

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2024

**MARTIN
ŠTYKS**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štyks** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **490929**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **ISP Jaderná energetická zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv teploty chladiva na rychlost postupu chladicí fronty

Název diplomové práce anglicky:

Influence of coolant temperature on the quench front velocity

Pokyny pro vypracování:

Práce bude obsahovat popis havárie s únikem chladiva (LOCA) a popis problematiky chlazení horkých povrchů ve vztahu k procesu zaplavování aktivní zóny reaktoru. Praktická část práce bude zaměřena na modifikaci stávajícího experimentálního zařízení pro studium zalévání aktivní zóny reaktoru. Modifikace bude zahrnovat návrh a realizaci předeřevu chladicí vody. Na tomto zařízení budou získána experimentální data pro vhodně zvolenou hodnotu průtoku vody a teplotní hladiny (povrchu i chladiva). Tato data budou v práci vyhodnocena se zaměřením na určení rychlosti postupu chladicí fronty.

Seznam doporučené literatury:

Štěpánek, J., DYNAMICS OF HEAT TRANSFER DURING COOLING OF OVERHEATED SURFACES, disertační práce, ČVUT v Praze, 2018

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Štěpánek, Ph.D. ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **12.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.06.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2025**

Ing. Jan Štěpánek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma vliv teploty chladiva na rychlost postupu chladicí fronty vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použité literatury.

V Praze dne 29. 5. 2024

.....

Martin Štyks

Anotační list

Jméno autora:	Martin
Příjmení autora:	Štyks
Název práce česky:	Vliv teploty chladiva na rychlost postupu chladicí fronty
Název práce anglicky:	Influence of coolant temperature on the quench front velocity
Rozsah práce:	počet stran: 88 počet obrázků: 65 počet tabulek: 29 počet příloh: 0
Akademický rok:	2023/2024
Jazyk práce:	čeština
Ústav:	Ústav energetiky
Studijní program:	Energetika a procesní inženýrství
Specializace:	ISP jaderná energetická zařízení
Vedoucí práce:	Ing. Jan Štěpánek, Ph.D.
Anotace česky:	Práce se zabývá popisem problematiky prudkého ochlazování horkých povrchů a jejím využitím v jaderných reaktorech při LOCA haváriích. Tento jev je potom zkoumán pomocí modifikovaného experimentálního zařízení určeného na spodní zaplavování vertikálního kanálu.
Klíčová slova:	přestup tepla, prudké ochlazování, chladicí fronta, LOCA
Anotace anglicky:	This thesis deals with the quenching phenomenon and its application during LOCA events in nuclear reactors. This phenomenon is then observed and studied using a modified experimental setup designed for bottom flooding of a vertical channel.
Key words:	heat transfer, quenching, quench front, LOCA

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu této práce Ing. Janu Štěpánkovi, Ph.D. za odborné vedení při tvorbě diplomové práce, za jeho cenné rady a ochotu vysvětlovat. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mě podporovali během celého studia, zejména bližší rodině a přítelkyni.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	8
Úvod.....	10
1 Teoretická část	11
1.1 Přenos tepla	11
1.1.1 Vznik a přenos tepla v jaderném reaktoru	12
1.1.2 Zbytkové teplo	12
1.2 Dvoufázové proudění	14
1.2.1 Režimy proudění	14
1.2.2 Nukiyamova křivka.....	15
1.3 Krize přestupu tepla	18
1.3.1 Krize přestupu tepla prvního druhu	18
1.3.2 Krize přestupu tepla druhého druhu.....	18
1.3.3 Předejití krize přestupu tepla u jaderných reaktorů	19
1.4 Havárie LOCA	21
1.4.1 Malé LOCA havárie (SB LOCA)	21
1.4.2 Velké LOCA havárie (LB LOCA).....	22
1.4.2.1 Blow-Down – dekomprese a vyprazdňování primárního okruhu	22
1.4.2.2 Refill – zaplavení spodního prostoru reaktorové nádoby.....	24
1.4.2.3 Reflood - opětovné zaplavení aktivní zóny	24
1.4.2.4 Dlouhodobé dochlazování aktivní zóny	25
2 Experimentální část.....	27
2.1 Historie experimentu	27
2.2 Experimentální zařízení	28
2.2.1 Konstrukce a rozměry zařízení	28
2.2.2 Provedené změny.....	30
2.3 Ohřev testovací sekce a měření teploty.....	32
2.3.1 Uchycení termočlánků	34
2.4 Výpočet a měření průtoku vody.....	35
2.4.1 Výpočet objemového průtoku testovací sekcí	35
2.4.2 Způsob měření průtoku	36
2.4.3 Kalibrace průtoku	36
2.5 Ohřev vody.....	38

2.6	Záznam dat	40
2.7	Metodika měření	40
2.7.1	Nastavení průtoku a teploty vody	41
2.7.2	Ohřev trubky	41
2.7.3	Zaplavování testovací sekce	43
3	Zpracování naměřených hodnot.....	44
3.1	Struktura skriptu.....	44
3.2	Detekce začátku a konce experimentu	45
3.3	Hledání důležitých teplotních bodů	47
3.4	Výpočet rychlosti chladicí fronty.....	49
3.5	Výpočet relativní rychlosti chladicí fronty	49
4	Výsledky měření	51
4.1	Nejistota měření	51
4.2	Výsledné hodnoty rychlosti postupu chladicí fronty	52
4.2.1	Závislost rychlosti na jednotlivých úsecích testovací sekce	53
4.2.2	Závislost rychlosti na počáteční teplotě testovací sekce.....	58
4.2.3	Závislost rychlosti na teplotě chladicí vody	60
4.2.4	Rychlost chladicí fronty na delších úsecích.....	63
4.2.5	Relativní rychlost chladicí fronty	69
4.3	Výsledné hodnoty teplot prudkého ochlazování	72
4.3.1	Bezrozměrné teploty prudkého ochlazování.....	76
5	Závěr	81
	Seznam použité literatury	83
	Seznam obrázků.....	86
	Seznam tabulek.....	88

Seznam použitých symbolů a zkratek

λ	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	tepelná vodivost
q'	[Wm ⁻²]	hustota tepelného toku
T	[K]	termodynamická teplota
α	[Wm ⁻² K]	součinitel přestupu tepla
E_i	[MeV]	část energie z jednoho štěpení
E_c	[MeV]	celková energie z jednoho štěpení
<i>BWR</i>	-	boiling water reactor = varný reaktor
P	[MW]	zbytkové teplo
P_0	[MW]	provozní výkon reaktoru
q'_{max}	[Wm ⁻²]	maximální hodnota hustoty tepelného toku
T_w	[°C]	teplota stěny
T_{ch}	[°C]	teplota chladiva
T_{sat}	[°C]	teplota sytosti
<i>DNB</i>	-	departure from nucleate boiling
<i>CHF</i>	-	critical heat flux = kritický tepelný tok
<i>DNBR</i>	-	departure from nucleate boiling ratio
Z	[m]	výška aktivní zóny
L	[m]	délka aktivní zóny
<i>CPR</i>	-	critical power ratio
<i>LOCA</i>	-	loss of coolant accident = havárie se ztrátou chladiva
<i>SB LOCA</i>	-	small break LOCA = malé LOCA havárie
<i>LB LOCA</i>	-	large break LOCA = velké LOCA havárie
<i>VVER</i>	-	tlakovodní reaktor východního typu
<i>PWR</i>	-	tlakovodní reaktor západního typu
D_h	[m]	hydraulický průměr
\dot{m}	[kgs ⁻¹]	hmotnostní průtok
G	[kgm ⁻² s ⁻¹]	hmotnostní průtok na jednotku plochy
d	[mm]	vnitřní průměr trubky
S_I	[m ²]	průtočná plocha trubky
ρ	[kgm ⁻³]	hustota vody
Q	[lmin ⁻¹]	objemový průtok
U_0	[V]	požadovaná hodnota napětí
<i>TČ</i>	-	termočlánek
T_q	[°C]	teplota prudkého ochlazování
T_{chf}	[°C]	teplota maximálního tepelného toku
T_{nb}	[°C]	teplota přechodu mezi bublinkovým varem a nucenou konvekcí

$T'(s)$	$[^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}]$	první časová derivace teploty
$T''(s)$	$[^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-2}]$	druhá časová derivace teploty
H_i	[m]	výška i-tého termočlánku
t_{chf}	[s]	čas dosažení teploty maximálního tepelného toku
u_{ij}	$[\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}]$	rychlost postupu chladicí fronty mezi termočlánky i a j
u'	-	relativní rychlost postupu chladicí fronty
c	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	vstupní rychlost chladiva
\bar{y}	-	aritmetický průměr naměřených hodnot
n	-	počet opakování měření
$s(\bar{y})$	-	směrodatná odchylka
k	-	studentův koeficient
t_v	$[^{\circ}\text{C}]$	teplota chladicí vody
R^2	-	hodnota spolehlivosti proložené křivky
l_{ij}	[mm]	vzdálenost mezi termočlánky i a j
t_t	$[^{\circ}\text{C}]$	počáteční teplota testovací sekce

Úvod

Fyzikální procesy spojené s prudkým ochlazováním horkých povrchů (anglicky quenching) hrají významnou roli v mnoha různých odvětvích. Příkladem lze uvést zpracovatelský průmysl, kde se uplatňují při kalení ocelí. V souvislosti s jadernou energetikou tato problematika nabývá ještě větší důležitosti, jelikož se od ní přímo odvíjí bezpečnost celého jaderného zařízení. Proto je důležité v tomto oboru nadále prohlubovat znalosti a zkoumat souvislosti s jevy probíhajícími v jaderném reaktoru.

Prudké ochlazování horkých povrchů je v jaderném reaktoru přítomné při haváriích se ztrátou chladiva, kdy nastane obnažení aktivní zóny. Včasným zafungováním havarijních systémů je zahájeno opětovné zaplavování prostorů mezi palivovými proutky, avšak pokud teplota povrchu vzrostla nad Leidenfrostovu teplotu, dochází k okamžitému vypařování chladicí vody. U stěn se vytvoří izolační parní vrstva, která zabraňuje přestupu tepla a povrch palivových proutků je tak ochlazován pouze stoupající směsí páry a vody. Jakmile teplota stěny klesne pod Leidenfrostovu teplotu, je opět umožněn přímý kontakt mezi kapalinou a povrchem.

Vytvořená hranice mezi smáčeným a nesmáčeným povrchem postupuje přibližně konstantní rychlostí směrem k hornímu konci aktivní zóny a označujeme ji pojmem chladicí fronta. Rychlost pohybu chladicí fronty je závislá zejména na počáteční teplotě ohřátého povrchu, hmotnostním průtoku chladiva a v této práci bude mimo jiné zkoumána závislost na teplotě chladicí vody.

Pro tyto účely bylo modifikováno experimentální zařízení na studium spodního zaplavování horkého vertikálního kanálu a byla provedena série měření pro určení důležitých teplotních bodů na ochlazovacích křivkách povrchu materiálu. Tyto hodnoty byly potom následně využity pro určení samotných rychlostí postupu chladicí fronty a jejich závislostí na počátečních parametrech.

1 Teoretická část

1.1 Přenos tepla

Pojmem přenos neboli sdílení tepla označujeme proces směřující k vyrovnávání teplot, a tím dosažení termodynamické rovnováhy mezi dvěma systémy s rozdílnou teplotní hladinou. Směr přenosu je orientován vždy od místa s vyšší teplotou k místu s nižší teplotou a probíhá jedním ze tří způsobů – kondukcí, konvekcí či radiací.

Vedení tepla (konduktce) probíhá zejména v pevných tělesech a je realizováno interakcí mezi atomy a molekulami vznikající v důsledku nerovnoměrného rozložení teplot. Experimentálně jsme schopni určit hodnoty tepelné vodivosti λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$], což je veličina charakterizující jak dobře daná látka vede teplo. U plyných látek je teplotní vodivost nejnižší, u kapalin přibližně desetinásobná a u pevných látek může dosahovat hodnot řádově vyšších (desítky až stovky $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). Základním vztahem popisujícím vedení tepla je Fourierův zákon [1]:

$$q' = -\lambda \cdot \nabla T \quad (1)$$

kde q' je hustota tepelného toku a ∇T gradient termodynamické teploty.

Proudění (konvekce) probíhá pouze u tekutin, jelikož jeho předpokladem je usměrněný makroskopický pohyb částic. Je-li proudění vyvoláno rozdílnými hustotami na různých místech kapaliny, hovoříme o volné (přirozené) konvekci. Pokud k proudění dochází působením čerpadel nebo jiných přímých silových účinků na kapalinu, jedná se o konvekci nucenou. V souvislosti s prouděním se definuje součinitel přestupu tepla α [Wm^{-2}K], který poskytuje informaci o tom, kolik tepla se vymění mezi tekutinou a 1 m^2 pevné stěny při teplotním rozdílu 1 K. Základním vztahem popisujícím konvekci je Newtonův ochlazovací zákon [3]:

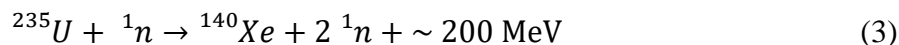
$$q' = \alpha \cdot \Delta T \quad (2)$$

kde ΔT je rozdíl teplot teplosměnné plochy a chladiva.

