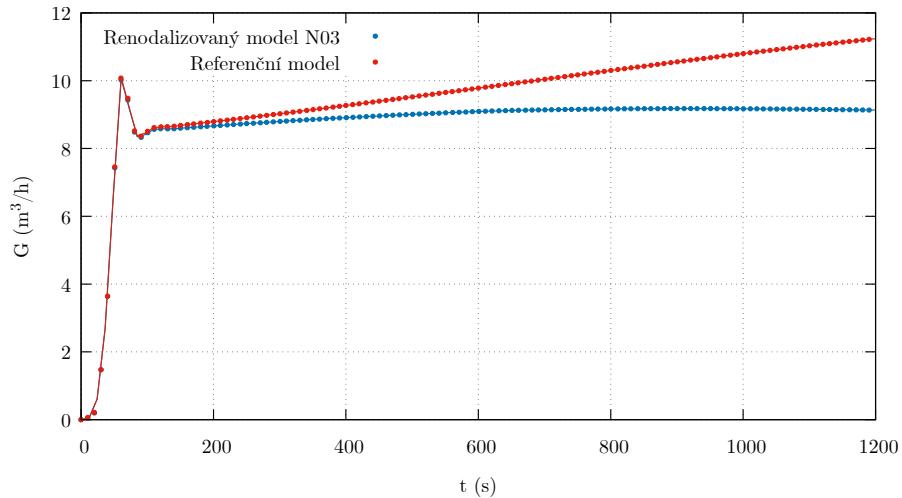
4.4.1 Výsledky

V souladu s předchozími případy je na obrázku 4.15 prezentováno srovnání průtoku skrze zařízení 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 vi obr. C.11a až C.13b.

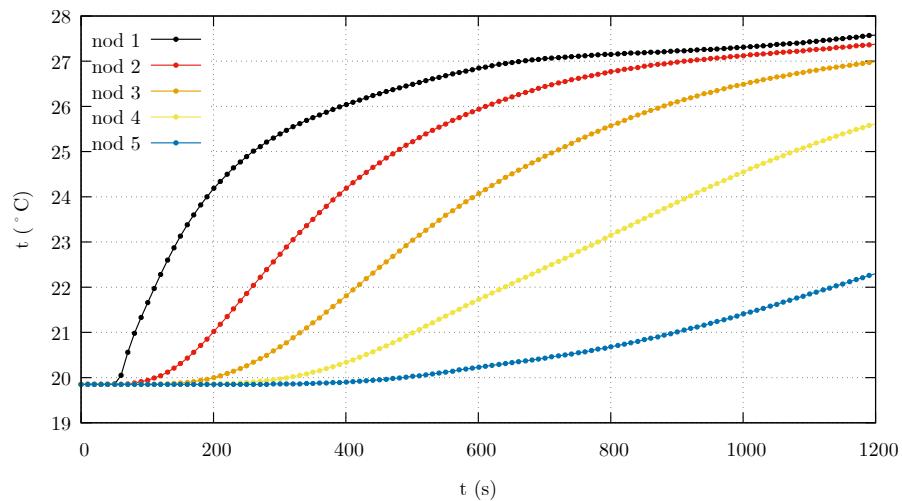


Obrázek 4.14: Průtok skrze jednotlivé SJ (S3 a S4) - model NOD03.

V obrázku 4.16 jsou zobrazeny teplotní vývoje jednotlivých nódů v trubce 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.

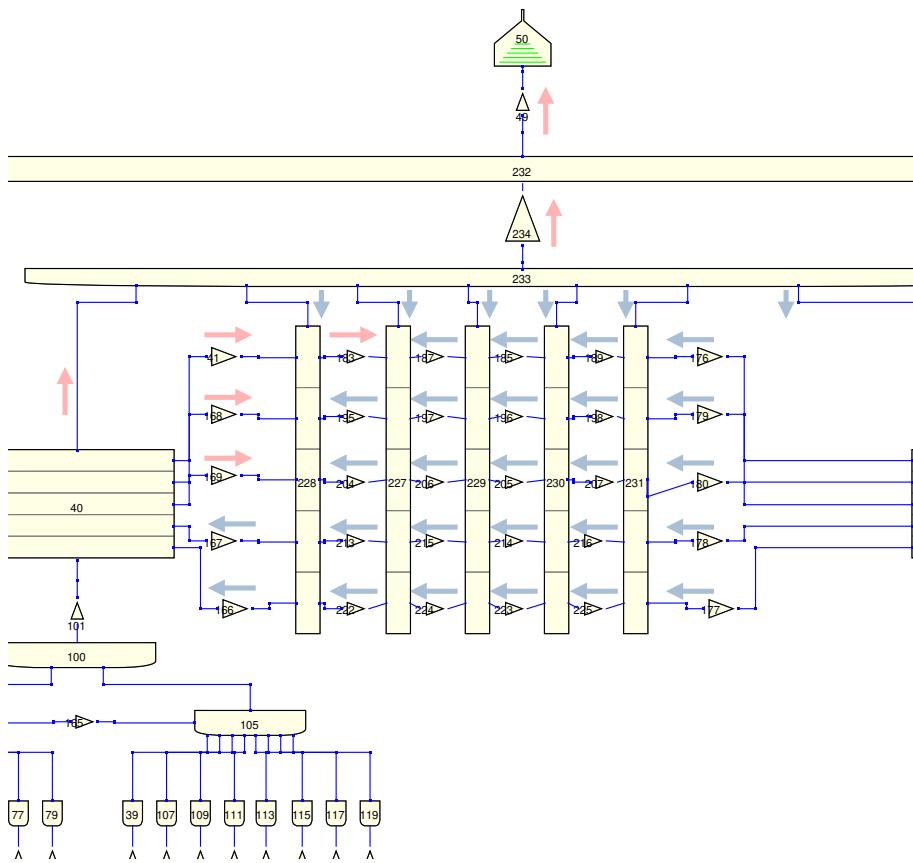


Obrázek 4.16: Teplotní vývoj v trubce 40 - model NOD03.

4.5 Model NOD04

Poslední a nejkomplexnější varianta termohydraulického modelu VR-1 je modifikace modelu NOD03, která částečně vychází z práce [6]. 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 nódru 5 trubky 231 musí projít minimálně dalšími 11 komponentami. Proto byla do modelu přidána vícenásobná spojovací jednotka (BRANCH) 233 a kontrolní objem 232, který propojuje vodní hladinu s celým horizontálním obtokem.

