

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů

Obor: Jaderné inženýrství



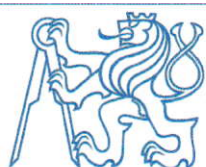
# Termohydraulický **návrh** školního reaktoru VR-1

## Thermohydraulic model of training reactor VR-1

VÝZKUMNÝ ÚKOL

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





## 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 proveďte 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 svůj výzkumný úkol vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....  
Bc. Jakub Mátl

## **Poděkování**

Děkuji Lindě za oběd, měl jsem opravdu hlad.

Bc. Jakub Mátl

*Název práce:*

**Termohydraulický návrh 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

<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>1 Termohydraulické systémové kódy</b>	<b>13</b>
1.1 Úvod . . . . .	13
1.2 Oblasti aplikace . . . . .	13
1.3 Výhody a nevýhody SYS-TH kódů . . . . .	14
<b>2 Ověření sdílení tepla</b>	<b>15</b>
2.1 Popis experimentu . . . . .	15
2.2 Základní hydraulické komponenty v kódu RELAP5 . . . . .	15
2.3 Model v RELAP5 . . . . .	18
<b>3 Termohydraulický model reaktoru VR-1</b>	<b>21</b>
3.1 Hydraulický model IRT-4M . . . . .	21
3.2 Zjednodušený hydraulický model . . . . .	25
3.3 Vývin tepla a přirozená konvekce v PČ IRT-4M . . . . .	28
3.4 Komplexní a zjednodušený model . . . . .	31
3.4.1 Celkový průtok skrz PČ . . . . .	31
3.4.2 Ohřev chladiva na výstupu z jednotlivých kanálů (trubek) PČ . . . . .	31
3.4.3 Výskyt povrchového varu . . . . .	32
3.4.4 Sjednocení topných komponent . . . . .	34
3.5 Model reaktoru VR-1 . . . . .	34
<b>Závěr</b>	<b>37</b>
<b>Literatura</b>	<b>39</b>
<b>Přílohy</b>	<b>40</b>
<b>A Název první přílohy</b>	<b>41</b>



# 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. [6]

### 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 součástí jaderných elektráren jako rotorů či ventilů,
- popis řídicích systémů (Instrumentation & Control).

### 1.3 Výhody a nevýhody SYS-TH kódů

Většina užívaných systémových kódů má možnost volné nodalizace jednotlivých termohydraulických součástí. K popisu komplexního problému se využívají definované komponenty, které jsou děleny na jednotlivé kontrolní objemy. Toto dělení je čisté na uživateli, a neexistuje tedy správný postup, jakou nodalizaci komponent a strukturu studované problematiky použít [6].

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 [6].

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. [8, 1]) je aplikace i na výzkumné reaktory [4]. 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 součástí.

## Kapitola 2

# Ověření sdílení tepla

Pro model školního reaktoru VR-1 je důležitý přestup tepla v malých rychlostech a nebo při přirozeném proudění. Cílem tvorby benchmarkové úlohy bylo získat praxi v simulaci přestupu tepla při **nízkých tlacích** a tyto zkušenosti dále využít při tvorbě modelu VR-1. Proto byl vytvořen jednoduchý model experimentální smyčky vycházející z [9]. Z [5] vyplývá, že program RELAP5 je již schopný sdílení tepla při nízkých tlacích **kvalitně** simulovat. Proto je možné vytvořený model srovnat s experimentem a ověřit správnost modelu.

### 2.1 Popis experimentu

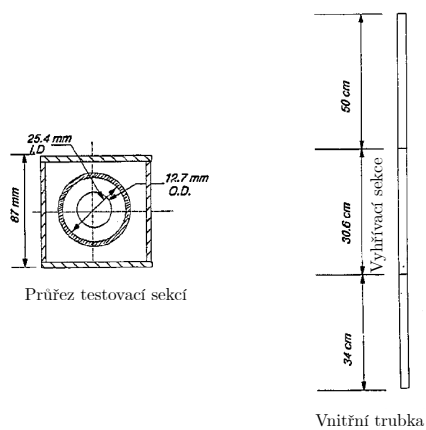
Experimenty popisované v [9] se týkaly podchlazeného varu a kondenzace v vertikálním kanálu. Postup zahrnoval cirkulaci vody kanálem, která byla před vstupem do průtočného kanálu v podchlazeném stavu s teplotou pod bodem varu. Poté byla kapalina ohřívána konstantní rychlostí a tepelný tok byl měřen pomocí termočlánku.

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 kanálu 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. **Přeložit obrázky!**

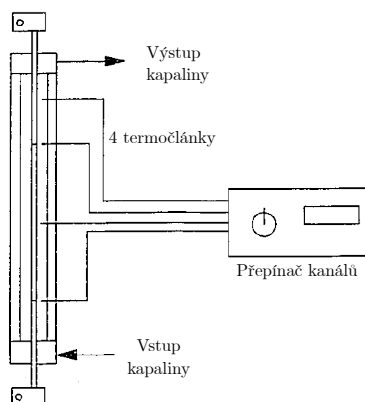
Během experimentu byly rovněž použity vysokorychlostní kamery, které pořizovaly snímky procesů varu a kondenzace uvnitř kanálu. To umožnilo podrobnější analýzu příslušných mechanismů přenosu tepla, jako například průběh dutinového koeficientu.

### 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. 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



Obrázek 2.1: Geometrie testovací trubice [9].



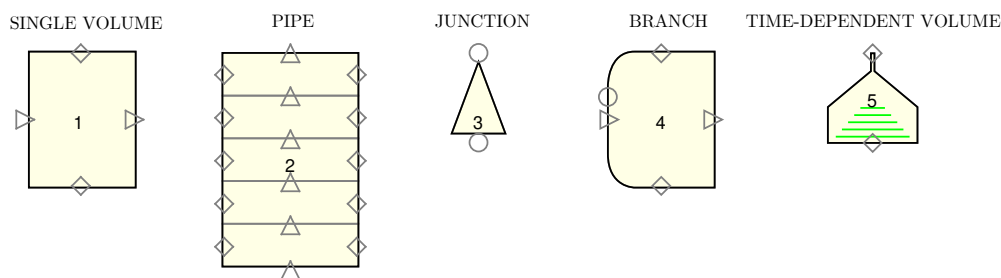
Obrázek 2.2: Testovací smyčka [9].