Záření (radiace) je způsob přenosu tepla zprostředkovaný elektromagnetickými vlnami s vlnovou délkou přibližně v rozmezí $0,1 - 100 \mu\text{m}$ a úzce souvisí s kvantovou teorií. Dochází k němu u pevných, kapalných i plyných látek a na rozdíl od jiných typů přenosu tepla není u radiace zapotřebí specifického prostředí mezi dvěma povrchy. [2]

1.1.1 Vznik a přenos tepla v jaderném reaktoru

Během štěpné reakce v jaderném reaktoru se uvolňuje značné množství energie. Při uvažování jednoho z nejčastějších případů štěpení využívaných v jaderných elektrárnách (3), lze uvést přibližné průměrné rozdělení energie z jednoho štěpení (tabulka 1).



	E_i [MeV]	E_i/E_c [%]
Kinetická energie štěpných trosek	165,4	83,3
Energie neutronů	11,1	5,6
Energie okamžitého záření gama	6,0	3,0
Energie volných neutronů	6,0	3,0
Energie zpožděného záření gama	5,0	2,5
Energie zpožděného záření beta	5,0	2,5

Tabulka 1 – Rozdělení energií z jednoho štěpení uranu U235 [4]

E_i představuje jednotlivé formy energií a E_c celkovou uvolněnou energii z jednoho štěpení uranu 235. Celková energie je přibližně 198,5 MeV, přičemž z uvedených energií nemůže být využita energie neutronů, které kvůli malým účinným průřezům nereagují s hmotou uvnitř reaktoru, a také část energie ze zpožděného záření gama. Neštěpné reakce neutronů naopak přináší energii asi 4 MeV na jedno štěpení a celková využitelná energie pro jedno štěpení ${}^{235}\text{U}$ je tedy přibližně 190 MeV. [4]

U tlakovodních reaktorů za normálního stavu převažuje přenos tepla konvekcí, jelikož konvekce zajišťuje předávání tepla z palivových souborů do chladiva. V reaktoru dochází také ke sdílení tepla kondukcí, konkrétně v palivových peletkách a pokrytí. Radiace představuje významnou část přenosu tepla zejména u varných reaktorů (BWR), avšak objevuje se i u tlakovodních reaktorů při poruchových stavech, jako je například krize varu.

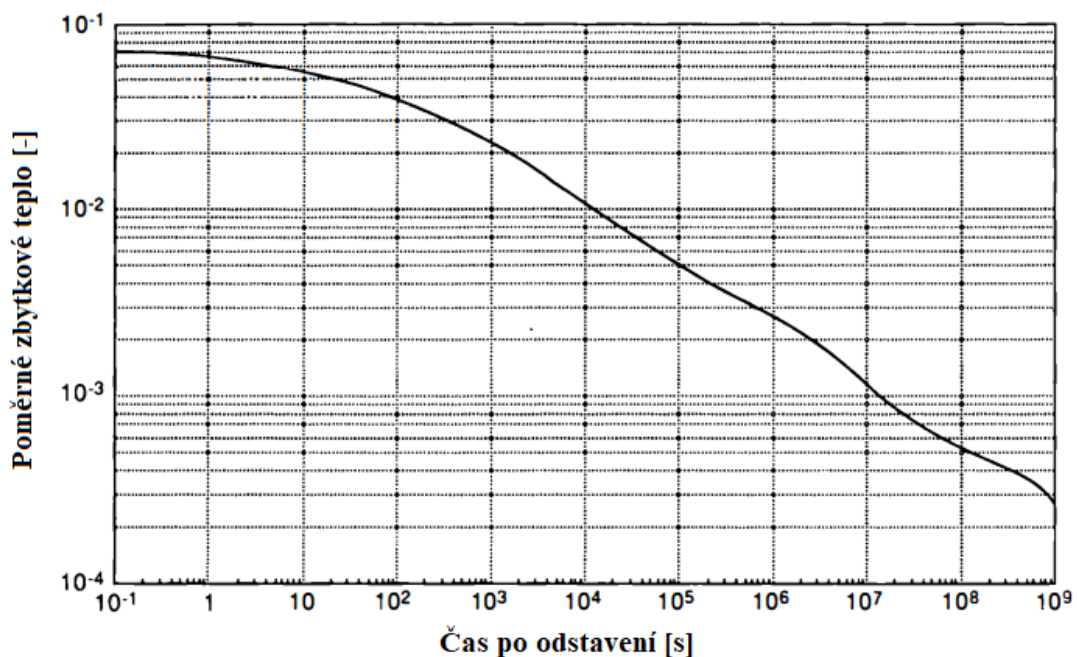
1.1.2 Zbytkové teplo

Po odstavení jaderného reaktoru dojde k téměř okamžitému přerušení štěpné reakce uranu ${}^{235}_{92}\text{U}$ a plutonia ${}^{239}_{94}\text{Pu}$, díky čemuž výrazně klesne množství generovaného tepla. V reaktoru se však stále nachází radioaktivní produkty těchto štěpných reakcí, které

jsou zdrojem dalších radioaktivních rozpadů a generují tedy teplo i po odstavení reaktoru. Toto teplo označujeme jako zbytkové a je tvořeno součtem tepla ze tří zdrojů [5]:

1. Dobíhající štěpná řetězová reakce $^{235}_{92}\text{U}$ a $^{239}_{94}\text{Pu}$
2. Radioaktivní přeměna produktů štěpení
3. Radioaktivní přeměna produktů neutronového zachytu

Zbytkové teplo představuje ihned po odstavení reaktoru typicky přibližně 7 % provozního výkonu reaktoru a postupem času exponenciálně klesá. Největší vliv na zbytkové teplo má radioaktivní přeměna produktů štěpení, která je závislá na množství štěpných trosk a tedy i na provozním výkonu reaktoru a době provozu před odstavením. Uvažujeme-li reaktor s uranovým palivem provozovaný na konstantní hodnotě výkonu po nekonečně dlouhou dobu před jeho okamžitým odstavením, zjistíme závislost poměrného zbytkového tepla (podíl zbytkového tepla P a původního provozního výkonu reaktoru P_0) na době po odstavení znázorněnou na obrázku 1. [16]



Obrázek 1 – Závislost poměrného zbytkového tepla na době po odstavení reaktoru [16]

Jelikož neexistuje žádný efektivní způsob, jak se zbytkového výkonu po odstavení reaktoru zbavit, musí chladicí systémy zajistit chlazení aktivní zóny i dlouhou dobu po odstavení reaktoru. Při nedostatečném chlazení by mohlo zahříváním paliva dojít až k jeho tavení a v nejhorším případě k úniku radioaktivních látek do okolí. Z toho důvodu je systém odvodu zbytkového tepla jednou z nejdůležitějších součástí jaderného reaktoru a má významný vliv na bezpečnost v případě mnoha různých havarijních situací. [17]

1.2 Dvofázové proudění

Dvofázovým prouděním rozumíme proudění tekutiny současně v plynné i kapalně fázi. Na rozdíl od jednofázového proudění, při výskytu dvou fází nemůžeme využít kritériálních rovnic, ale musíme využít složitější výpočtové modely. Tento typ proudění nastává při dosažení teploty sytosti, kdy v reaktoru začne docházet k varu, jenž má negativní vliv na proces přestupu tepla a celkovou funkci reaktoru. [6]

1.2.1 Režimy proudění

Typy varu rozlišujeme na základě několika hledisek [6,7]:

a. Dle teploty chladiva

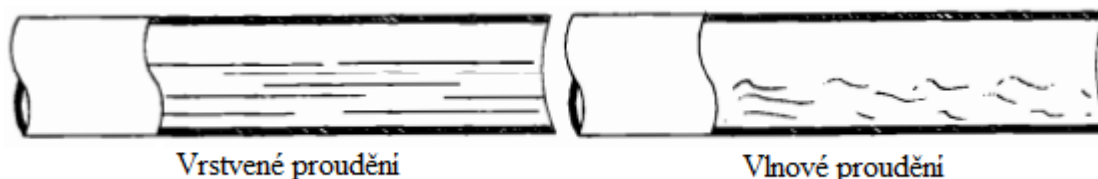
- Podchlazený var – je-li teplota chladiva nižší a teplota teplosměnného povrchu větší než teplota sytosti, dochází k varu pouze na povrchu teplosměnné plochy, kde chladivo dosahuje teploty sytosti (označován také jako místní)
- Objemový var – je-li teplota chladiva rovna teplotě sytosti, dochází k varu v celém objemu chladiva (označován také jako nasycený)

b. Dle intenzity varu

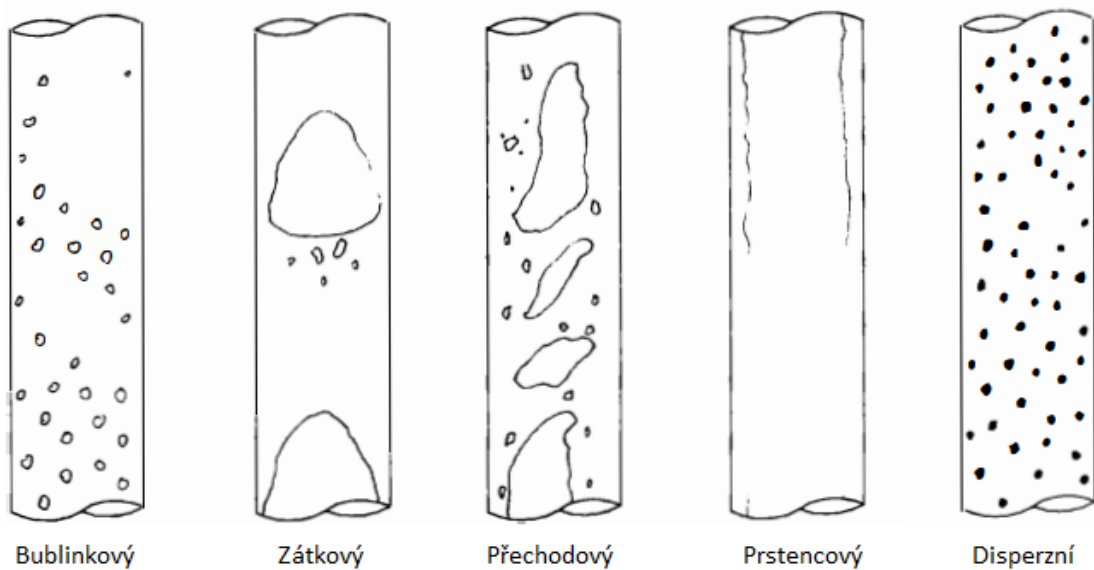
- Bublincový var – charakteristický malým rozdílem mezi teplotou stěny a teplotou sytosti a také malou hustotou tepelného toku ze stěny do chladiva
- Blánový var – vysoký rozdíl mezi teplotami stěny a sytosti, velká hustota tepelného toku
- Smíšený var – současné uplatnění bublinkového i blánového varu

c. Dle směru proudění

- Horizontální – oproti vertikálnímu se zde vyskytují i jiné režimy proudění (vrstvené proudění, vlnové proudění – znázorněny na obrázku 2)
- Vertikální – typické režimy proudění znázorněny na obrázku 3



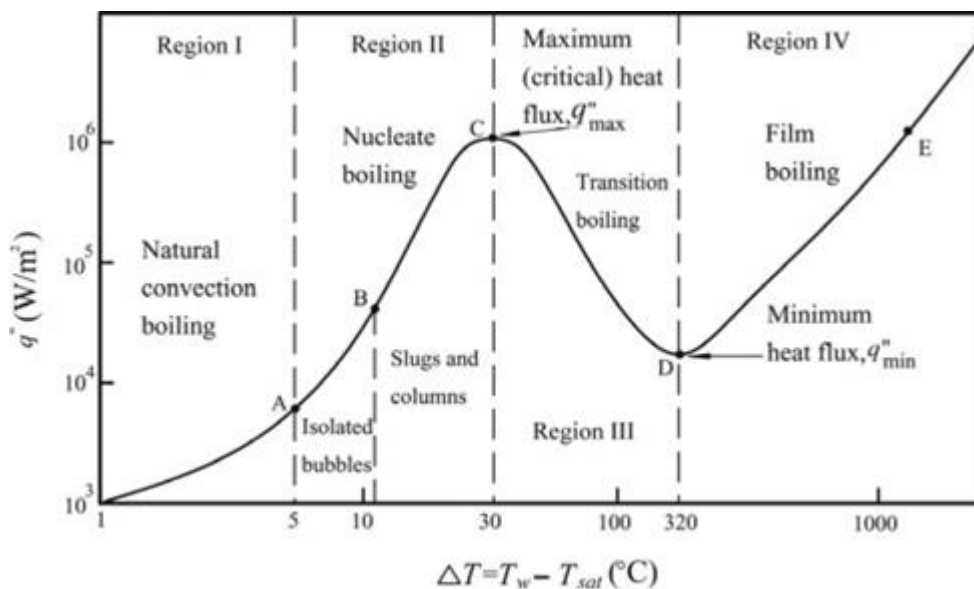
Obrázek 2 – Režimy dvofázového proudění u horizontálního kanálu [5]



Obrázek 3 – Režimy dvoufázového proudění u vertikálního kanálu [5]

1.2.2 Nukiyamova křivka

Základním kamenem studií různých typů varu je nepochybně práce japonského vědce Shira Nukiyamy, který již v roce 1934 popsal závislost hustoty tepelného toku q' [W/m^2] na teplotním rozdílu mezi stěnou a chladící tekutinou ΔT [$^{\circ}\text{C}$] [9]. Této závislosti se také říká křivka varu a řídí se již zmíněným Newtonovým zákonem (2). Tvar křivky varu pro vodu při atmosférickém tlaku je znázorněn na obrázku 4.