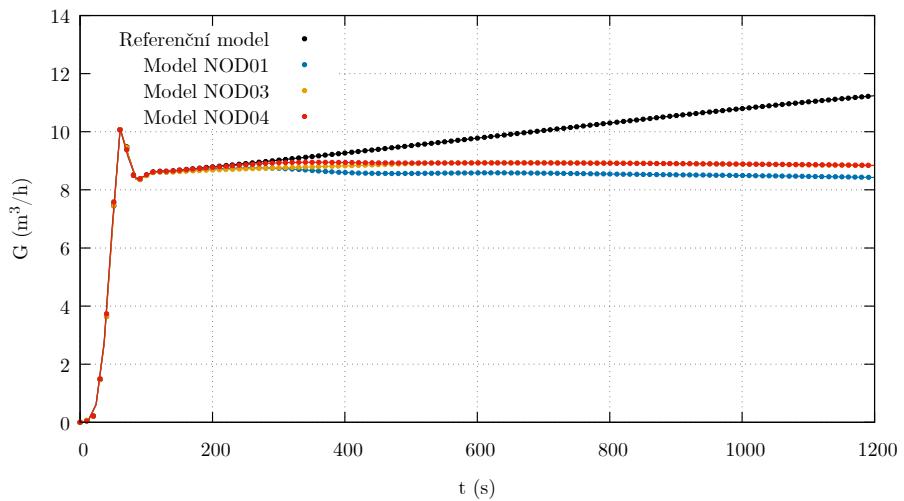




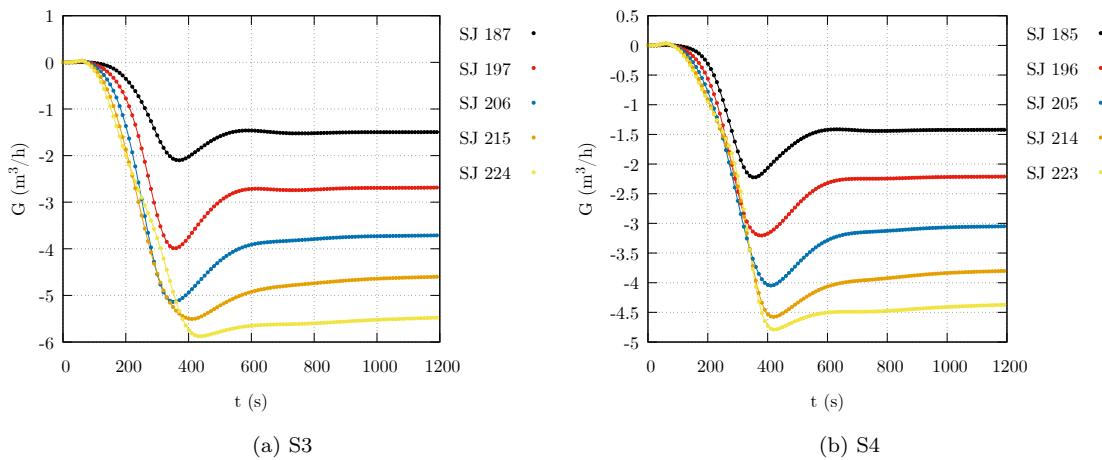
Obrázek 4.17: Nodalizace horizontálního obtoku - model NOD04

4.5.1 Výsledky

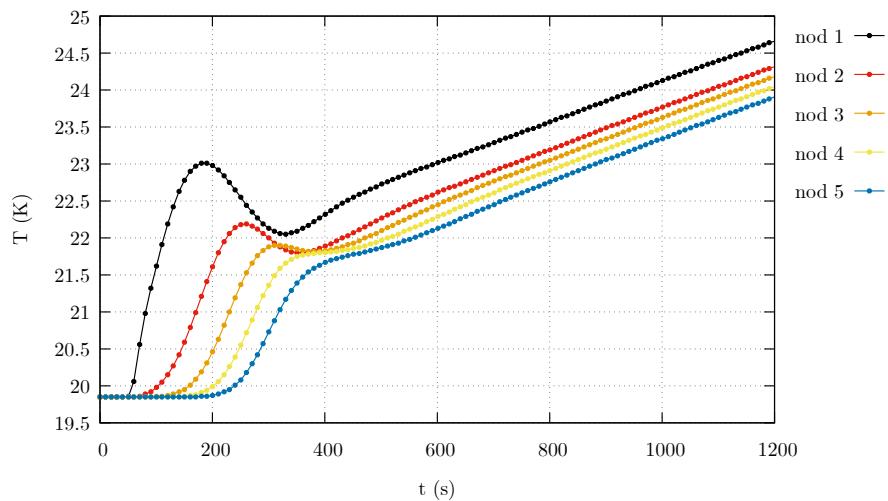
Na obrázku 4.18 je zobrazen celkový průtok chladiva skrze AZ pro referenční model a modely NOD01, NOD03 a NOD04. V případě modelu NOD04 je celkový průtok téměř shodný s modelem NOD03. Dochází však k drastické změně směru proudění ve všech skupinách spojovacích jednotek (SJ), jak je vidět na obrázcích 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 skrze 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

Závěr

Závěr

Zde napište text úvodu (1-3 strany, nerozdělujte na podkapitoly) nebo jej vložte ze samostatného souboru: např. příkazem `\input{vnitrek_zaver.tex}`.

Literatura

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] US Nuclear Regulatory Commission et al. Relap5/mod3. 2 code manual: Code structure, system models, and solution methods. *Idaho: National Engineering Laboratory*, 2001.
- [4] F. Fejt. *Analýza termohydraulických modelů reaktoru VR-1 s využitím trojrozměrné kinetiky*. PhD thesis, 2019.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] J.; al. et al. Rataj. Bezpečnostní zpráva školního reaktoru vr-1. Technical report, KJR FJFI ČVUT v Praze, 2017.
- [11] 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.
- [12] Obida M Zeitoun. *Subcooled flow boiling and condensation*. PhD thesis, 1994.
- [13] 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 NOD0	4.1
	Model N0D1	
	Model N0D2	
	Model N0D3	

Příloha B

Tabulky

Tabulka B.1: Geometrie 8-trubkového palivového článku IRT-4M [13]