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 řdicích. 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 kondukcii, konvekci a radiaci pro válcový, deskový či kulový zdroj. V této práci byly využity zdroje pouze válcové popsané výškou a vnějším a vnitřním průměrem [2].



Obrázek 2.3: Hydraulické komponenty v programu RELAP5.

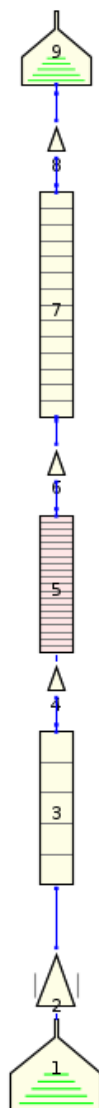
Problematická se může jevit především nodalizace jednotlivých komponent a struktur. Využitím jemnějšího rozdělení je možné dosáhnout podrobnějšího popisu, avšak příliš jemná nodalizace může způsobit nestabilní výpočet a fyzikálně neodpovídající výsledky. Důvody proč příliš jemná nodalizace může být problematická jsou dva [6]:

- 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 součástí, 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 [6].

## 2.3 Model v RELAP5

Pro jednoduchost byly podmínky v testovací sekci experimentální smyčky simulovány rozdílem v tlaku na vstupu a výstupu trubky, konstantním objemovým průtokem, výkonem elektrického ohříváku a vstupní teplotou vody. Vytvořený model je vyobrazen na Obr. 2.4, modelované podmínky vycházející z [9] 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 TDB) a tlak na výstupu komponentou TDV 9. Jelikož geometrie trubek je v programu RELAP5 značně omezená, k aproximaci 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.



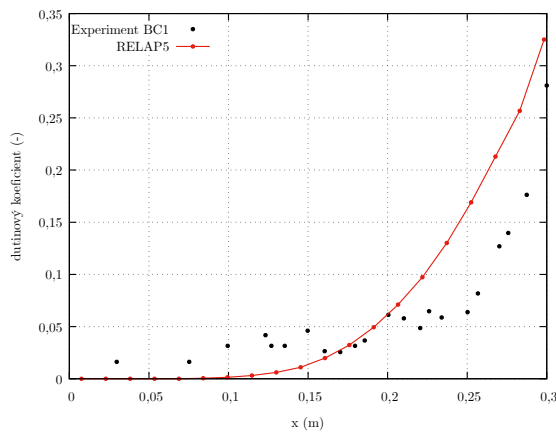
Obrázek 2.4: Termohydraulický model testovací trubice - RELAP.

Na Obr. 2.5, 2.6, 2.7 a 2.8 jsou vykresleny průběhy dutinového koeficientu skrze ohřívanou částí 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" [5].

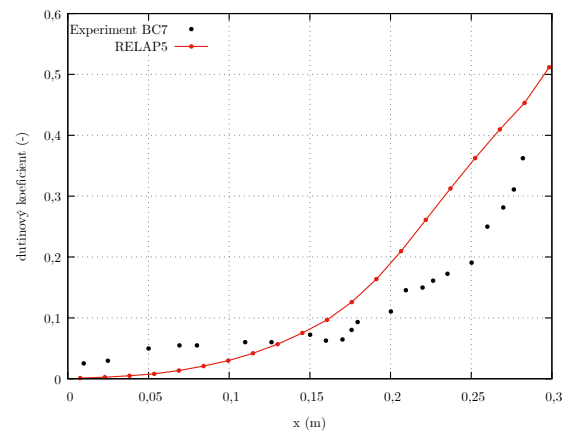
Tabulka 2.1: Podmínky pro ověření modelu [9].

experiment	P (W)	G (kg/m <sup>2</sup> 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

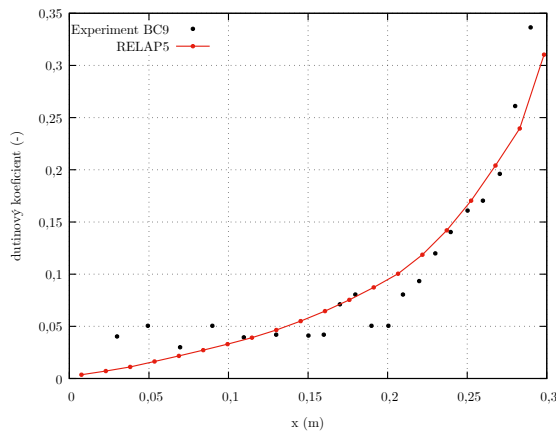
Z Obr. 2.5, 2.6, 2.7 a 2.8 je jasné vidět, že zatímco ve vysoce podchlazené oblasti je dutinový koeficient menší ve srovnání s experimenty, tak v slabě podchlazené oblasti dává program RELAP5 nadhodnocené výsledky. Kvalitativně jsou ovšem výsledky ve shodě s měřením. Ve všech případech je přechod mezi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



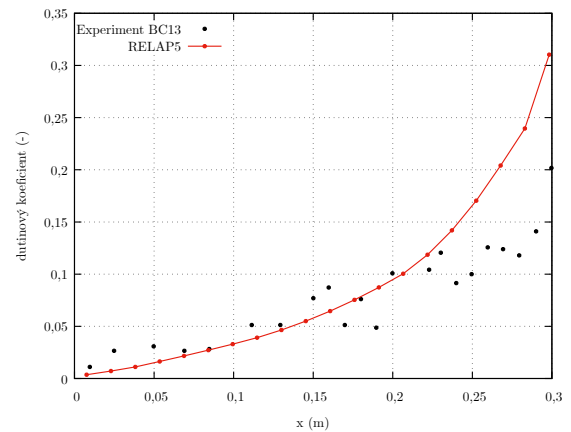
Obrázek 2.5: Srovnání dutinového koeficientu - exp. BC1.



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 reaktoru VR-1

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 termohydraulický model VR-1.