Obrázek 4 – Křivka varu vody při atmosférickém tlaku [8]

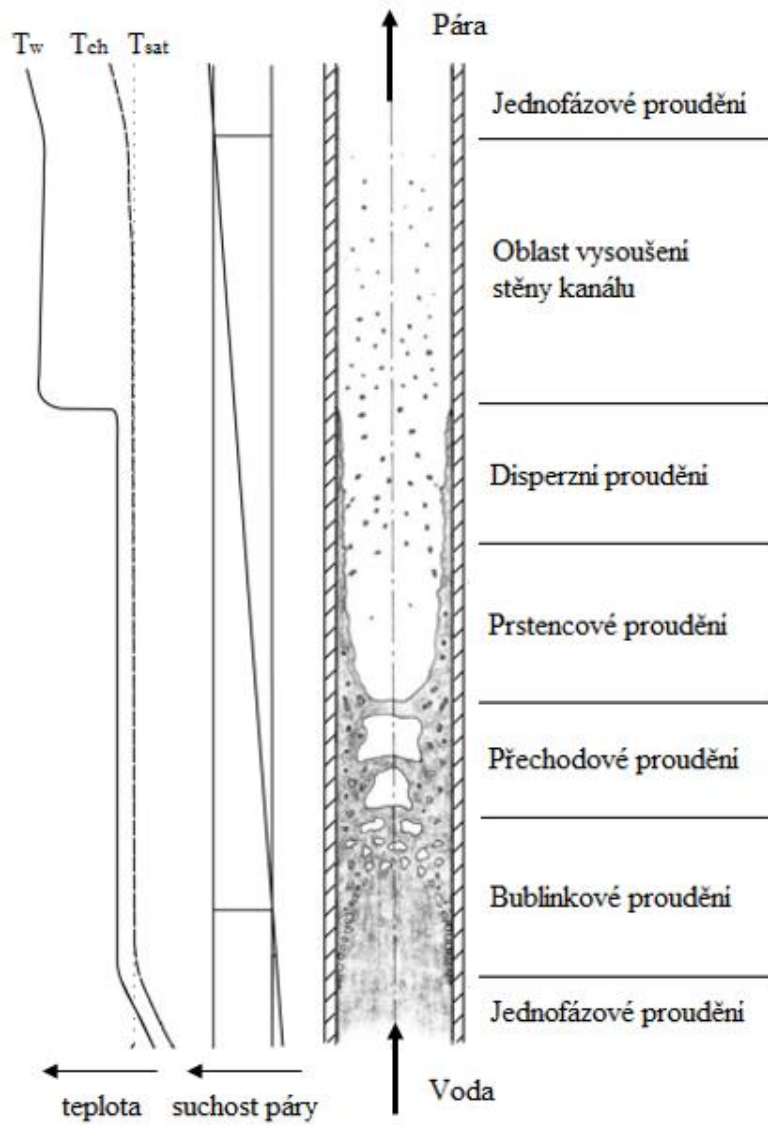
Na obrázku 4 můžeme vidět, že je křivka rozdělena na několik oblastí dle teplotních rozdílů ΔT . V oblasti I, tedy když je teplotní rozdíl menší než $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, nedochází ke tvorbě bublin, proudění je jednofázové a teplo je tedy přenášeno přirozenou konvekcí.

Oblast II označuje bublinkový var. Jakmile rozdíl teplot přesáhne hodnotu $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (bod A), začnou se na konkrétních místech na povrchu stěny tvořit bublinky, které se postupně zvětšují a nakonec se od stěny odtrhnou a implodují. Primárními místy vzniku bublin jsou mikroskopické trhliny a nerovnosti, které zvětšují kontaktní plochu mezi kapalinou a povrchem a voda se tedy vypařuje rychleji. Ačkoliv je v tomto režimu varu stále nejvýznamnější přenos tepla konvekcí, charakter konvekce je výrazně odlišný od procesů probíhajících za nižších teplotních rozdílů ($< 5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Bublinkový var může být totiž v této formě i prospěšný, jelikož odtrháváním bublin se zvyšuje rychlost proudění u stěny, a tím se stává přenos tepla efektivnějším. Dostaneme-li se však do oblasti B – C, zlepšují se podmínky pro var v celém objemu kapaliny a hustota bublinek bude natolik velká, že mezi sebou budou interagovat, tvořit větší tělesa (tzv. zátky) a místo imploze vystoupají k volné hladině. Tím snižují celkovou kontaktní plochu mezi kapalinou a povrchem materiálu a sklon křivky varu se zmenšuje, dokud hustota tepelného toku nedosáhne své maximální hodnoty q'_{max} (bod C). [8,10]

Zvyšuje-li se nadále teplotní rozdíl ΔT (oblast III), začne se na stěně tvořit větší množství bublin, které se nestihnou odtrhnout a místo toho se u povrchu spojují a tvoří takzvané blány. Tyto blány snižují hustotu tepelného toku, avšak nejsou stabilní, mohou se od povrchu odtrhnout, a tím obnovit kontakt mezi kapalinou a stěnou - hovoříme o přechodovém varu. Tento proces má za následek velké kolísání teplot, proto teplotní rozdíly uvedené mezi body C a D na obrázku 4 musíme uvažovat pouze jako přibližné. Hustota tepelného toku klesá, dokud teplotní rozdíl nedosáhne takové hodnoty, kdy se na povrchu vytvoří souvislá parní vrstva izolující vodu od stěny materiálu (bod D). Toto místo označujeme jako Leidenfrostův bod a dochází k blánovému varu. [8]

V oblasti IV vrstva páry zamezuje kontaktu mezi chladicí kapalinou a horkým povrchem, který se tedy nadále přehřívá a může dojít až k poškození materiálu. Sdílení tepla je zde zprostředkováno převážně radiací. [10]

Na obrázku 5 můžeme vidět různé režimy proudění v ohřívaném vertikálním kanálu v závislosti na teplotě stěny T_w , teplotě chladiva T_{ch} , teplotě sytosti T_{sat} a suchosti páry.



Obrázek 5 – Režimy proudění v ohřivaném vertikálním kanálu

1.3 Krize přestupu tepla

Křivka varu popsaná v předchozí kapitole předpokládá, že jsme schopni nezávisle kontrolovat teplotu povrchu stěny, respektive teplotní rozdíl mezi stěnou a chladicí kapalinou. U jaderných reaktorů však korigujeme hodnotu výkonu, tedy výstupního tepelného toku. V takovém případě je tvar křivky stejný jen do maximální hodnoty tepelného toku (bod C), ale při dalším zvýšení tepelného toku dojde k přeskočení části křivky mezi body C – E [9]. Hodnota maximálního tepelného toku se také označuje jako kritický tepelný tok a využívá se při bezpečnostních výpočtech při návrhu jaderného reaktoru. Obdobně při snižování tepelného toku (počínaje v bodě E) je křivka totožná až do Leidenfrostova bodu a poté dochází ke skokové změně do režimu bublinkového varu (mezi body A a B). [8]

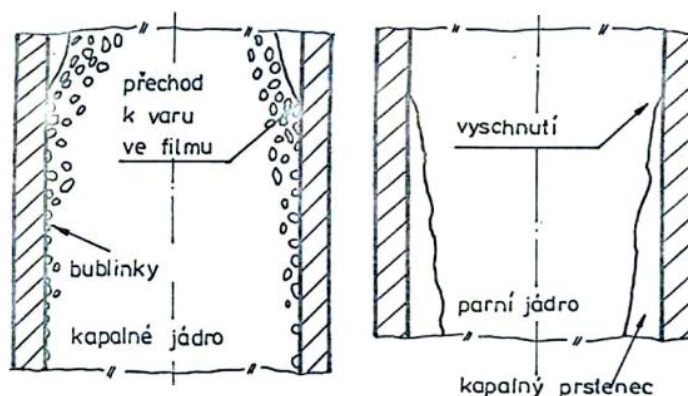
1.3.1 Krize přestupu tepla prvního druhu

Krize přestupu tepla prvního druhu (také označovaná jako Departure from Nucleate Boiling, zkráceně DNB) je nežádoucí jev, ke kterému dochází, když bublinkový var přejde do blánového varu při dosažení kritického tepelného toku. Při jeho dalším zvyšování se začíná vytvářet celistvý parní film blízko povrchu materiálu, který znemožňuje teplosměnné ploše odvádět teplo chladicí kapalině. To způsobí skokový nárůst teploty povrchu materiálu, což může u jaderného reaktoru znamenat poškození palivového proutku a únik radioaktivních produktů štěpení. K tomuto jevu dochází při vysokých tepelných tocích a malých hmotnostních podílech páry a v literatuře bývá také často označován jako burn-out. [11,12]

1.3.2 Krize přestupu tepla druhého druhu

Ke krizi přestupu tepla druhého druhu dochází při nižších hodnotách tepelných toků a menších hmotnostních průtocích než u krize přestupu tepla prvního druhu. Režim proudění je prstencový až disperzní, přičemž velký podíl tvoří parní fáze, která proudí středem kanálu a kapalina tvoří pouze tenký film na stěně materiálu. V důsledku varu a zvýšeného odpařování se odtrhává kapalný film a vytváří se suchá místa na stěně, kde dochází ke krizi přestupu tepla (označováno jako dry-out). Na těchto místech rychle roste teplota povrchu, ale jelikož je díky vysoké rychlosti proudící páry součinitel přestupu

tepla relativně vysoký, není tato změna tak prudká jako u prvního druhu. Vznik prvního i druhého druhu krize přestupu tepla je schematicky znázorněn na obrázku 6.



Obrázek 6 – Vznik krize přestupu tepla 1. druhu (vlevo) a 2. druhu (vpravo)[13]

1.3.3 Předejití krize přestupu tepla u jaderných reaktorů

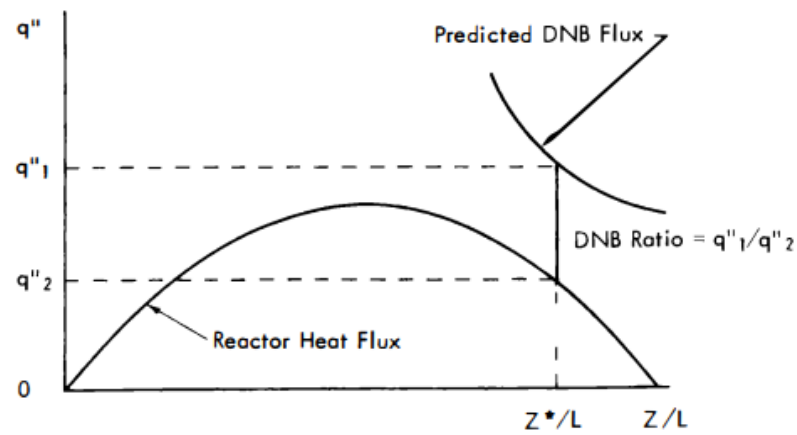
Jak již bylo zmíněno, krize přestupu tepla je u jaderných reaktorů nežádoucí jev, který může mít katastrofální následky z hlediska jaderné bezpečnosti. Proto je při návrhu reaktoru nutné zavést dostatečně přesné bezpečnostní korelační limity tak, aby k tomuto jevu za žádných provozních podmínek nedošlo.