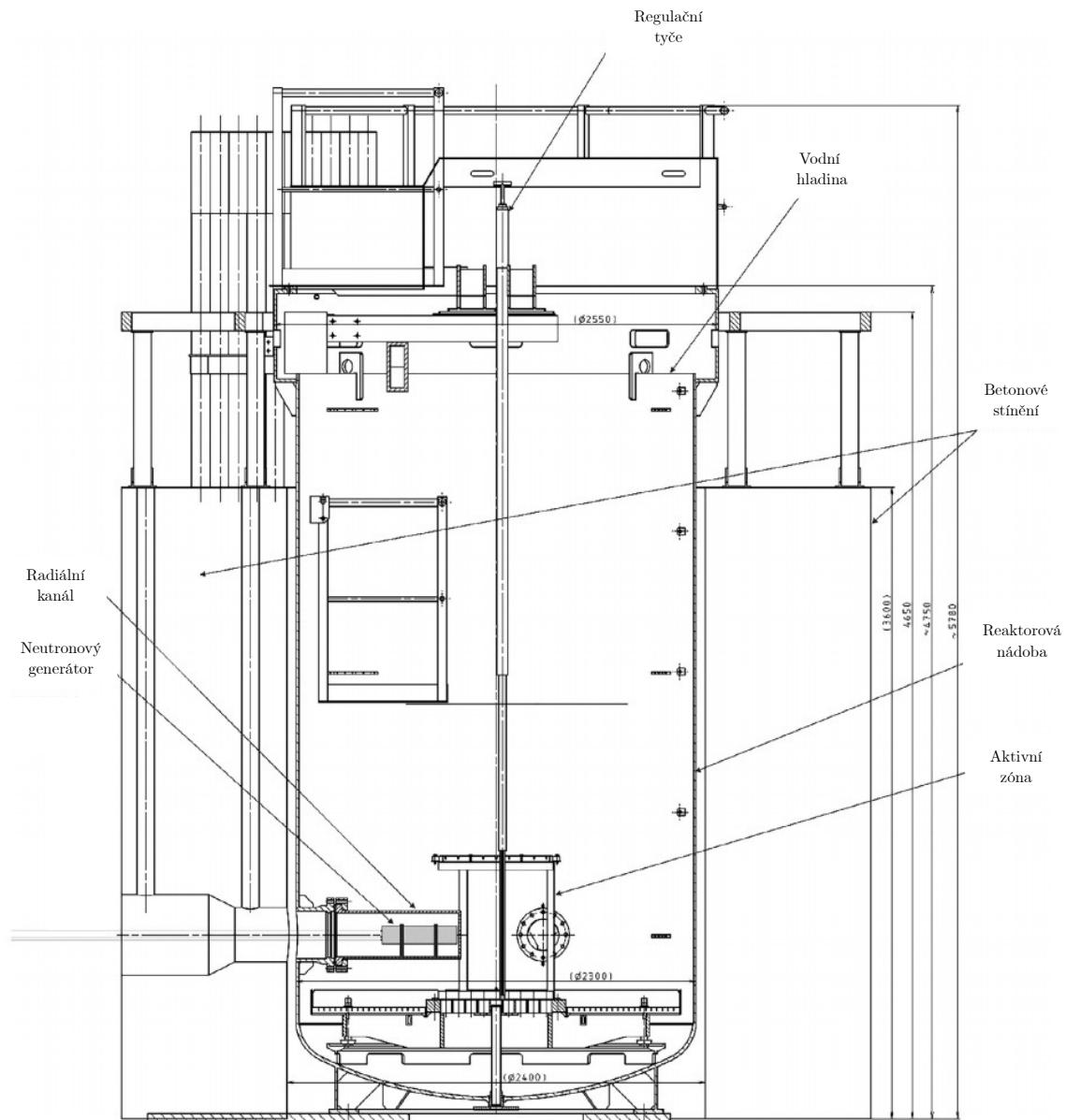
Číslo trubky	1	2	3	4	5	6	7	8
Vnější rozměr trubky (mm)	69,6	62,7	55,8	48,9	42,0	35,1	28,2	\oslash 21,3
Vnitřní rozměr trubky (mm)	66,4	59,5	52,6	45,7	38,8	31,9	25	\oslash 18,1
Vnější rozměr palivové vrstvy	68,7	61,8	54,9	48,0	41,1	34,2	27,3	\oslash 20,4
Vnitřní rozměr palivové vrstvy	67,3	60,4	53,5	46,6	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.

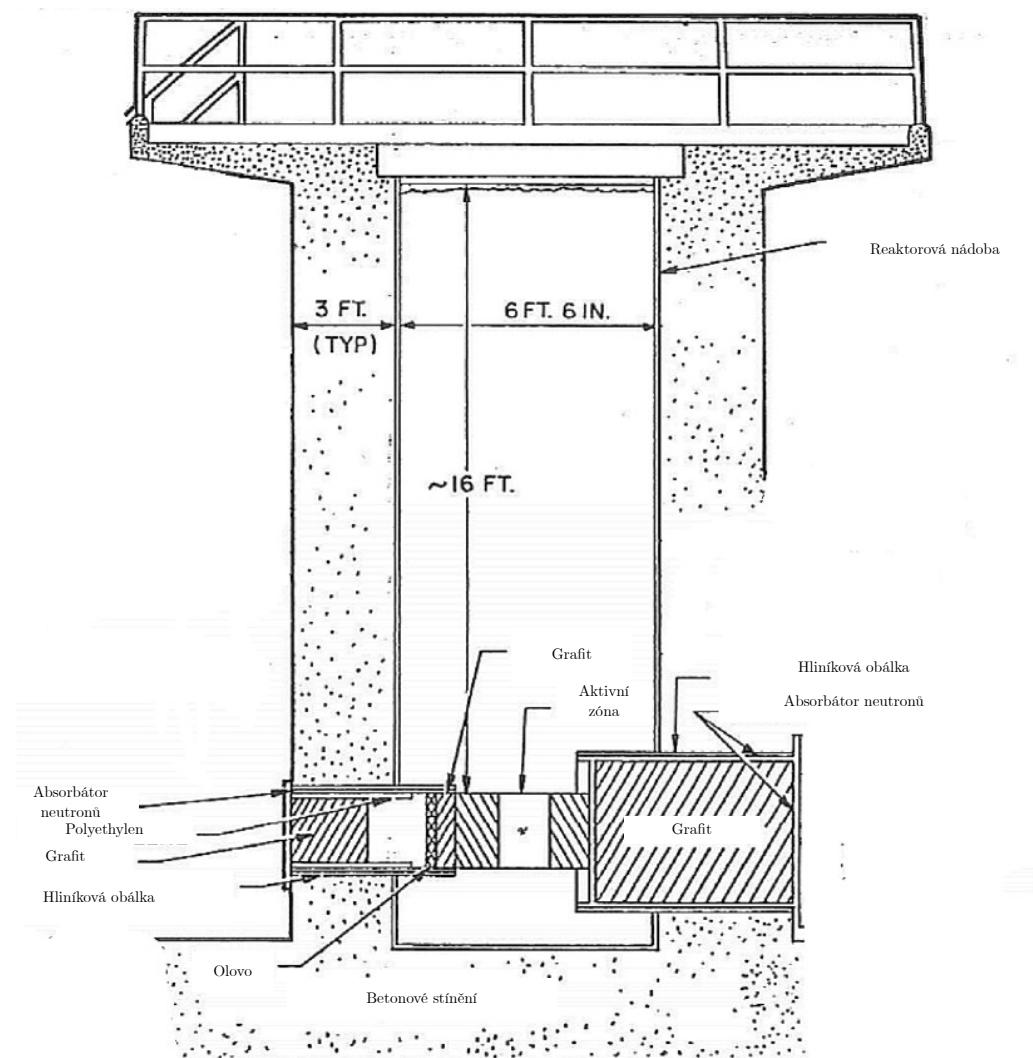
t (s)	P (W)
0	0
10	100
15	1000
20	10^4
30	10^4
...	
1200	10^4