### 3.1 Hydraulický model IRT-4M

Palivo IRT-4M je tvořeno 8, 6 nebo 4 koncentrickými čtvercovými trubkami se zakulacenými rohy a s možností vložení vytěsňatele pro rovnoměrnější průtok. Geometrie a konstrukce použité pro vytvoření modelu vychází z dokumentu [10]. Na Obr. 3.1 a 3.2 je vykreslen radiální a axiální průřez 8-trubkovým palivem bez vytěsňatele. Jednotlivé oddělené průtočné plochy jsou aproximovány kruhovými trubkami s odpovídajícím hydraulickým průměrem. Komponenty 1-9 uvedené na Obr. 3.3 odpovídají průtočným plochám z 3.2, plocha 10 pak představuje vytěsňatel (vstupní průměr vytěsňatele je 3 mm). Rozměry palivového článku a jednotlivých průtočných ploch jsou uvedeny v příloze. Nucené proudění bylo vytvořeno pomocí TDV 26 a 36 rozdílem v tlaku rovným 4 m vodního sloupce. Komponenty 22-25 a 32-35 představují koncovky a spojení jednotlivých trubek. Samotný hydraulický model je ilustrován na Obr. 3.3 (pro lepší interpretaci jsou rozměry zkráceny).

Návrh a ověření modelu vyplývá z [3], kdy výsledné proudění je charakterizováno relativními objemovými průtoky  $G$  ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) 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 [10] (výsledky jsou označeny jako referenční).

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

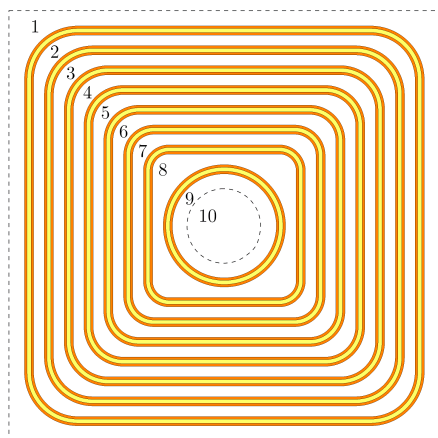
Průtočná plocha	$G_i/G$ (-)					
	8-trubkový PČ		6-trubkový PČ		4-trubkový PČ	
	RELAP5	Referenční	RELAP5	Referenční	RELAP5	Referenční
1	0,122	0,114	0,145	0,130	0,182	0,173
2	0,165	0,151	0,194	0,173	0,243	0,229
3	0,147	0,148	0,174	0,170	0,218	0,224
4	0,130	0,135	0,153	0,155	0,192	0,205
5	0,112	0,112	0,132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

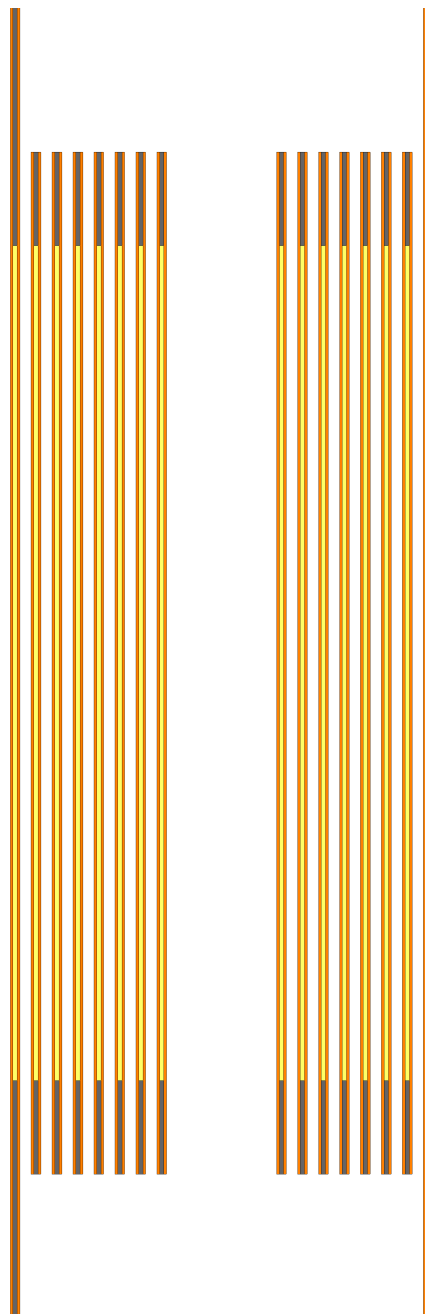
$\Delta p$ (m)	$G$ (m <sup>3</sup> /h)	
	RELAP5	Referenční
2,45	22,7	25,6
3	27,5	28,4
3,5	31,3	30,7
4	34,8	32,8

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

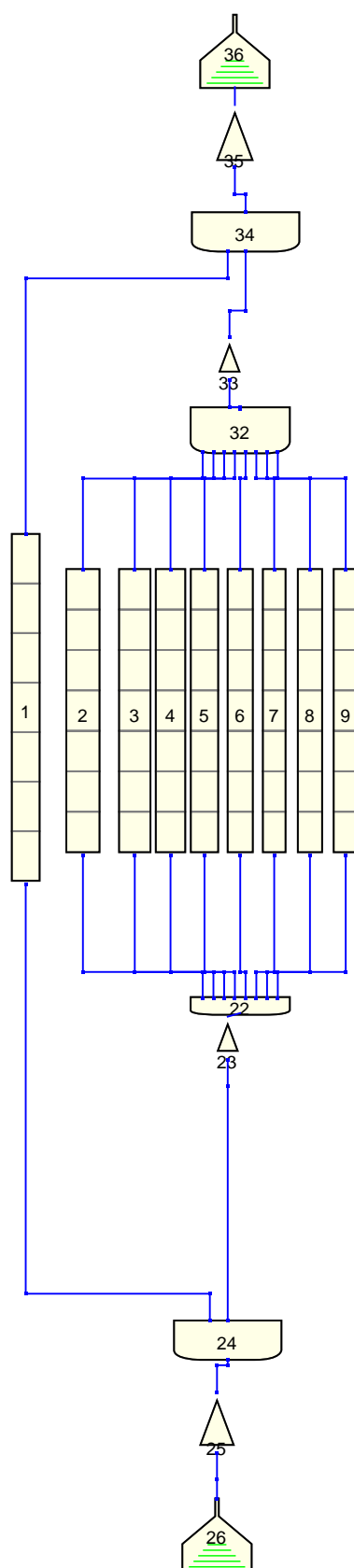
Průtočná plocha	$w / w_{\max}$	
	RELAP5	Referenční
1	0,81	0,84
2	0,77	0,78
3	0,77	0,86
4	0,77	0,89
5	0,77	0,86
6	0,77	1,00
7	0,77	0,98
8	1,00	0,90
9	0,78	0,98
10	0,05	0,18