Základním parametrem pro bezpečnostní výpočty je kritický tepelný tok (označován jako CHF = critical heat flux), tedy taková hodnota tepelného toku, při které dochází k přechodu mezi bublinkovým a blánovým varem. Tuto hodnotu je však velmi těžké přesně určit, jelikož je závislá na mnoha provozních parametrech. Proto se v souvislosti s krizí varu zavádí pojem DNBR (departure from nucleate boiling ratio), což je poměr mezi odhadovaným kritickým tepelným tokem a lokálním tepelným tokem v konkrétním místě reaktoru [5,15]:

$$DNBR = \frac{\textit{kritický tepelný tok}}{\textit{lokální tepelný tok}} \quad (4)$$

U tlakovodních reaktorů se při návrhu počítá s limitem DNBR takovým, aby s 95 % pravděpodobností na žádném místě reaktoru při normálním i abnormálním provozu nedošlo ke krizi varu prvního druhu. Nejnižší limitní hodnota DNBR je uváděna okolo 1,2, přičemž očekávaná hodnota při nominálním výkonu je přibližně 2,08. [14]

Na obrázku 7 můžeme vidět závislost tepelného toku na poměru výšky Z a celkové délky aktivní zóny L a také grafické vyjádření DNBR v horkém kanálu.



Obrázek 7 – Grafické znázornění DNBR

U varných reaktorů se místo DNBR definuje pojem CPR (critical power ratio), což představuje poměr výkonu, při kterém dochází ke krizi varu, a lokálního reálného výkonu a je pro jakoukoliv hodnotu nominálního výkonu menší než hodnota DNBR [5]:

$$CPR = \frac{\textit{kritický výkon}}{\textit{reálný lokální výkon}} \quad (5)$$

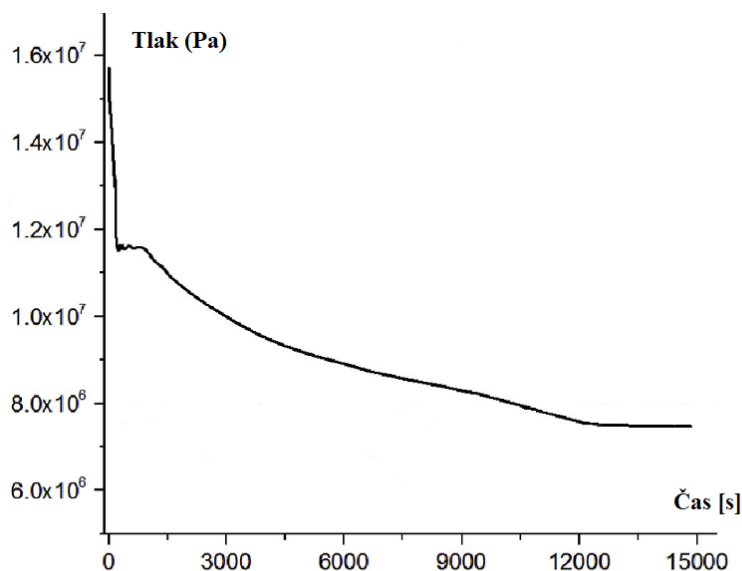
1.4 Havárie LOCA

Jednou z nejzávažnějších havárií, které mohou na jaderné elektrárně nastat, je havárie se ztrátou chladiva neboli Loss-of Coolant Accident (odtud LOCA). Jako LOCA se označují havárie a nehody různých rozsahů od prasknutí trubky parního generátoru (malé LOCA) až po prasknutí hlavního cirkulačního potrubí primárního okruhu (velké LOCA), které má největší vliv z hlediska bezpečnosti a negativních účinků na okolí. [18]

1.4.1 Malé LOCA havárie (SB LOCA)

Mezi tyto havárie se řadí prasknutí trubky parního generátoru nebo prasknutí potrubí, při kterém dojde k takovému úniku chladiva, že si s ním samotný systém doplňování primárního okruhu nedokáže poradit. Maximální průtočná plocha trhliny, kdy ještě hovoříme o malé LOCA havárii, je přibližně $0,05 \text{ m}^2$. [5]

V případě velmi malých úniků je doplňování chladiva zajištěno pomocí vysokotlakého systému havarijního chlazení a odvod zbytkového tepla a odtlakování probíhá pomocí parogenerátorů. Je-li trhlina v potrubí větší, není vysokotlaký systém sám o sobě schopný vykompenzovat ztrátu chladiva. Dochází tak k rychlému poklesu tlaku v primárním okruhu až na hodnotu přibližně $1,5 \text{ MPa}$, kdy se spustí hydroakumulátory a ustálí se hodnota tlaku (znázorněno na obrázku 8). [5]



Obrázek 8 – Závislost tlaku na čase při LOCA havárii [19]

V případě malých LOCA havárií nedochází ke spuštění nízkotlakého systému havarijního chlazení a konkrétní průběh je silně závislý na velikosti trhliny a místě, kde k ní došlo.

1.4.2 Velké LOCA havárie (LB LOCA)

Za velké LOCA havárie považujeme takové situace, kdy dojde k trhlině na hlavním cirkulačním potrubí o velikosti alespoň 25 % maximální průtočné plochy potrubí. Jako maximální projektová havárie je potom uvažované prasknutí studené větve hlavního cirkulačního potrubí a jeho následné posunutí tak, že dochází k oboustrannému výtoku chladiva. Následuje mnoho vzájemně provázaných jevů a termohydraulických procesů, na základě kterých jsou spouštěny příslušné bezpečnostní systémy, jak bude popsáno níže. Pravděpodobnost LB LOCA je sice menší než pravděpodobnost menších úniků chladiva, avšak dochází při ní k největším teplotním změnám pokrytí paliva, a proto bude dále popsán průběh právě této události. Průběh menších havárií bude obdobný, přičemž jednotlivé fáze budou v závislosti na velikosti trhliny opožděny. [5, 18, 20]

Průběh LOCA havárie se za účelem zjednodušení fenomenologicky rozděluje na čtyři základní fáze: [18]

- a. Blow-Down – dekomprese a vyprazdňování primárního okruhu
- b. Refill – opětovné zaplavení spodního prostoru reaktorové nádoby
- c. Reflood – opětovné zaplavení aktivní zóny
- d. Dlouhodobé dochlazování aktivní zóny

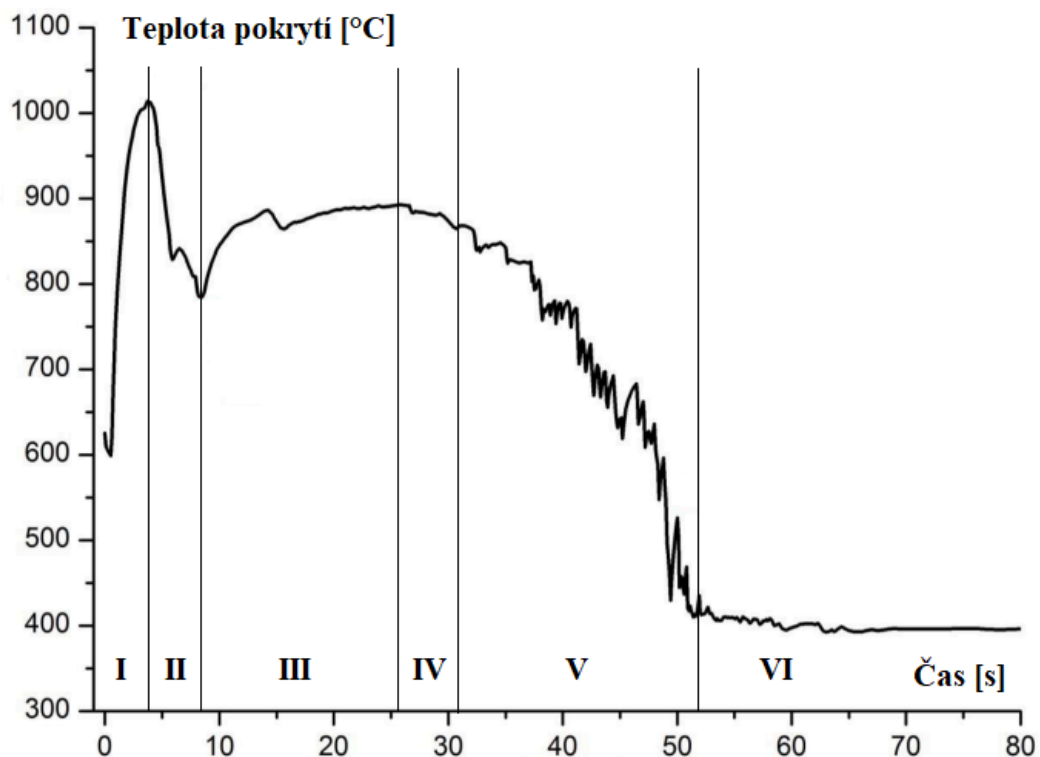
Toto rozdělení platí v případě, kdy úspěšně zasáhnou všechny příslušné bezpečnostní systémy a nedojde tak k tavení aktivní zóny. V následujících kapitolách budou podrobněji popsány jednotlivé fáze.

1.4.2.1 Blow-Down – dekomprese a vyprazdňování primárního okruhu

Ihned po prasknutí studené větve primárního okruhu dojde k prudkému poklesu tlaku a velkému úniku chladiva. V první fázi z potrubí vytéká kapalina o teplotě nižší, než je její teplota sytosti a pokles tlaku je velmi strmý (obrázek 8). Druhá fáze nastává po několika desítkách milisekund, a to ve chvíli, kdy hodnota tlaku v horní komoře reaktoru dosáhne meze sytosti vody a vytvoří se dvoufázová směs vody a páry. Rychlost expanze mimo potrubí se výrazně zmenší, i přes to však proběhne celkové vyprázdňování primárního okruhu v řádu desítek sekund. Během této doby hrozí riziko krize varu, a tím i zhoršeného chlazení aktivní zóny. Pro prodloužení doby, kdy je aktivní zóna dostatečně ochlazována, je aktivován vysokotlaký systém vstřikování, avšak v případě LB LOCA odtéká většina chladiva mimo reaktor. [5]

Ihned po prasknutí potrubí začne vlivem záporné zpětné vazby dutinového koeficientu reaktivity klesat výkon reaktoru až na úroveň zbytkového výkonu. Tato situace nastane kvůli vzniku velkého množství páry v aktivní zóně, přičemž ostatní vlivy jako Dopplerův efekt, změna teploty moderátoru či pád regulačních tyčí, jsou zanedbatelné. Zasunutí regulačních tyčí je však nutné pro následné znovu-zaplavování aktivní zóny. [18]

Při detailních analýzách zjistíme, že obnažení aktivní zóny je při LB LOCA prakticky nevyhnutelné, musí být však dodrženy limitní podmínky provozních režimů paliva. V opačném případě by mohlo dojít k poškození palivového pokrytí a úniku štěpných produktů mimo primární okruh. Zirkoniové pokrytí začíná ztrácet své pevnostní vlastnosti již při teplotách nad 350 °C a při dalším nárůstu teploty (kritickou teplotou je přibližně 1200 °C) probíhá na jeho povrchu oxidace. Průběh teploty pokrytí je znázorněn na obrázku 9. [5]



Obrázek 9 – Závislost teploty pokrytí paliva na čase při LB LOCA [21]

Primární pík teploty nastává několik sekund po porušení potrubí vlivem zhoršených chladících podmínek (oblast I). Následný pokles teploty je vyvolán částečným průtokem chladiva po poklesu výkonu reaktoru na úroveň zbytkového výkonu a inverzí proudu chladiva přes aktivní zónu (oblast II). Pokračující vývin tepla a stagnace

chladiwa v reaktoru však způsobí opětovný nárůst teploty, který je zpomalen zásahem systém havarijního dochlazování (oblast III). Poté už teplota pokrytí klesá, nejprve v rámci fáze „refill“ (oblast IV) a následně během fáze „reflood“ (oblast V). Po úspěšném zaplavení aktivní zóny je zahájeno dlouhodobé dochlazování (oblast VI). [21]

1.4.2.2 Refill – zaplavení spodního prostoru reaktorové nádoby

Druhá fáze LB LOCA začíná poklesem tlaku v primárním okruhu pod hodnotu 6 MPa, čímž jsou otevřeny zpětné ventily hydroakumulátorů a spustí se nouzové chlazení aktivní zóny. Studená voda z hydroakumulátorů kondenzuje páru v přívodním potrubí a tvoří se dvoufázová směs, která částečně přispívá k chlazení a následně se shromažďuje na dně reaktorové nádoby. Významným problémem je však ztráta obtokem, kdy chladící voda vůbec neprojde aktivní zónou a přes prasklinu v potrubí uniká mimo primární okruh. Průtoku vody totiž brání stoupající proud páry vznikající v aktivní zóně při styku studené vody s přehřátými povrchy materiálů. Růst teploty v aktivní zóně sice zpomalí, ale k jeho zastavení dojde až v další fázi. [18]

1.4.2.3 Reflood - opětovné zaplavení aktivní zóny

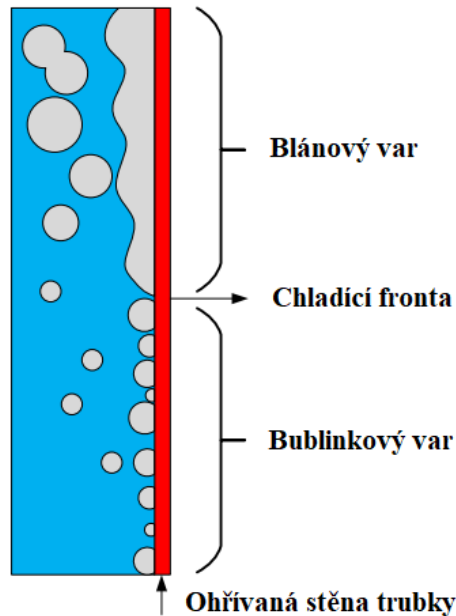
Tlak v primárním okruhu nadále klesá, a jakmile dosáhne hodnoty 0,7 MPa, spustí se nízkotlaký systém havarijního chlazení (0,7 MPa odpovídá tlaku ve výtlaku nízkotlakých čerpadel). Teprve tento systém je schopen zajistit zaplavení aktivní zóny, jedná se však o velice komplikovaný proces. V případě jaderného reaktoru mohou být uvažovány tři různé varianty zaplavování horkého kanálu:

- a. Zaplavování shora
- b. Zaplavování zespod
- c. Zaplavování horizontálně

Při LOCA haváriích je hlavním přítomným režimem zaplavování zespod a tím se také bude nadále zabývat tato práce.