Příloha C

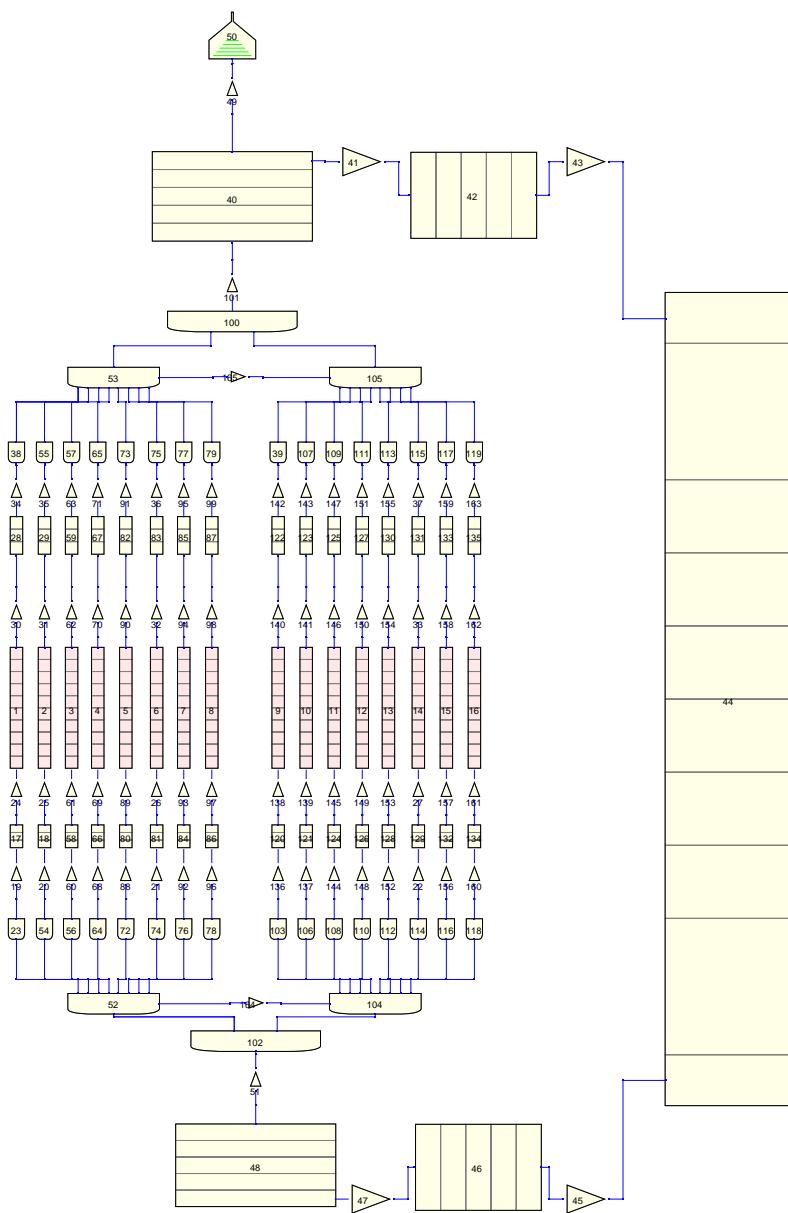
Obrázky



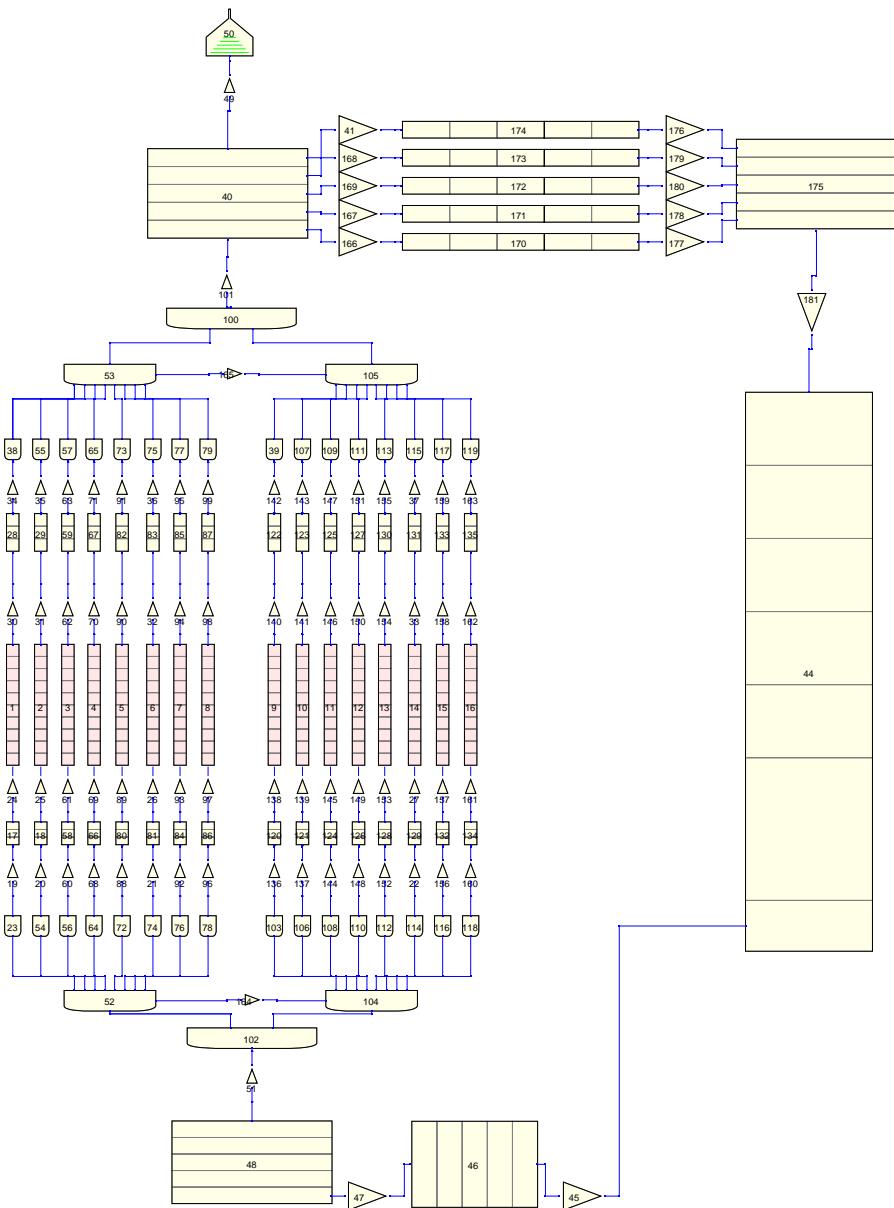
Obrázek C.1: Konstrukce reaktoru VR-1 [1].