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

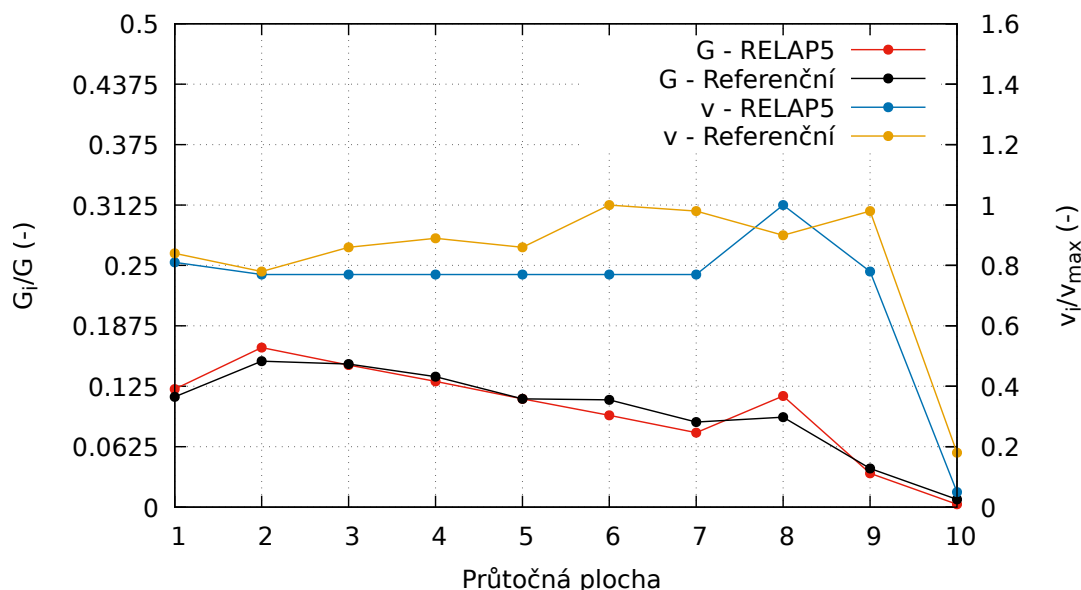


Obrázek 3.2: Axiální řez palivovým článkem IRT-4M.



Obrázek 3.3: Hydraulický model palivového článku IRT-4M.





Obrázek 3.4: Průtok a rychlost v jednotlivých kanálech.

Na Obr. 3.4 je vykresleno rozdělení relativních průtoků a rychlostí pro 8-trubkový palivový článek s vytěsnitelem. Model vytvořený v RELAP5 dává větší rozdíly v průtocích, rozdělení rychlostí dává naopak rovnoměrnější hodnoty. Odchyłky od referenčních hodnot mohou být způsobeny mnoha faktory a naprostá shoda se nedala očekávat. Tyto odchyłky ovšem nemají pro další výpočty zásadní vliv a model může být považován za vhodný.

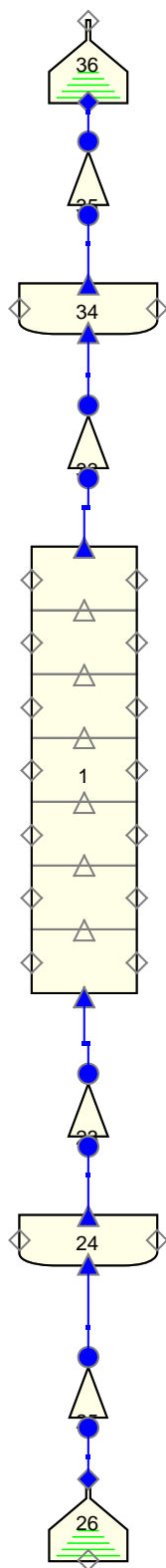
## 3.2 Zjednodušený hydraulický model

V aktivní zóně reaktoru VR-1 je okolo 16 palivových článků, což dává okolo 160 průtočných kanálů 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. 3.5) a iterovaným hydraulickým průměrem.

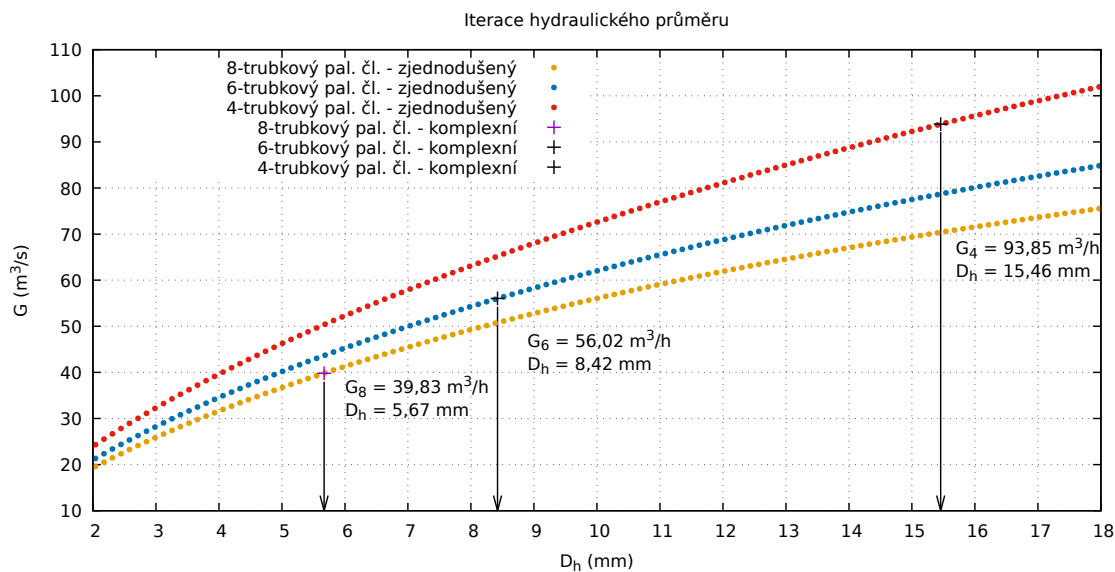
Při sjednocení kanálů je třeba zachovat celkovou průtočnou plochu a získat adekvátní hydraulický průměr, který zaručí stejný průtok. Prvním odhad hydraulického průměru vychází z rovnice:

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

kde  $S$ , resp.  $o$  je celková průtočná plocha, resp. celkový omočený obvod palivového článku. Následně byl průměr iterován pro získání průtoků z komplexního modelu viz Obr. 3.6.