Povrch horkého kanálu je zahřátý na teplotu vyšší než je Leidenfrostova teplota. Při takovém stavu dochází při styku kapaliny a povrchu k okamžitému vypařování vody a stoupání vzniklé páry do horní části kanálu. Zároveň se na povrchu ohřátého povrchu vytvoří parní blána, která zamezuje lepšímu přestupu tepla. Vzhledem k tomu, že voda proudí v uzavřeném prostoru, je zamezeno úniku kapek (jako například u zaplavování shora) a stoupající pára zároveň předchlazuje části aktivní zóny, které ještě nejsou

zaplaveny. Vytvořená hranice mezi smáčeným a nesmáčeným povrchem postupuje přibližně konstantní rychlostí směrem k hornímu konci palivového článku a označujeme ji pojmem chladicí fronta (obrázek 10). Rychlost pohybu chladicí fronty je závislá zejména na teplotě ohřátého povrchu a hmotnostním průtoku chladiva a v této práci bude zkoumána závislost na teplotě chladiva. [10, 18]

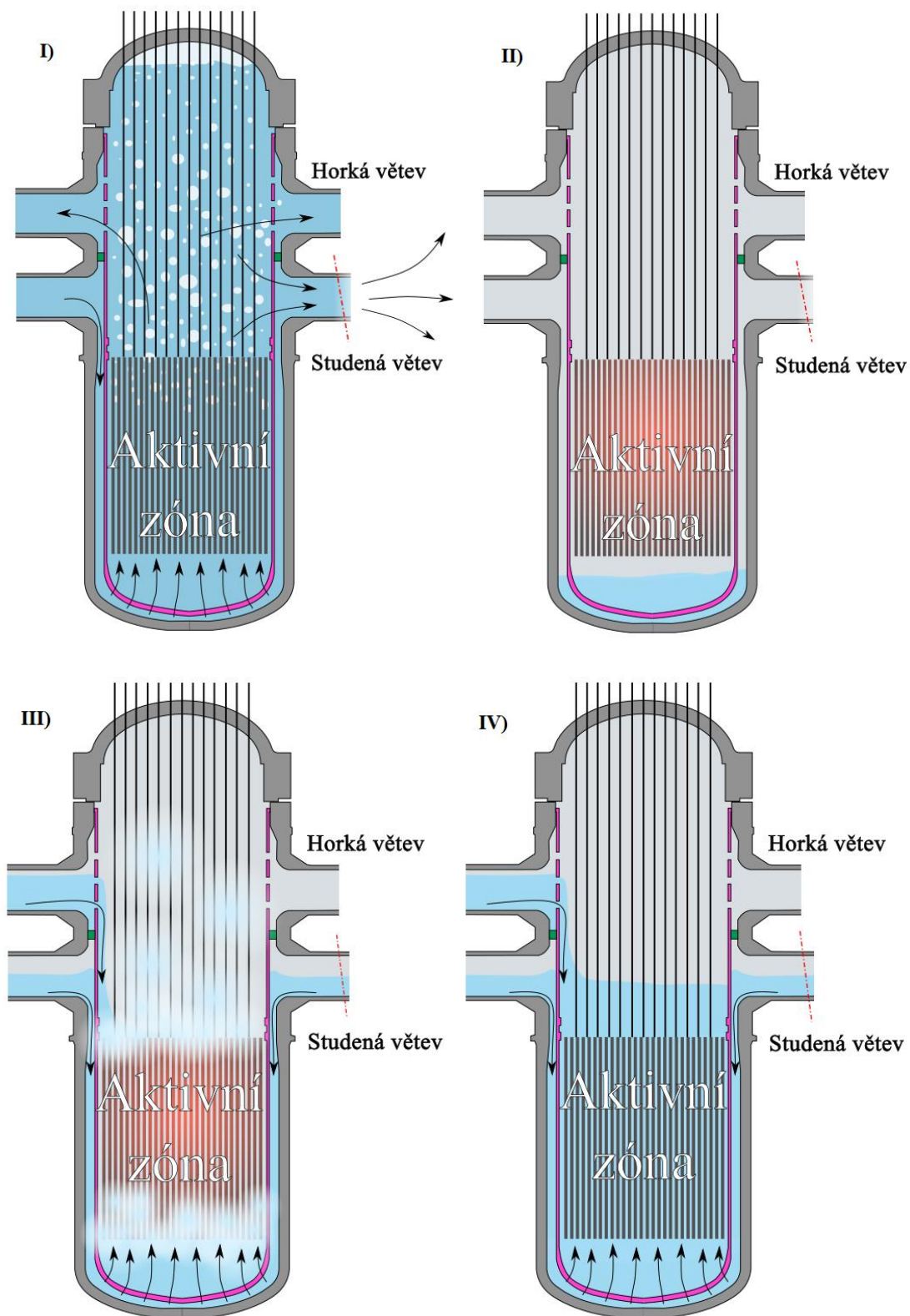


Obrázek 10 – Grafické znázornění chladicí fronty [22]

1.4.2.4 Dlouhodobé dochlazování aktivní zóny

Pokud nastane velká LOCA havárie, musí se primárně zabránit roztavení palivových proutků a úniku radioaktivních látek mimo primární okruh. Toho je dosaženo zajištěním dostatečného chlazení již zaplavené aktivní zóny a postupným přechodem na přirozenou cirkulaci chladiva. Tato fáze může trvat i několik měsíců v závislosti na stupni vyhoření paliva v reaktoru. [18]

Jednotlivé fáze havárie LB LOCA jsou schematicky znázorněny na obrázku 11. V části I) je zobrazeno prasknutí potrubí a následné vyprazdňování primárního okruhu, v části II) zaplavení spodní části reaktorové nádoby, v části III) opětovné zaplavování aktivní zóny a v části IV) již zaplavenou aktivní zónu a začátek jejího dlouhodobého dochlazování.



Obrázek 11 – Jednotlivé fáze havárie LB LOCA [10]

2 Experimentální část

2.1 Historie experimentu

Na téma ochlazování vertikálního kanálu pomocí spodního zaplavování byla v minulosti provedena celá řada experimentů. Jednotlivé výzkumné práce se lišily zejména použitou délkou a geometrií vyhřívaného kanálu, rozsahem počátečních teplot horkého povrchu nebo hmotnostním průtokem chladící vody.

Mnohé experimenty byly prováděny na ohřívaných testovacích úsecích o délkách menších než 1,5 metru, přičemž palivové a regulační tyče v aktivní zóně u běžně provozovaných reaktorů mohou dosahovat délek i přes 3 metry. Dalším omezením byly v některých případech zvolené teploty ohřívaného povrchu, které byly většinou v rozmezí 300 až 800 °C, ale málokdy byl pokrytý celý tento rozsah. Geometrie testovacího úseku, které se v experimentech nejčastěji opakovaly, byly prstencové kanály, trubkové kanály, nebo přímo modely palivového souboru.

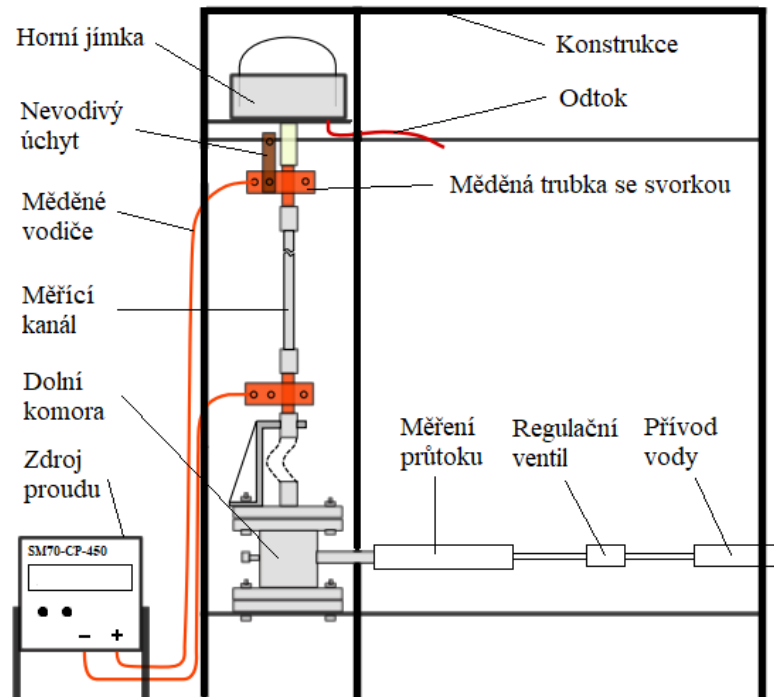
Příkladem můžeme uvést práci autora A. K. Saxeny z roku 1998 [23], která zkoumala vliv teploty horkého povrchu a průtoku chladící vody na rychlost postupu chladící fronty a porovnávala tyto rychlosti při zaplavování zdola a shora. Rozsah teplot ohřátí tyče byl od 200 do 500 °C a délka testovací sekce 3,03 m.

Dále se tomuto tématu věnoval N. Lymperea ve své práci z roku 2015 [24], která se zaměřovala na vliv geometrie na rychlost postupu chladící fronty při počátečních teplotách 300 až 550 °C a délce ohřívaného segmentu přibližně 1 metr.

Tato práce však navazuje zejména na práci J. Štěpánka (2018) [10] a práci O. Hlinky (2020) [25], které byly provedeny na podobném experimentálním zařízení, avšak nevěnovaly se zkoumání závislosti rychlosti chladící fronty na teplotě proudícího chladiva. Jednotlivé konstrukční a metodické odlišnosti budou popsány podrobněji v následujících kapitolách.

2.2 Experimentální zařízení

Zařízení, na kterém byl prováděn experiment, bylo navrženo pro zkoumání termohydraulických jevů při ochlazování horkých povrchů. Jedná se o kovovou konstrukci, ke které je připevněn vertikální kanál kruhového průřezu. Ten je následně vyhříván na požadované teploty a po otevření ventilu je chlazen vodou přivedenou z vodovodního potrubí. Schéma původního zařízení je znázorněno na obrázku 12.