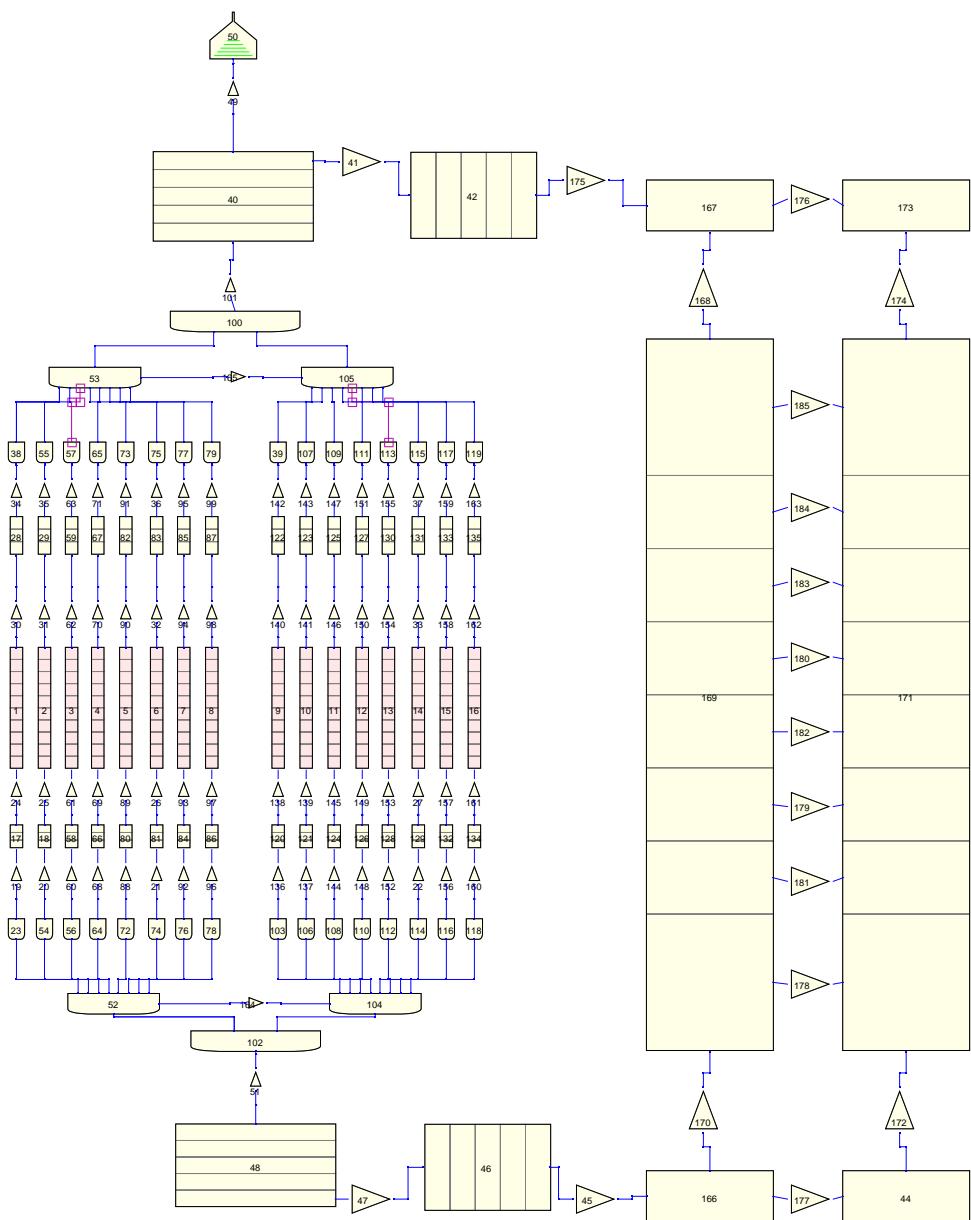
Obrázek C.2: Konstrukce reaktoru TRIGA Mark I [7].



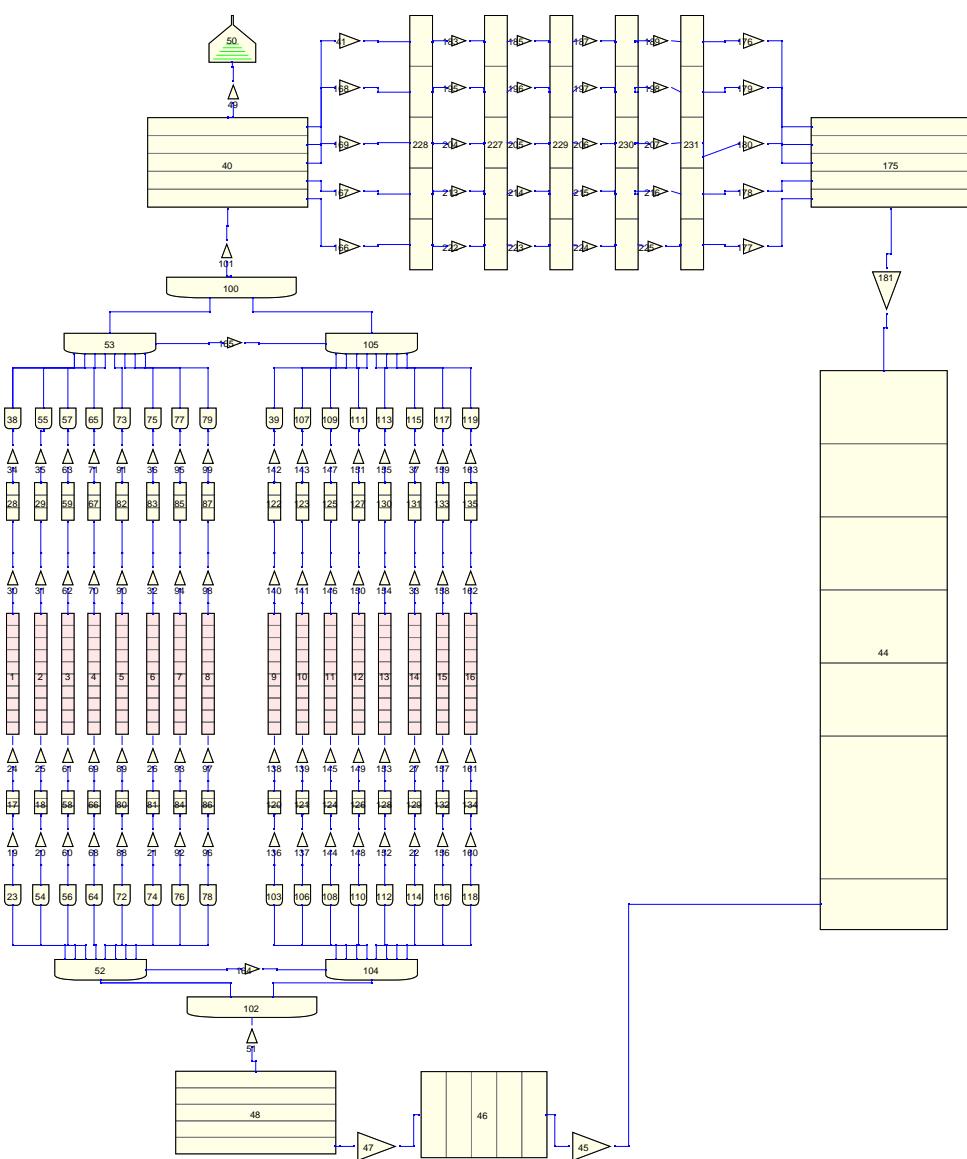
Obrázek C.3: Termohydraulický model reaktoru VR-1 - Referenční model (NOD00).