Obrázek 3.5: Zjednodušený hydraulický model palivového článku IRT-4M.



Obrázek 3.6: Závislost průtoku skrz PČ (bez vytěsňitele) 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 vytěsňitele) pro různé hydraulické průměry.

	$G \text{ (m}^3/\text{h) - komplex.}$	$G \text{ (m}^3/\text{h) - rovnice 3.1}$	$d_h \text{ (mm) - rovnice 3.1}$
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

	$G \text{ (m}^3/\text{h) - komplex.}$	$G \text{ (m}^3/\text{h) - iterace}$	$d_h \text{ (mm) - iterace}$
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

### 3.3 Vývin tepla a přirozená konvekce v 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 [3] vyplývá, že kromě vhodně zvolených komponent je třeba také zvolit sledované fyzikální veličiny pro co nejvíce přesnou interpretaci a srovnání výsledků.

Při srovnání Obr. 3.3 a 3.7 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 připojena 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 3.3, u jednoduchého pak geometrie 3.5, přičemž konstrukce obtoku zůstává pro obě dvě varianty modelu stejná.

Hlavním problémem při zadávání zdrojů tepla bylo vystihnout 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. Poslední dva parametry byly získány z podmínek na identický objem, teplosměnnou plochu a tloušťku trubek viz [3]. Rozměry jednotlivých HS komponent jsou uvedeny v tabulce 3.5. Při přechodu z komplexního na jednoduchý model je třeba ověřit zachování fyzikálních veličin [3]:

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

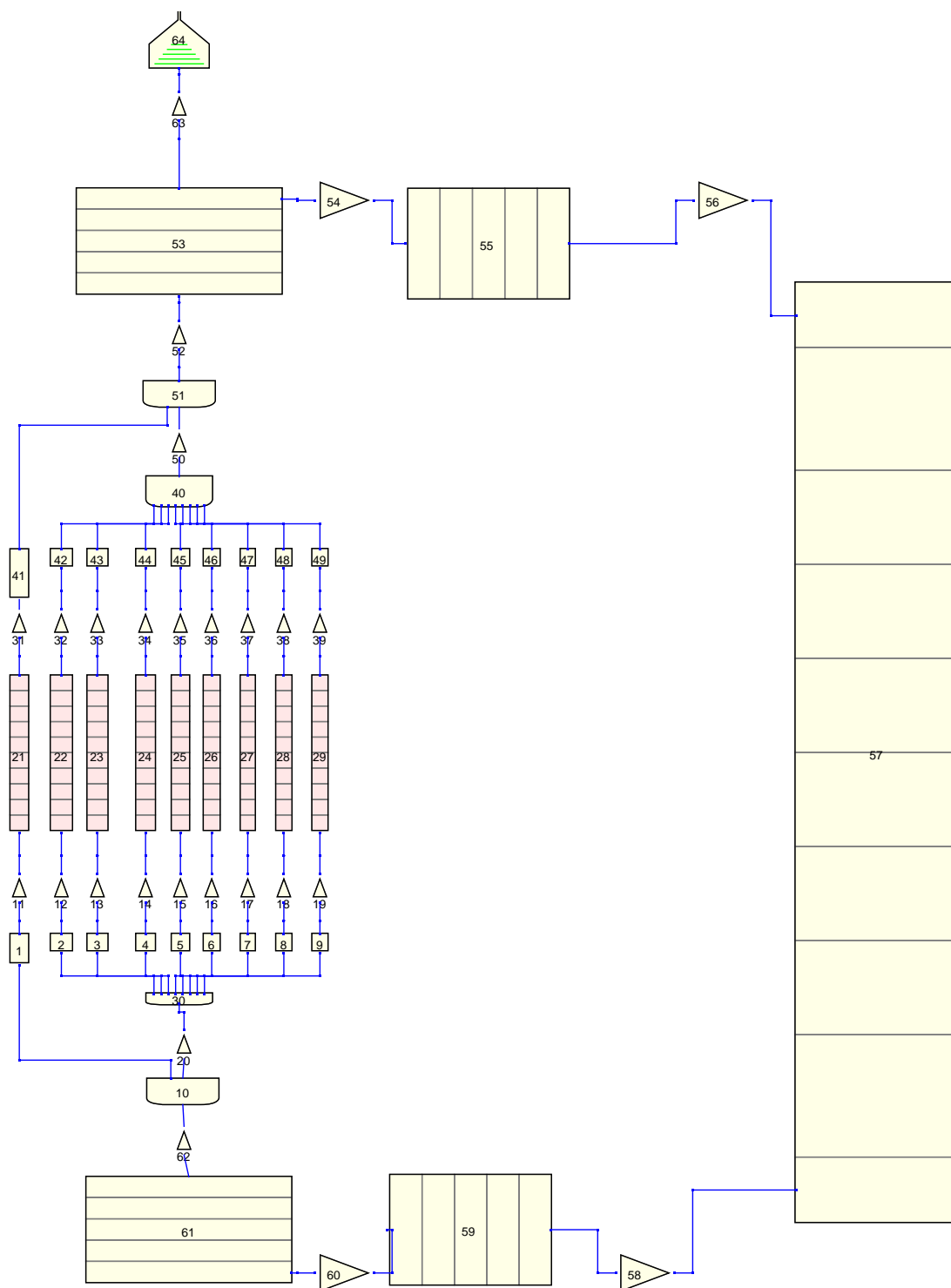
Pro ohřev vody v PČ můžeme předpokládat následující zjednodušený vztah:

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

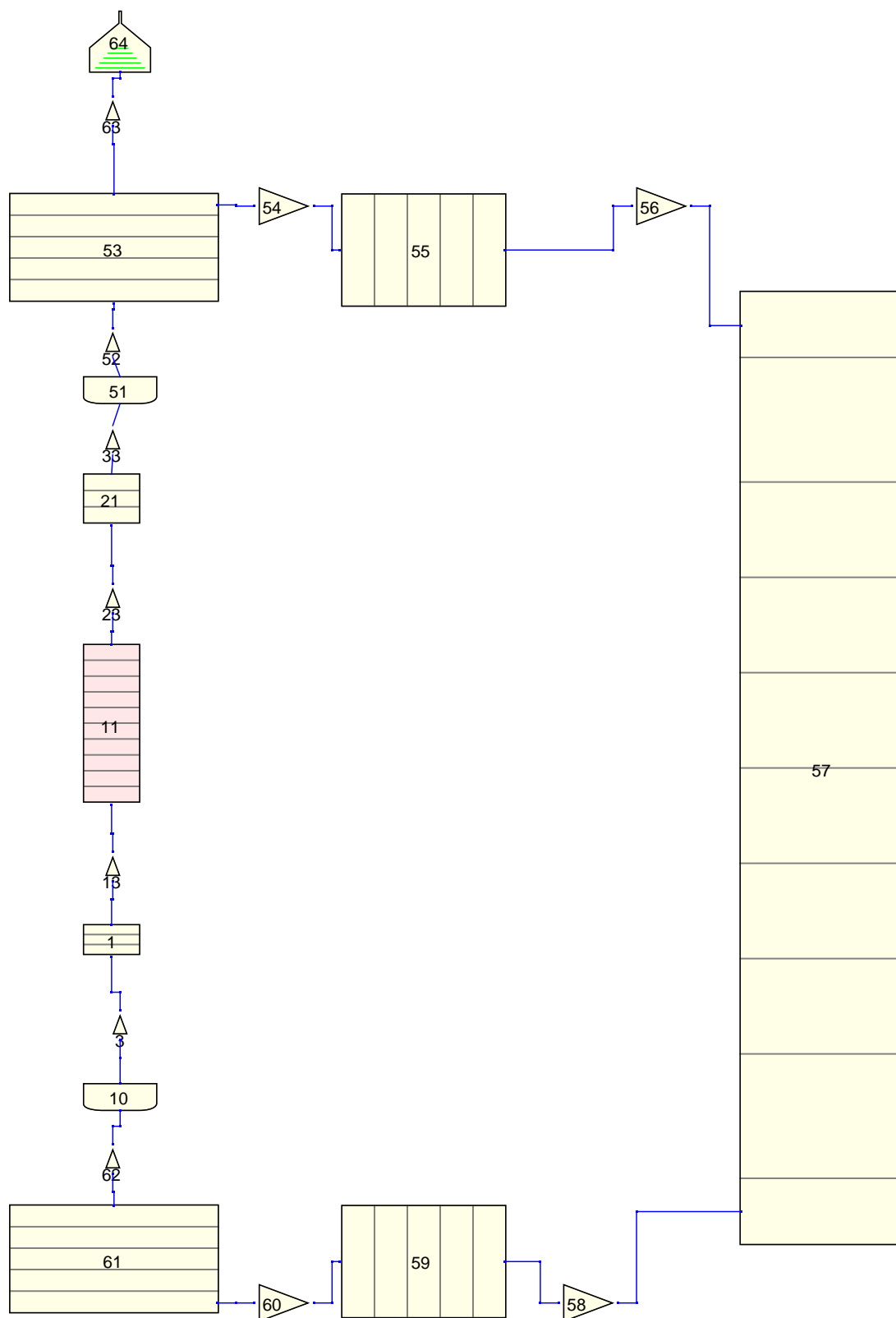
kde  $Q$  (W) je tepelný výkon,  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) je hustota,  $c_p$  ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ) měrná tepelná kapacita a  $A$  ( $\text{m}^2$ ) je průtočná plocha. Dá se očekávat, že změnou rozložení výkonu by nemělo docházet k výrazné změně průtoku, avšak pro jednotlivé kanály budou výstupní teploty rozdílné.

Tabulka 3.5: Rozměry ekvivalentních HS pro PČ IRT-4M a jejich napojení na jednotlivé trubky.

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 3.7: Termohydraulický komplexní model 8-trubkového PČ IRT-4M bez vytěsňatele (Pro lepší vizualizaci byly měřítka component 53 až 62 změněna).



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

### 3.4 Komplexní a zjednodušený model

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 povrchového bublinkového varu při přechodu z komplexního na jednoduchý model. Celkový výkon byl nastaven na  $1,5 \times 10^5$  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. Z programu Serpent vyšlo následující axiální rozdělení:

Tabulka 3.6: Axiální rozložení výkonu V 8-T trubkovém PČ IRT-4M dle programu Serpent.

Nód (-)	$P_i/P$ (-)
10	0,053
9	0,081
8	0,108
7	0,126
6	0,135
5	0,135
4	0,125
3	0,106
2	0,080
1	0,052

Cílem následujícího textu je popsat problematiku sjednocení průtočných kanálů a porovnat výsledky pro dvě různé rozdělení výkonu.

#### 3.4.1 Celkový průtok skrz PČ

Jak bylo výše odhadováno, tak při konjukci kanálů do zjednodušené varianty dochází k lehké změně v celkovém průtoku viz Tab. 3.7. Vliv rozložení výkonu na průtok je bezvýznamný.

Tabulka 3.7: Celkový průtok skrz PČ pro rovnoměrné rozdělení výkonu a rozdělení dle programu Serpent2.

	G (m <sup>3</sup> /h)
rovn. výkon - komplex. mod.	2,246
Serpent2 - komplex. mod.	2,247
rovn. výkon - jedno. mod	2,091
serpent - jedno. mod.	2,093