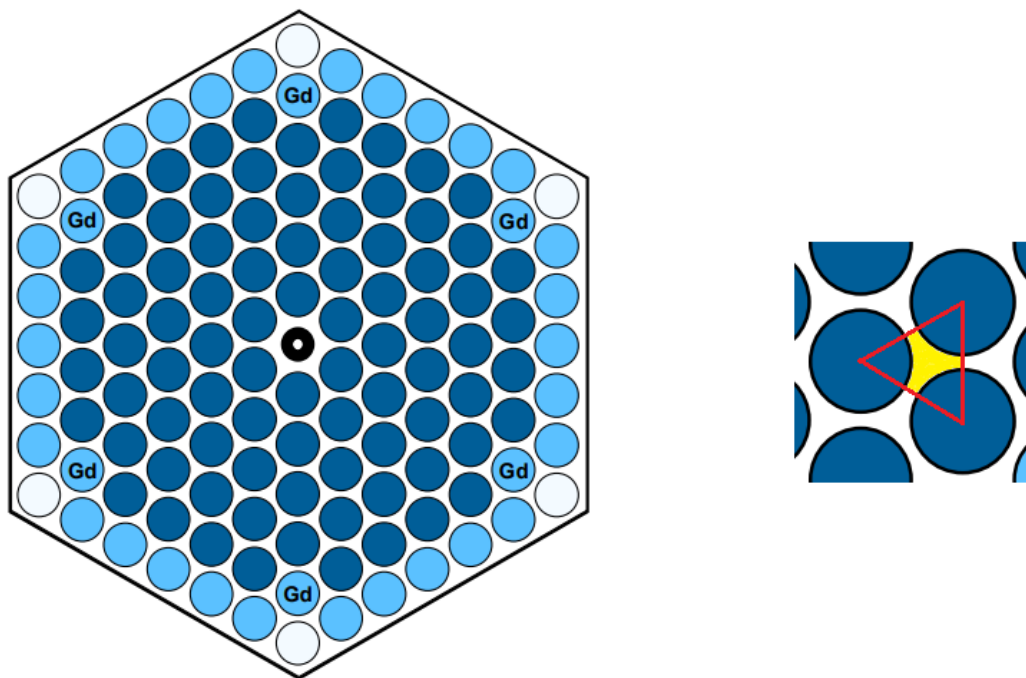


Obrázek 12 – Schéma původního experimentálního zařízení [25]

2.2.1 Konstrukce a rozměry zařízení

Zařízení bylo navrženo tak, aby se co nejvíce přibližovalo reálné situaci v aktivní zóně jaderného reaktoru. V reaktoru chladivo proudí prostorem mezi zahřátými palivovými proutky, přičemž tvar průtočné plochy se liší v závislosti na koncepci reaktoru. U reaktorů VVER má palivový soubor šestiúhelníkový tvar, avšak u reaktorů PWR je tvar souboru čtvercový. V obou případech můžeme z celkové geometrie palivového souboru vymezit menší segment, který zahrnuje tři (respektive čtyři u reaktorů PWR) palivové proutky a určit průtočnou plochu chladiva tímto segmentem a následně příslušný hydraulický průměr.

Na obrázku 13 je znázorněno schéma palivové kazety u reaktoru VVER-440 a detail průtočné plochy (žlutě) v jednom symetrickém segmentu. V tabulce 2 je přehled hydraulických průměrů D_h jednoho segmentu pro různé typy běžně využívaných reaktorů.



Obrázek 13 – Palivová kazeta u reaktoru VVER-440 a detail průtočné plochy [26]

Typ reaktoru	D_h [mm]
VVER-440	8,94
VVER-1000	10,60
AP1000	11,78

Tabulka 2 – Hydraulické průměry jednoho segmentu pro různé typy reaktorů [25]

Jelikož tuto geometrii by bylo velmi obtížné napodobit, muselo se přistoupit k určitému zjednodušení. Jednou z nabízejících se možností bylo použití vyhřívané ocelové tyče a mezikruhové průtočné plochy po obvodu tyče. Toto řešení je však konstrukčně náročné z důvodu nutnosti připevnění termočlánků na vnitřní stěně ocelové trubky a použití vnější nevyhřívané stěny. Byla tedy vybrána jednodušší varianta s prouděním chladiva v kruhovém kanálu uvnitř vyhřívané ocelové trubky.

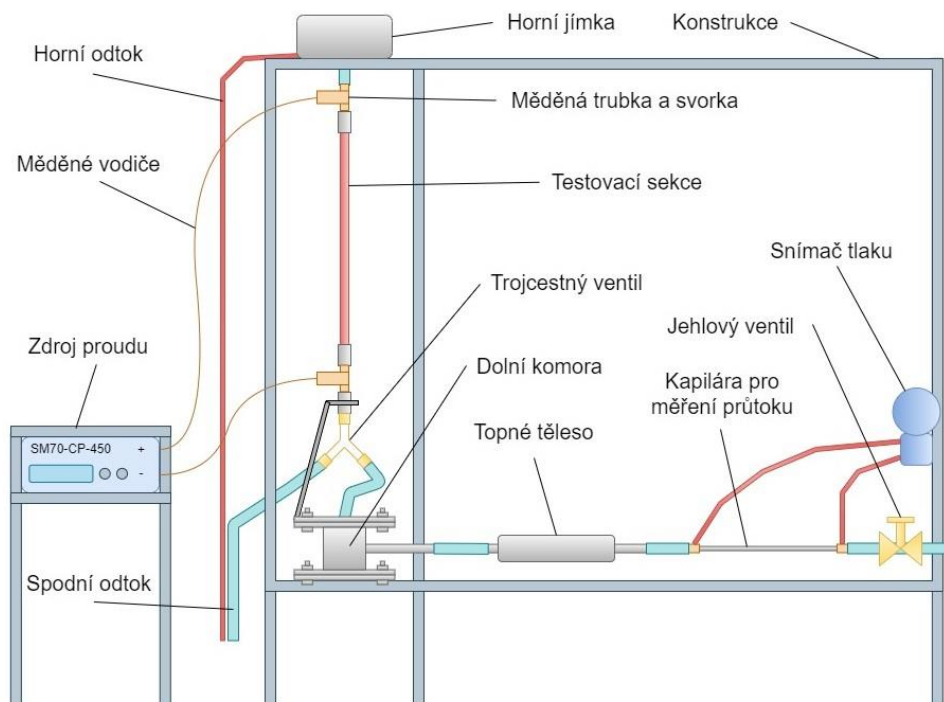
Pro účely experimentu byla zvolena trubka o rozměrech 12 x 1 mm, tedy s vnitřním průměrem 10 mm, což odpovídá hodnotám hydraulických průměrů v tabulce 2. Celková délka trubky je 1575 mm a použitým materiálem je nerezová ocel 1.4541, která má vysokou odolnost při teplotách až 850 °C a je určena zejména pro aplikace při teplotách přesahujících 300 °C.

Vybraná ocelová trubka tvoří testovací sekci, která je v pravidelných rozstupech osázena termočlánky a po celou dobu experimentu vyhřívána. Toho je docíleno pomocí zdroje stejnosměrného proudu, který je pomocí měděných vodičů přes měděné svorky připojen k testovací sekci. Horní část trubky ústí do horní jímky, která má vypouklé dno, aby se omezil zpětný vtok zkondenzované vody do ohřívané trubky.

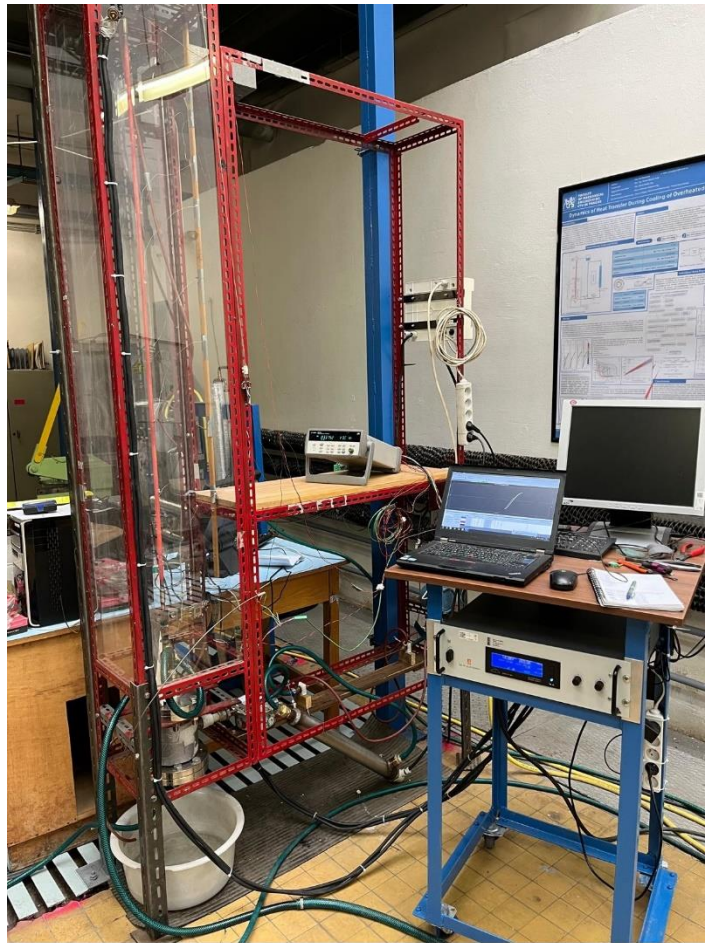
2.2.2 Provedené změny

Jedna ze změn, které byly na zařízení provedeny, bylo přidání trojcestného ventilu těsně před vstupem do testovací sekce. Po zaplavení dolní komory chladicí voda odtéká hadicí mimo zařízení, přičemž přepnutím ventilu se tento odtok uzavře a voda může proudit pouze do testovací sekce. Touto úpravou bylo dosaženo přesnějšího nastavení průtoku vody a zkrácení doby mezi měřeními.

Předchozí experimenty na tomto zařízení byly prováděny bez nastavování teploty chladicí vody, tudíž pro účely této práce byla nutná instalace topného tělesa. To je umístěno před vstupem do dolní komory, tedy co nejbližší testovací sekci, aby se zamezilo tepelným ztrátám. Přívod vody do zařízení je zajištěn připojením k vodovodnímu řádu a průtok je regulován pomocí citlivého jehlového ventilu, který umožňuje nastavení velmi malých průtoků potrubím. Za regulačním ventilem se potom nachází kapilára pro měření průtoku a poté voda vstupuje do zmíněného topného tělesa. Schéma upraveného zařízení je znázorněno na obrázku 14 a celá měřicí stanice je na obrázku 15.



Obrázek 14 – Schéma upraveného experimentálního zařízení



Obrázek 15 – Experimentální měřicí stanice

2.3 Ohřev testovací sekce a měření teploty

Tímto experimentem se snažíme co nejlíže modelovat situaci v jaderném reaktoru, kdy dojde k havárii se ztrátou chladiva. V takovém případě dojde k téměř okamžitému odstavení reaktoru, a tím i k omezení množství generovaného tepla. Jak již bylo popsáno v kapitole 1.1.2, velmi důležitý vliv na probíhající termohydraulické procesy má zbytkové teplo. Zbytkové teplo v tomto případě simulují neustálým ohřevem trubky po celou dobu zaplavování. V tomto ohledu je experiment oproti reálné situaci konzervativnější, jelikož závislost zbytkového tepla na čase je klesající, zatímco u experimentálního zařízení je dodávaný výkon konstantní po celou dobu měření.

Pro ohřev trubky je využíván stejnosměrný elektrický proud, který je dodáván pomocí zdroje stejnosměrného napětí SM70-CP-450 od Delta Elektronika (obrázek 16), jehož charakteristické parametry jsou uvedeny v tabulce 3. Zdroj je pomocí měděných vodičů a měděných svorek připojen k testovací sekci.

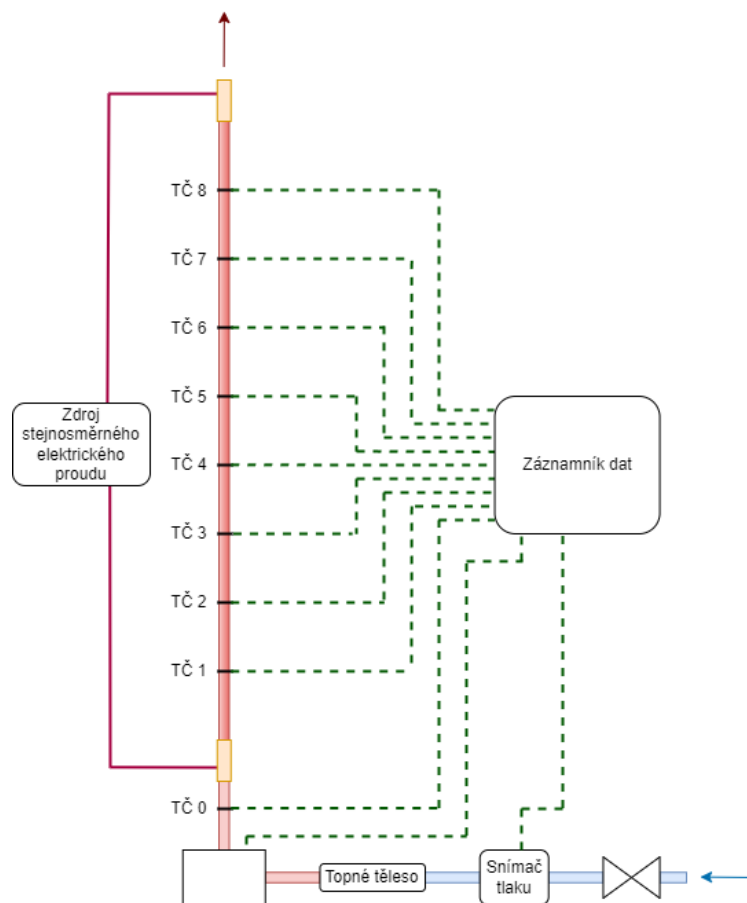
Rozsah napětí	0 – 70 V
Rozsah proudu	- 450 – 450 A

Tabulka 3 – Parametry zdroje stejnosměrného napětí SM70-CP-450 [27]



Obrázek 16 - Zdroj stejnosměrného napětí SM70-CP-450 [27]

Testovací sekce má délku 1569 mm a je opatřena osmi termočládky, které jsou rozmístěny rovnoměrně po výšce ocelové trubky, jak je znázorněno na obrázku 17.