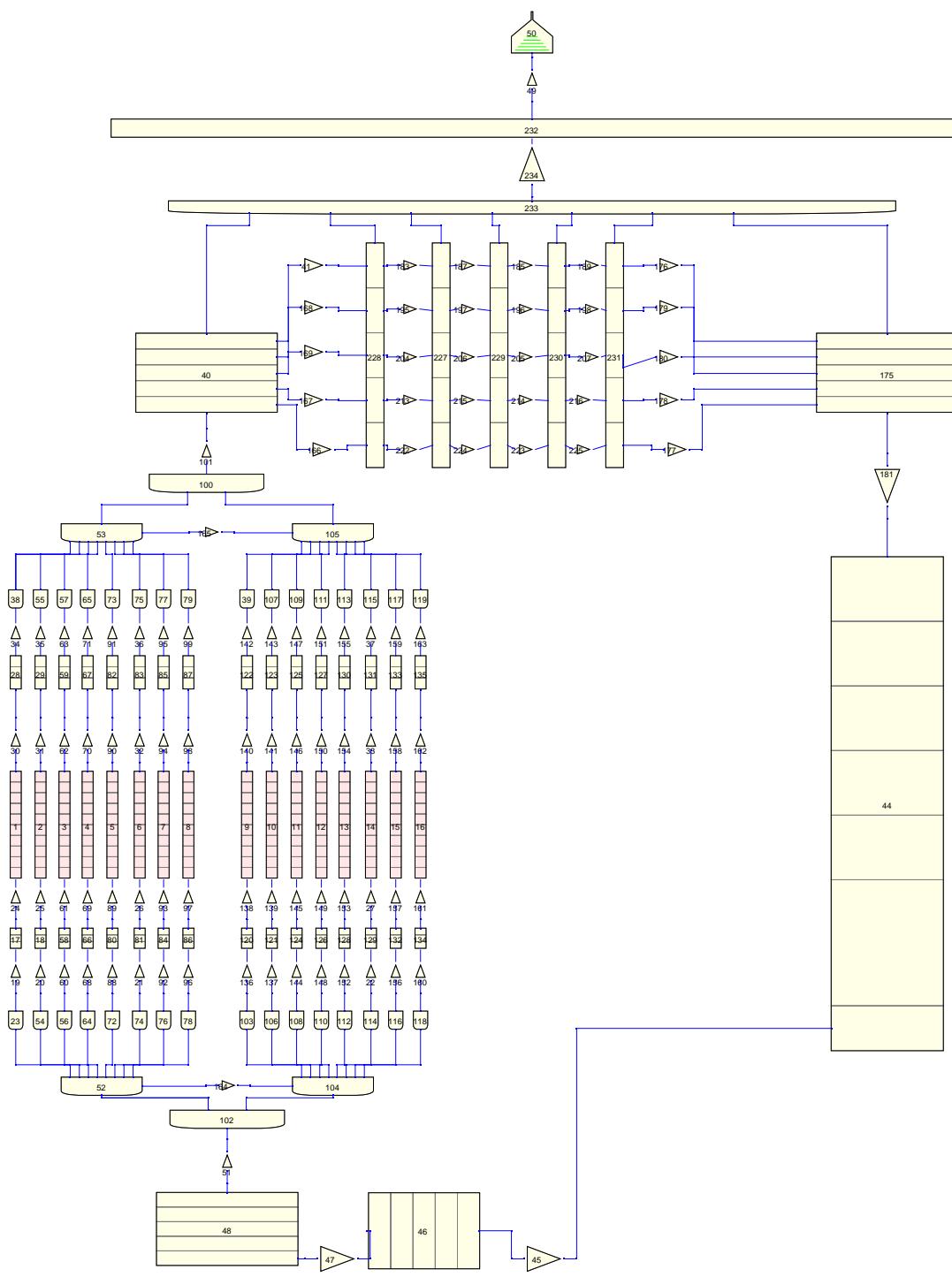
Obrázek C.4: Termohydraulický model reaktoru VR-1 - model NOD01.



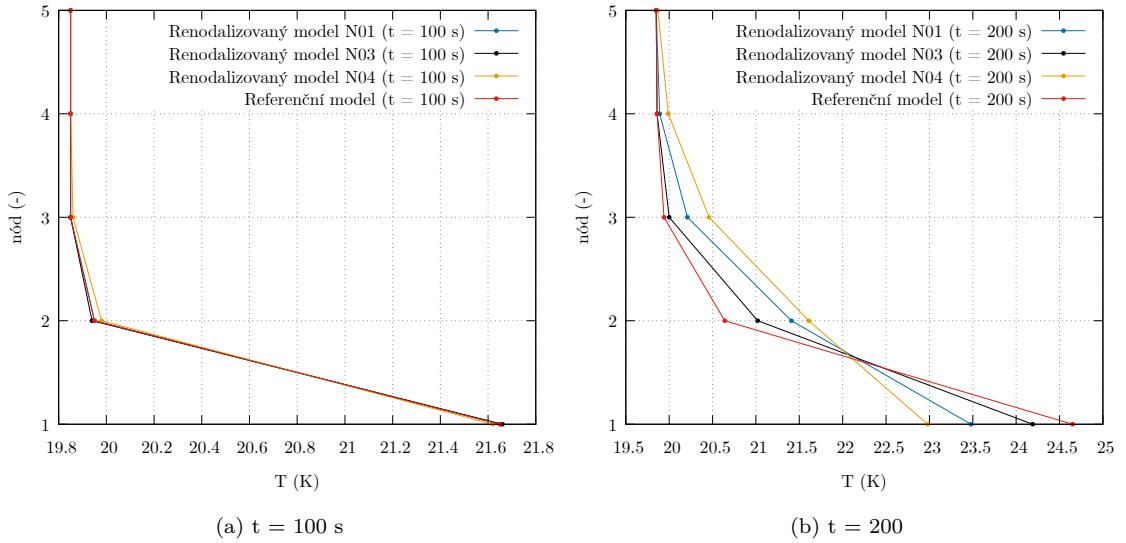
Obrázek C.5: Termohydraulický model reaktoru VR-1 - model NOD02.