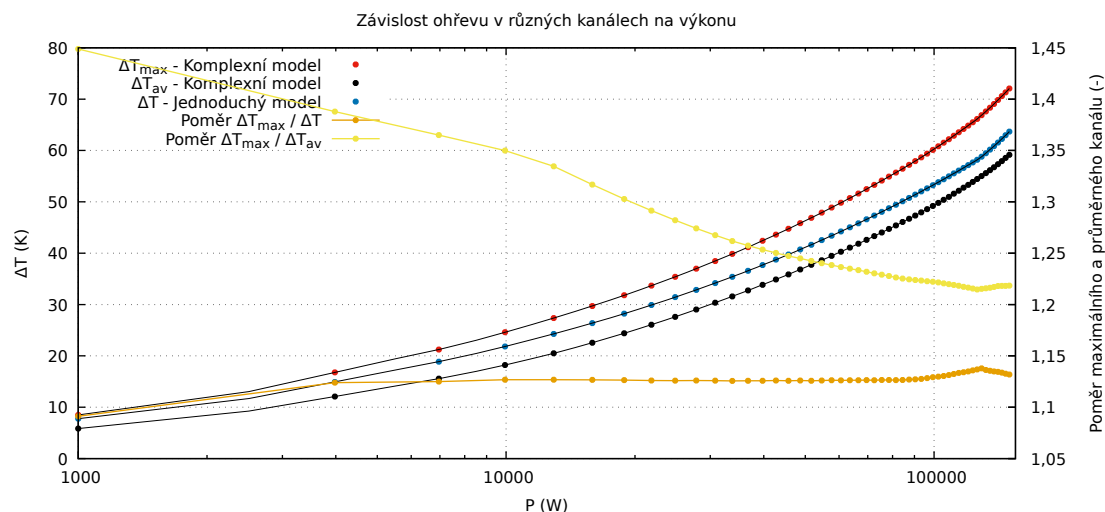
#### 3.4.2 Ohřev chladiva na výstupu z jednotlivých kanálů (trubek) PČ

Z Tab. 3.8 je vidět, že ohřev chladiva při rozdělení dle programu Serpent je značně rovnoměrnější, což jistě ovlivní i možný výskyt povrchového varu. Maximální kanál v případě rovnoměrného rozdělení odpovídá trubce 27, což je stejný výsledek jako v [3]. V případě rozdělení dle programu Serpent je maximální ohřev v trubce 22. Celkově ovšem výsledky korespondují s [3].

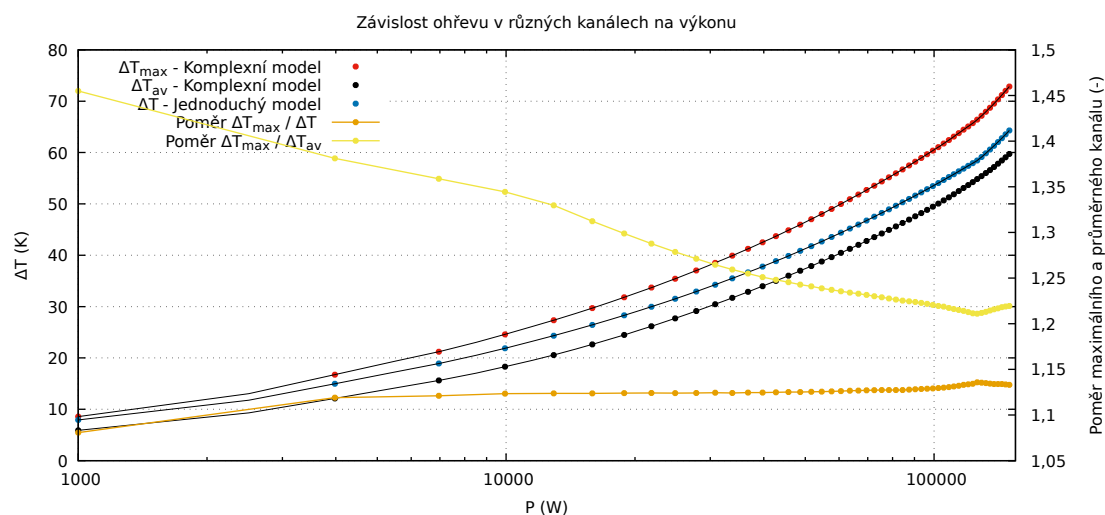
Z Tab. 3.8 a Obr. 3.9 a 3.10 lze soudit, že nejtěživějším problémem při sjednocení trubek do zjednodušeného kanálu je právě ztráta informace o maximální teplotě ohřevu. Proti této ztrátě hraje fakt, že podíl rozdílu teplot v maximálním kanálu a jednoduchém modelu zůstává pro naprostou většinu výkonů konstantní. V obou případech rozložení výkonu je tento faktor okolo 1,13.

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

	Trubka								
$\Delta T_{out}$ (K)	21	22	23	24	25	26	27	28	29
RV - KM	43,6	54,02	57,65	61,63	67,21	74,79	81,88	65,82	25,45
S - KM	60,86	72,81	70,25	68,39	67,58	67,64	66,85	42,55	13,31
RV - JM	63,64								
S - JM	64,26								



Obrázek 3.9: Závislost ohřevu pro komplexní a jednoduchý model - rovnoměrný výkon (relativní odchylka je odchylka jednoduchého modelu od komplexního).



Obrázek 3.10: Závislost ohřevu pro komplexní a jednoduchý model - výkon dle Serpent2 (relativní odchylka je odchylka jednoduchého modelu od komplexního).

### 3.4.3 Výskyt povrchového varu

Jak již bylo avizováno, tak při rozdělení výkonu dle programu Serpent je rozdělení teplot daleko rovnoměrnější, což vede i k rovnoměrnějšímu výskytu možného povrchového bublinkového varu.



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

Obrázek 3.11: Komplexní model

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

Obrázek 3.12: Jednoduchý model

Obrázek 3.13: Možný výskyt povrchového bublinkového varu - rovnoměrné rozdělení výkonu (červeně nody označují možný výskyt varu, modré přirozenou konvekci bez změny fáze).

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

Obrázek 3.14: Komplexní model

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

Obrázek 3.15: Jednoduchý model

Obrázek 3.16: Možný výskyt povrchového bublinkového varu - rozdělení výkonu dle Serpent2 (červeně nody označují možný výskyt varu, modré přirozenou konvekci bez změny fáze).

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 [3, 7].