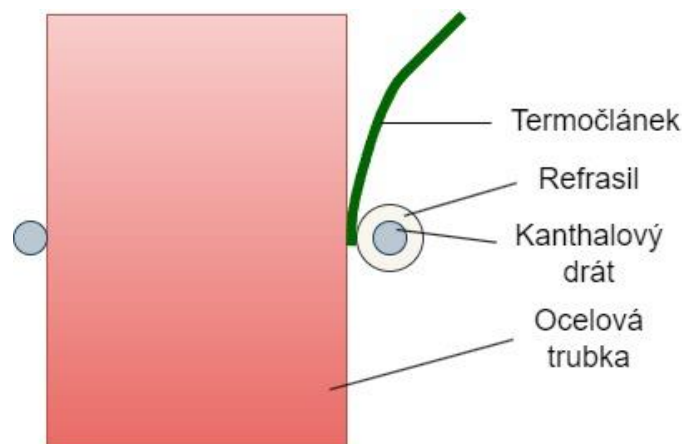


Obrázek 17 – Schéma zapojení pro měření dat

Jelikož je trubka v průběhu experimentu zahřívána na teploty vyšší než 750 °C, musí být použité termočlánky odolné vůči vysokým teplotám a také musí mít dostatečně malý průměr drátu, aby nedocházelo k nezanedbatelnému odvodu tepla skrz drát do okolí. Další důležitou vlastností je vysoká rychlost odezvy měření teploty, aby bylo dosaženo dostatečné přesnosti při následném výpočtu derivací teplotních průběhů. Na základě těchto požadavků byly použity izolované termočlánky typu K s vnějším průměrem pláště 0,5 mm, které se při teplotním rozsahu -40 až 1000 °C vyznačují přesností $\pm 2,5$ °C nebo 0,75 % naměřené hodnoty (norma ČSN EN 60584-2).

2.3.1 Uchycení termočlánků

Termočlánky jsou pevně uchyceny k ocelové trubce pomocí kanthalového drátu, který je v místě dotyku s termočlánkem obalený v izolujícím rukávu z refrasilu, aby se omezily tepelné ztráty kondukcí. Kanthal je slitina železa obsahující přibližně 20 % chromu a 6 % hliníku a vyznačuje se velmi vysokou rezistivitou, odolností vůči oxidaci a odolností vůči vysokým teplotám (až do 1400 °C). Refrasil je izolující křemičitý textilní materiál, jež si zachovává svoje vlastnosti při teplotách do 1000 °C. Uchycení termočlánku je znázorněno na obrázcích 18 a 19. [28, 29]



Obrázek 18 – Schéma uchycení termočlánku



Obrázek 19 – Uchycení termočlánku

2.4 Výpočet a měření průtoku vody

2.4.1 Výpočet objemového průtoku testovací sekci

Dalším měřeným parametrem v tomto experimentu je průtok chladicí vody. V reaktoru VVER-1000 je chladicí voda během reflood fáze dodávána zejména pomocí čerpadel nízkotlakého a vysokotlakého systému, které dodávají 750 m³ respektive 150 m³ vody za hodinu. Jestliže tedy neuvažujeme vliv hydroakumulátorů, který se však projeví pouze na začátku zaplavování aktivní zóny, bude celkový objemový průtok vstříkované vody přibližně 900 m³. [25]

Voda postupně zaplavuje prostory mezi šachtou reaktoru a stěnou tlakové nádoby a průtočnou plochu mezi palivovými proutky v aktivní zóně reaktoru. Ze znalosti rozměrů tlakové nádoby, počtu palivových proutků, vodících trubek a příslušných roztečí můžeme dopočítat hmotnostní průtok vody reaktorem při zaplavování aktivní zóny \dot{m} [kg/s] a hmotnostní průtok vztažený na jednotku plochy G [kg/m²s] [25]:

$$\dot{m} = 250 \text{ kg/s} \quad (6)$$

$$G = 33,4 \text{ kg/m}^2\text{s} \quad (7)$$

Tato hodnota je však ve skutečnosti vyšší, neboť ve výpočtu nebyly zahrnuty konstrukční prvky palivových souborů, které snižují velikost průtočné plochy. Jelikož vliv průtoku na zaplavování horkého kanálu byl již zkoumán v předchozích experimentech, byl pro účely této práce zvolen průtok konstantní, konkrétně $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.1, vnitřní průměr vyhřívané ocelové trubky je $d = 10 \text{ mm}$, tudíž pro její průtočnou plochu platí:

$$S_1 = \pi \frac{d^2}{4} = \pi \cdot \frac{0,01^2}{4} = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (8)$$

Bude-li uvažována hustota dodávané vody $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, potom objemový průtok, který odpovídá zvolené hodnotě $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$, bude:

$$Q = \frac{G \cdot S_1}{\rho} = \frac{50 \cdot 7,85 \cdot 10^{-5}}{1000} = 0,236 \text{ l/min} \quad (9)$$

2.4.2 Způsob měření průtoku

Pro měření průtoku byla zvolena metoda diferenčního tlaku při tlakové ztrátě na kapiláře. Tato metoda poskytuje spolehlivé měření velmi malých průtoků a oproti jiným metodám (např. turbínové průtokoměry) nevyžaduje zásah do potrubí.

Navržená kapilára má délku 50 cm a průměr 2 mm a na obou koncích na ní navazuje trubička o průměru 4 mm. Na této trubičce jsou v dostatečné vzdálenosti od zúžení a rozšíření potrubí umístěny odběry pro tlakový snímač. Použitý tlakový snímač je model Rosemount Alphaline 1151 DP5E22 s měřícím rozsahem 0 – 1 bar (obrázek 20).



Obrázek 20 – Tlakový snímač Rosemount 1151 [30]

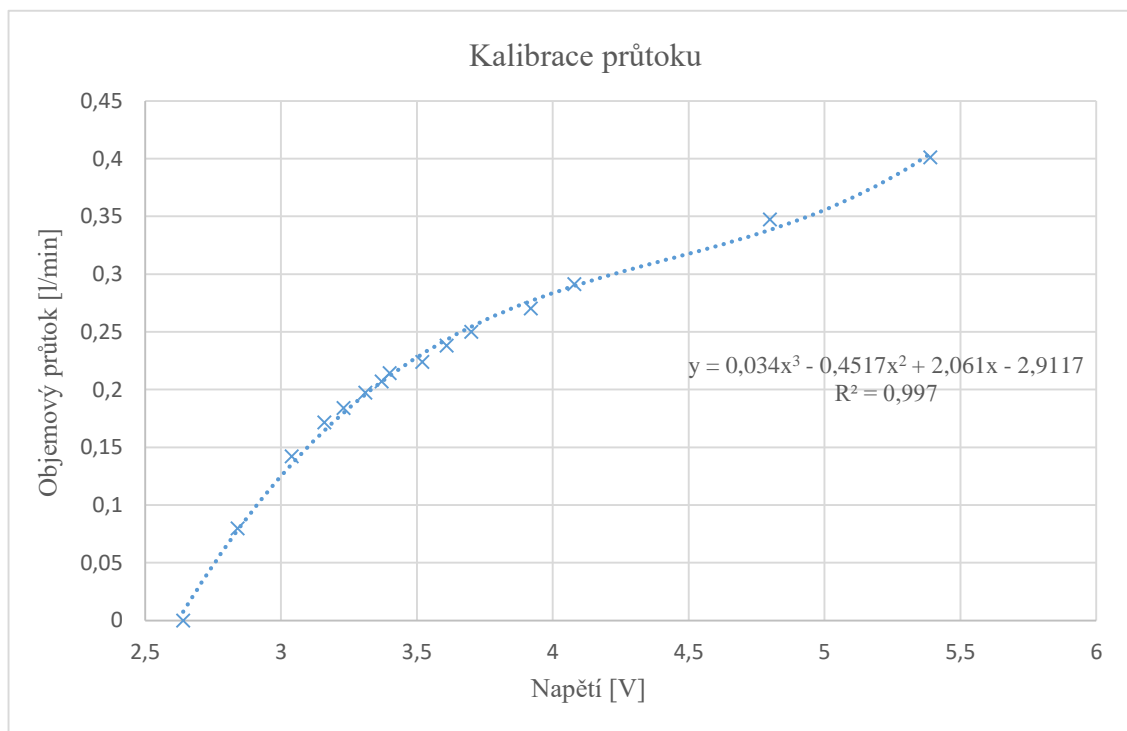
2.4.3 Kalibrace průtoku

Průtok vody experimentem se nastavuje pomocí jehlového ventilu na přívodu z vodovodního řadu. Změnou průtoku v potrubí se změní diferenční tlak snímáný tlakovým snímačem a ten je potom převeden na signál napětí. Aby mohl být nastaven požadovaný průtok spočítaný v kapitole 2.4.1, musí být nejprve provedena kalibrace a zjištěna závislost velikosti průtoku na měřeném napětí.

Kalibrace byla prováděna nastavením určité hodnoty napětí a po jejím ustálení odtokem vody do odměrného válce a měřením času, který je potřeba pro naplnění odměrného válce. Jelikož během kalibrace docházelo k občasným nestabilitám ve vodovodním potrubí, bylo měření potřeba pro některé hodnoty provést opakovaně. Naměřené hodnoty časů a příslušné vypočtené objemové průtoky jsou v tabulce 4 a zjištěná grafická závislost objemového průtoku na měřeném napětí je znázorněna na obrázku 21.

Napětí [V]	Naměřený čas [s]	Objemový průtok [l/min]	Hmotnostní průtok [kg/m ² s]
2,64	0	0	0
2,84	376	0,080	16,9
3,04	211	0,142	30,2
3,16	175	0,171	36,4
3,23	163	0,184	39,1
3,31	152	0,197	41,9
3,37	145	0,207	43,9
3,40	140	0,214	45,5
3,52	134	0,224	47,5
3,61	126	0,238	50,6
3,70	120	0,250	53,1
3,92	111	0,270	57,4
4,08	103	0,291	61,8
4,80	86,4	0,347	73,7
5,39	74,8	0,401	85,2

Tabulka 4 – Naměřené hodnoty při kalibraci průtoku



Obrázek 21 – Závislost objemového průtoku na měřeném napětí při kalibraci průtoku

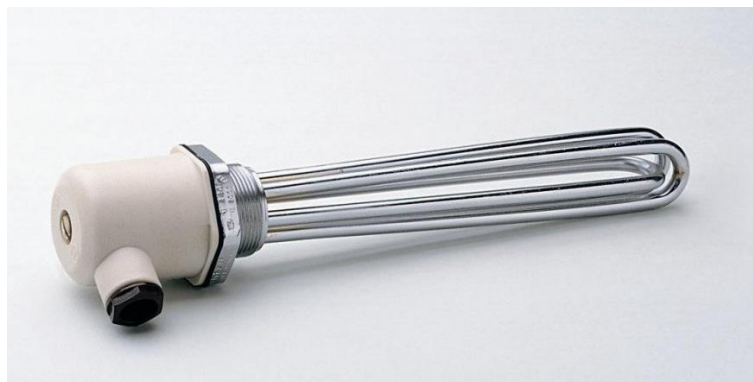
Naměřené hodnoty byly proloženy polynomickou funkcí třetího řádu, jejíž rovnice a hodnota spolehlivosti jsou uvedeny v grafu. Z této funkce byla potom numericky dopočítána hodnota napětí U_0 odpovídající požadovanému průtoku $Q = 0,236$ l/min:

$$U_0 = 3,57 \text{ V} \quad (10)$$

2.5 Ohřev vody

Hlavním obsahem této práce je zkoumání závislosti probíhajících termohydraulických jevů na teplotě chladiva vstupujícího do testovací sekce. Z toho důvodu musela být provedena instalace topného tělesa, které zajistilo ohřev vody z počáteční teploty na požadované hodnoty. Jelikož chladící voda v nádržích havarijních systémů dochlazování je uchovávána při teplotách do 70 °C (často i nižších než 50 °C), bylo pro účely tohoto experimentu zvoleno rozmezí teplot od 15 °C do 70 °C. [31]

Voda z vodovodního potrubí dosahovala bez ohřevu stabilní teploty přibližně 17 °C a tato hodnota byla také použita pro výchozí měření. Pro ohřev vody bylo použito celonerezové topné těleso (obrázek 22) s příkonem 3 kW, rozděleným rovnoměrně do tří topných větví. Topné těleso bylo umístěno do nerezové patrony, která byla následně pomocí mosazných hadicových nátrubků a hadic připojena k experimentálnímu zařízení, což je znázorněno na obrázku 23.