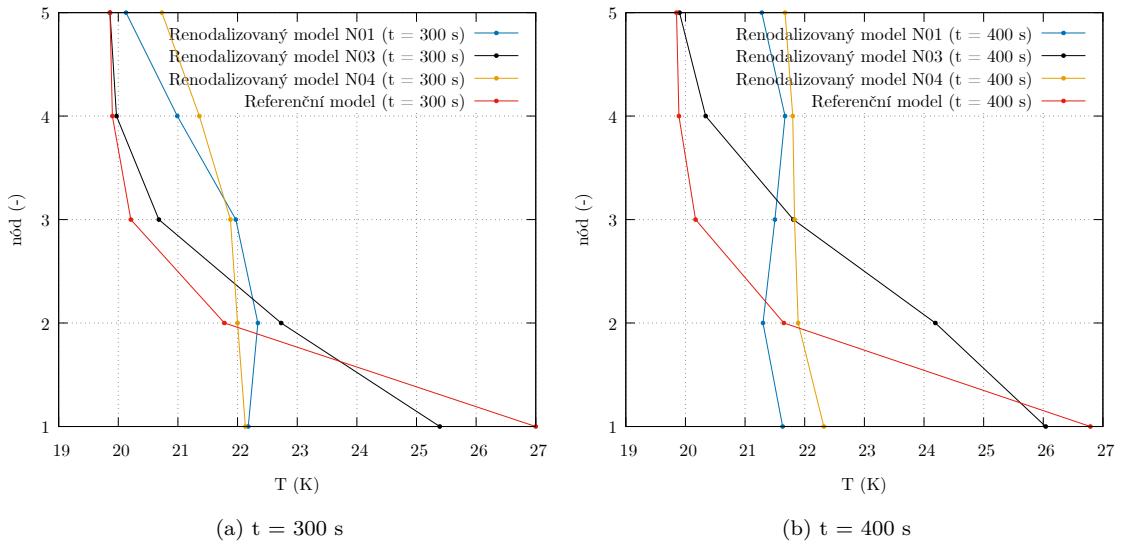
Obrázek C.6: Termohydraulický model reaktoru VR-1 - model NOD03.



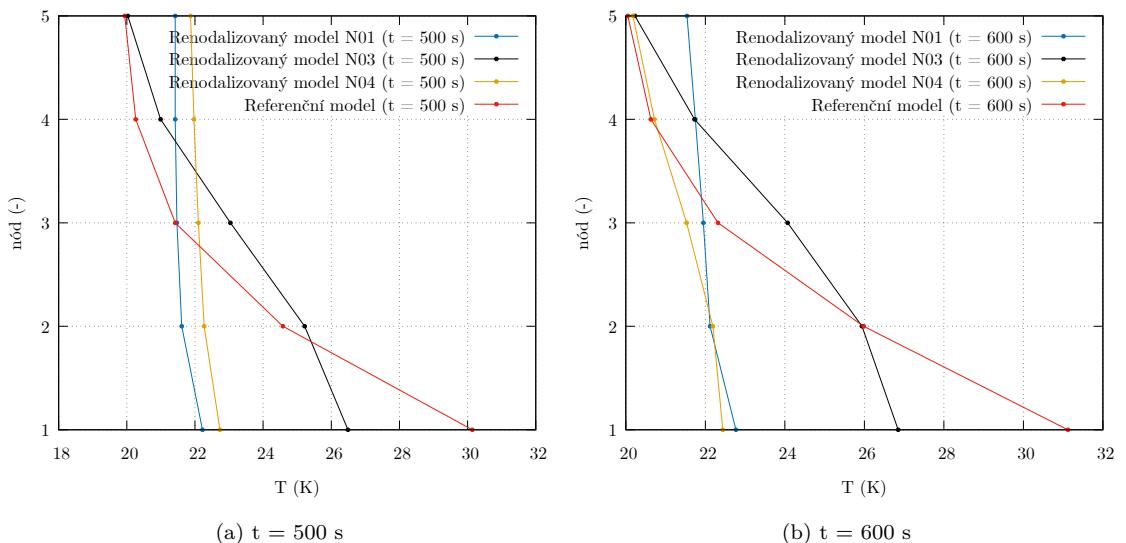
Obrázek C.7: Termohydraulický model reaktoru VR-1 - Model NOD04



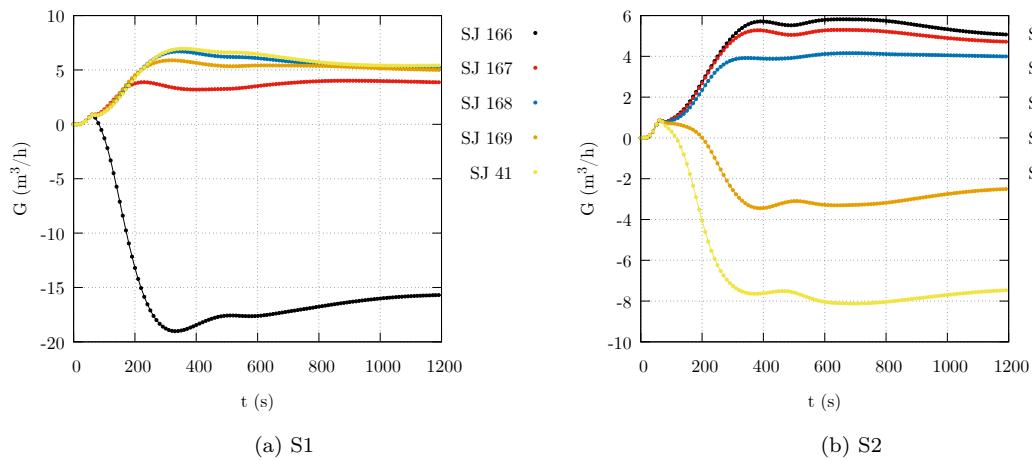
Obrázek C.8: Rozložení teplot v trubce 40



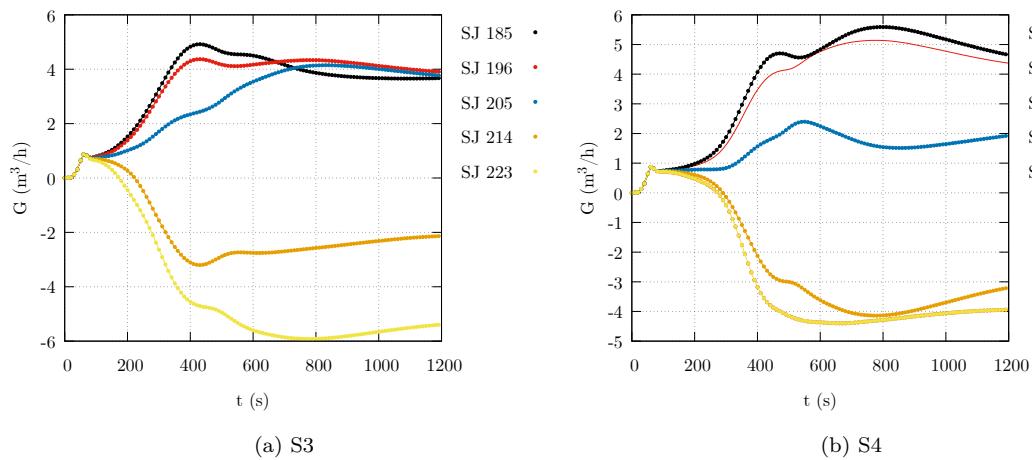
Obrázek C.9: Rozložení teplot v trubce 40.