### 3.4.4 Sjednocení topných komponent

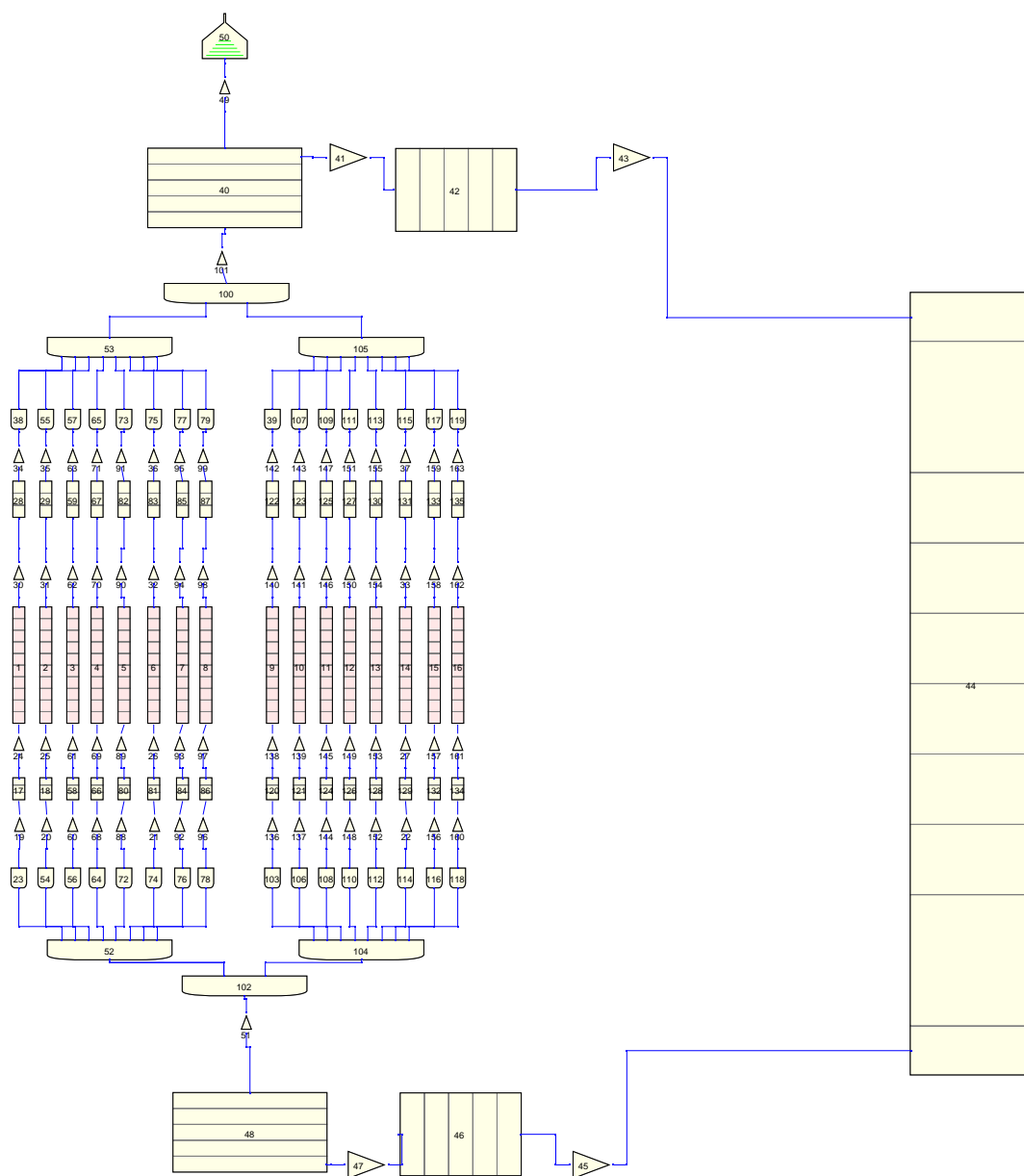
Pro analýzu přirozeného proudění skrz PČ IRT-4M dává smysl využít počet HS odpovídající počtu palivových trubek, tedy 8 topných jednotek. Pro analýzu celé aktivní zóny reaktoru VR-1 by bylo třeba vložit okolo  $8 \times 16$  HS, což by mohlo být problematické. Proto dává smysl vytvořit zjednodušený model 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 využita jakožto zdroj tepla pro PČ v modelu VR-1.

Tabulka 3.9: Geometrie sjednocené HS.

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

## 3.5 Model reaktoru VR-1

Výše uvedené modely byly použity pro vytvoření termohydraulického modelu reaktoru VR-1. Na rozdíl od [3] nebyl pro vytvoření modelu využit koncept dvoukanalového uspořádání, ve kterém je AZ reaktoru reprezentována "průměrným" a "maximálním" kanálem. Průměrný kanál představuje průměrné chování systému a slouží ke studiu zpětné vazby jednobodové kinetiky, maximální kanál je charakterizován maximálním výkonem [3]. Aktivní zóna reaktoru VR-1 je v tomto případě sestavena z 16 PČ, každý PČ je pak reprezentován jednotkovým modelem viz 3.4.4. Jelikož je vícenásobná spojovací jednotka BRANCH limitována na počet připojených komponent, tak AZ je reprezentována párem po 8 PČ. Více bude problematika nodalizace rozebrána v následujících kapitolách. Pro jednoduchost vychází všechny jednotkové modely z 8-trubkového PČ bez vytěsňitele. Axiální rozložení výkonu je pro všechny PČ stejné (viz 3.6), stejně tak jako zlomek celkového výkonu PČ, tj. předpokládá se rovnoměrný výkon všech PČ. Obtok skrze reaktorovou nádobu a volná hladina má stejnou konstrukci jako v případě modelů 3.7 a 3.8.



Obrázek 3.17: Termohydraulický model reaktoru VR-1.



# 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] S. Chatzidakis and A. Ikonopoulou. Phenomenological investigation of loss of coolant accident in a research reactor facility. *Nuclear Engineering and Design*, 256:341–349, 2013.
- [2] US Nuclear Regulatory Commission et al. Relap5/mod3. 2 code manual: Code structure, system models, and solution methods. *Idaho: National Engineering Laboratory*, 2001.
- [3] F. Fejt. *Analýza termohydraulických modelů reaktoru VR-1 s využitím trojrozměrné kinetiky*. PhD thesis, 2019.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] J.; al. et al. Rataj. Bezpečnostní zpráva školního reaktoru vr-1. Technical report, KJR FJFI ČVUT v Praze, 2017.
- [8] Patrícia A.L. Reis, Antonella L. Costa, Cláudia 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.
- [9] Obida M Zeitoun. *Subcooled flow boiling and condensation*. PhD thesis, 1994.
- [10] 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

### Název první přílohy

Zde napište text první přílohy nebo jej vložte, např.: `\input{priloha_A.tex}`.