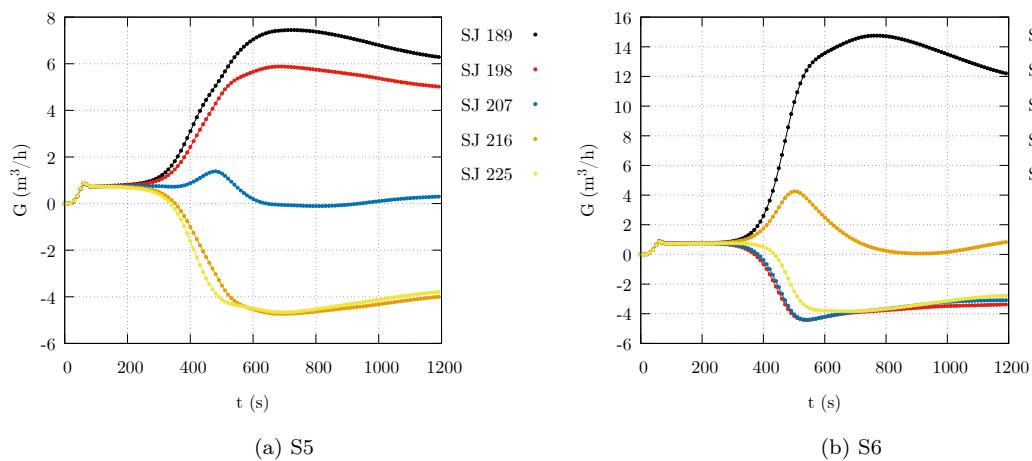
Obrázek C.10: Rozložení teplot v trubce 40.



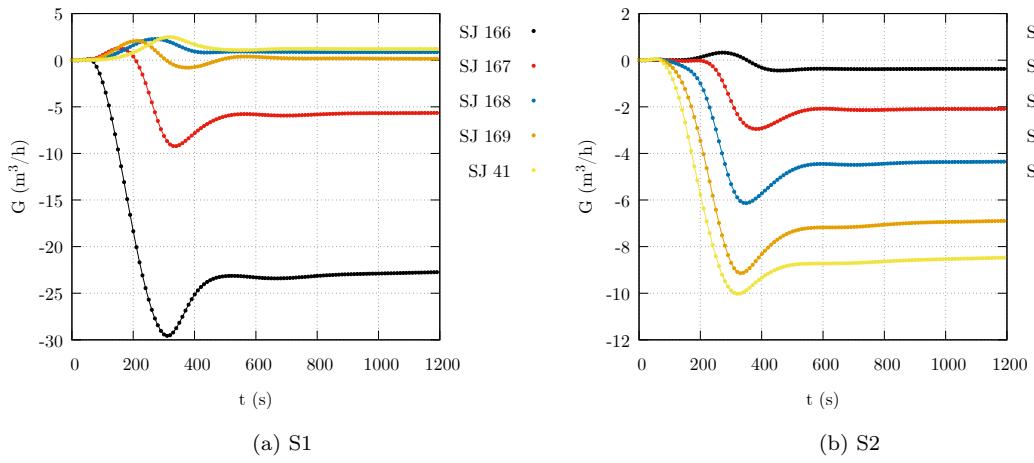
Obrázek C.11: Průtok skupinou S1 a S2 - model NOD03.



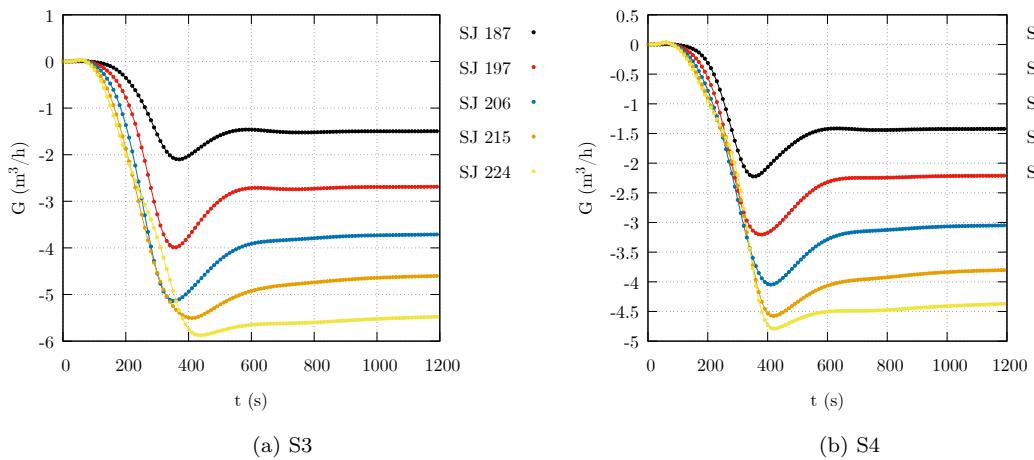
Obrázek C.12: Průtok skupinou S3 a S4 - model NOD03.



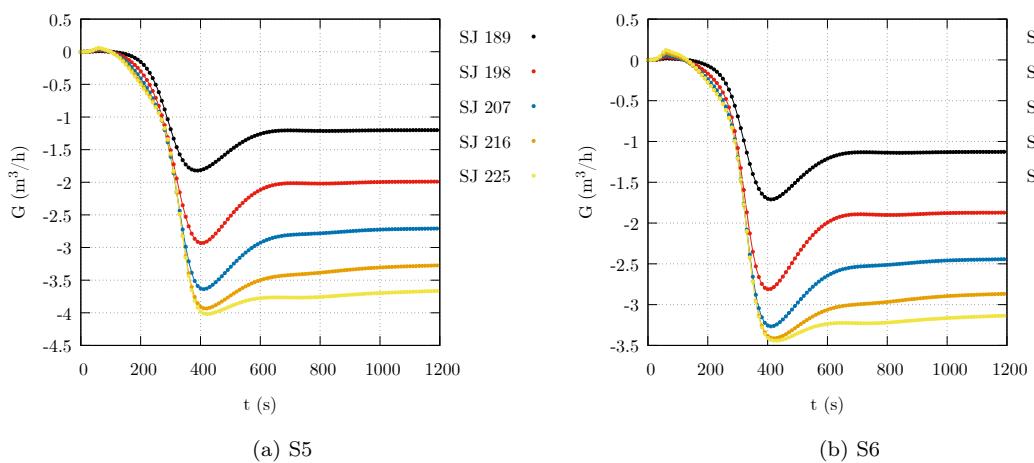
Obrázek C.13: Průtok skupinou S5 a S6 - model NOD03.



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.