Obrázek 22 – Topné těleso [32]



Obrázek 23 – Připojení patrony k experimentálnímu zařízení

Pro měření teploty vody byl do přívodní hadice těsně před vstupem do trojcestného ventilu umístěn izolovaný termočlánek typu K s vnějším průměrem pláště 1 mm, který byl pomocí tavné pistole upevněn tak, aby nedocházelo k únikům vody. Toto umístění termočláneku poskytovalo informace o aktuální teplotě chladiva v blízkosti testovací sekce a umožňovalo měření teploty během samotného měření, ale zároveň i před spuštěním měření, kdy voda proudila odtokem ven (obrázek 24).



Obrázek 24 – Připojení termočláneku pro měření teploty vody

Při zapojení jedné ze tří větví topného tělesa (tedy příkon 1 kW) bylo po ustálení dosaženo maximální teploty vody přibližně 67 °C. Tato hodnota byla tedy zvolena jako nejvyšší ve zkoumaném rozsahu teplot. Dále byl k topnému tělesu připojen regulátor, pomocí kterého byly nastaveny teploty uprostřed teplotního rozsahu. Použité teploty chladicí vody jsou shrnuty v tabulce 5.

Zvolené teploty chladicí vody pro zaplavování testovací sekce [°C]			
17	33	50	67

Tabulka 5 – Použité teploty chladicí vody

2.6 Záznam dat

Zaznamenávání měřených dat během experimentálního měření bylo zajištěno pomocí datového záznamníku Keysight 34972A LXI (obrázek 25), který disponuje přesností 0,004 % a umožňuje snímání dat každých 100 milisekund. Záznamník je připojen k počítači s nainstalovaným softwarem BenchLink Data Logger 3, pomocí kterého lze přizpůsobit nastavení jednotlivých měřících kanálů a zobrazovat hodnoty měřených veličin v reálném čase. [33]



Obrázek 25 – Datový záznamník Keysight 34972A LXI

2.7 Metodika měření

Zaplavování testovací sekce bylo zkoumáno pro různé kombinace počátečních teplot nahřátí trubky a teplot chladicí vody. Pro každou z těchto kombinací byla provedena alespoň tři separátní měření, přičemž některá měření byla vyřazena již během samotného experimentu z důvodu nevyhovujících či kolísajících parametrů. V ojedinělých případech totiž docházelo k výraznému poklesu průtoku vlivem nestabilit ve vodovodním potrubí nebo poklesu teploty chladicí vody. Jelikož takové změny by mohly mít nežádoucí vliv na naměřená data, bylo v těchto případech nutné vyčkat na opětovné ustálení parametrů na požadovaných hodnotách a až poté bylo možné měření opakovat.

2.7.1 Nastavení průtoku a teploty vody

Před samotným měřením byl nejprve otevřen hlavní ventil vodovodního potrubí, čímž se začalo zaplavovat experimentální zařízení. Trojcestný ventil před testovací sekcí byl v tuto chvíli v poloze „zavřeno“, tudíž voda po naplnění patrony s topným tělesem a dolní komory začala odtékat spodním odtokem ven. V tu chvíli byl pomocí citlivého jehlového ventilu na vstupu do experimentálního zařízení nastaven průtok vody tak, aby hodnota napětí z diferenčního tlakového snímače odpovídala požadované hodnotě určené pomocí kalibrace v kapitole 2.4.3. Průtok nebyl vždy konstantní, běžně docházelo k tolerovaným výchytkám v řádu jednotek procent. Při větších fluktuacích průtoku bylo měření přerušeno a opakováno.

Dalším krokem bylo nastavení teploty vody. Na základě hodnot měřených termočlánkem před testovací sekcí byla upravována poloha regulátoru a tím i příkon topného tělesa. Jelikož ohřev vody byl relativně pomalý a měřená teplota byla vůči reálné teplotě vody v topném tělese opožděná, bylo obtížné dosáhnout ustálení teploty vody na konstantní hodnotě. Proto byly tolerovány odchylky od požadované teploty v řádu jednotek procent.

2.7.2 Ohřev trubky

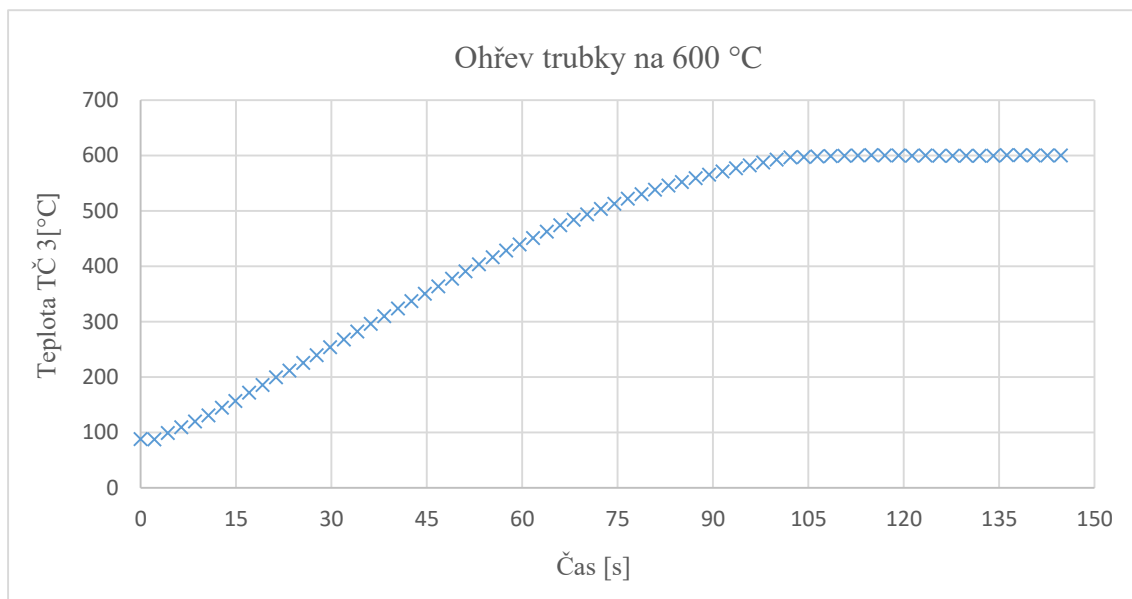
Jakmile bylo dosaženo ustálení průtoku a teploty vody, mohl být zahájen ohřev ocelové trubky. Na zdroji stejnosměrného proudu byla nastavena velikost proudu, která zajistila ustálení teploty trubky na příslušné hodnotě. Na základě předchozích provedených experimentů bylo zvoleno rozmezí počátečních teplot trubky od 300 °C do 750 °C s mezikrokem 50 °C. Přibližné hodnoty proudu potřebné k ohřevu trubky na jednotlivé teploty byly zjištěny experimentálně během měření a jsou uvedeny v tabulce 6.

TČ 3 [°C]	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
I [A]	95	110	122	137	152	169	187	206	226	247

Tabulka 6 – Hodnoty stejnosměrného proudu odpovídající jednotlivým teplotám trubky

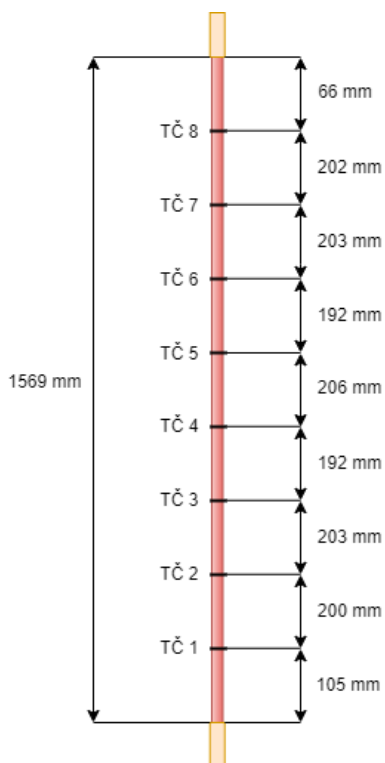
Naměřená teplota povrchu po výšce trubky se lišila v řádu jednotek procent. To mohlo být způsobeno určitými nerovnoměrnostmi v ohřevu trubky nebo rozdíly v uchycení jednotlivých termočlánků. Jako referenční teplota pro zahájení zaplávání byla zvolena teplota měřená termočlánkem číslo 3 (TČ 3). Průběh ohřevu trubky na

600 °C během jednoho z experimentálních měření zaznamenaný pomocí TČ 3 je znázorněn na obrázku 26.



Obrázek 26 – Závislost teploty 3. termočlánku na čase při ohřevu trubky na 650 °C

Výpočet rychlosti chladicí fronty vyžaduje znalost přesných rozestupů mezi jednotlivými termočlánky. Jelikož upevňování termočlánků bylo komplikované, nebyly jednotlivé rozestupy termočlánků konstantní, ale mírně se lišily. Jednotlivé naměřené vzdálenosti jsou uvedeny na schématu na obrázku 27 a v tabulce 7.



Obrázek 27 – Rozestupy termočlánků

Úsek	Délka [mm]
začátek – TČ 1	105
TČ 1 – TČ 2	200
TČ 2 – TČ 3	203
TČ 3 – TČ 4	192
TČ 4 – TČ 5	206
TČ 5 – TČ 6	192
TČ 6 – TČ 7	203
TČ 7 – TČ 8	202
TČ 8 - konec	66
celková délka	1569

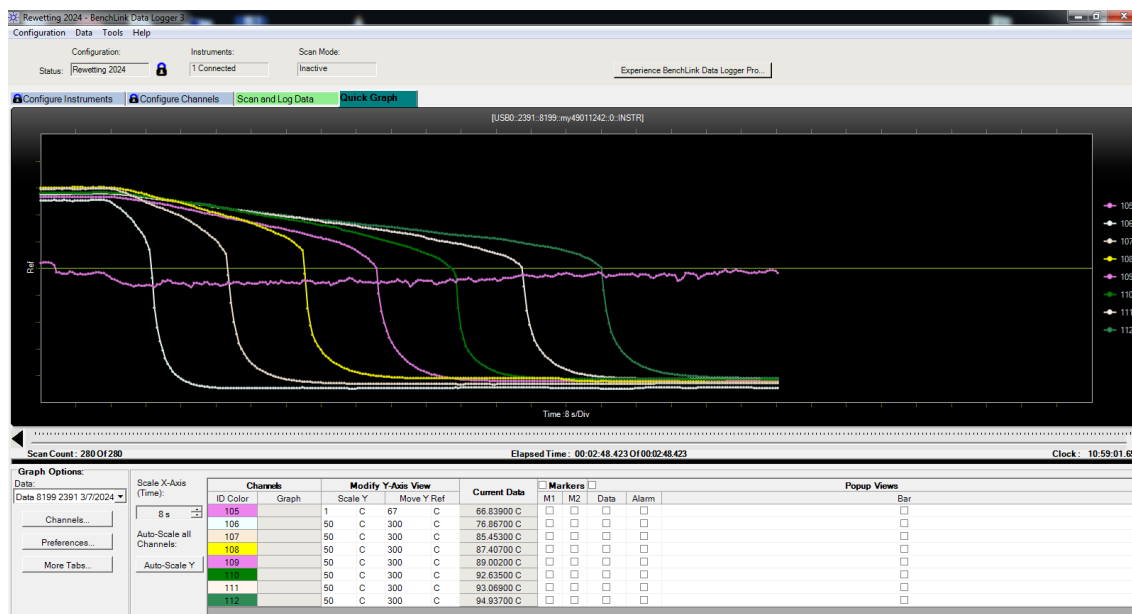
Tabulka 7 – Rozestupy termočlánků

2.7.3 Zaplavování testovací sekce

Samotné zaplavování testovací sekce bylo zahájeno po nastavení a ustálení počátečních parametrů na příslušných hodnotách. Na datovém záznamníku byla nastavena četnost snímání dat každých 100 ms a otevřením trojcestného ventilu byl proud vody směřován do testovací sekce. Jak již bylo popsáno v kapitole 1.4.2.3, chladicí voda se po styku s horkým povrchem začne vypařovat a vzniklá směs páry a vody postupuje horkým kanálem vzhůru až do horní jímky. Tam směs kondenzuje a horním odtokem je odváděna ven z experimentálního zařízení.

Konec experimentu, tedy celkové zaplavení testovací sekce kapalnou fází, byl charakterizován ustálením teploty trubky na určité nižší hodnotě. V tu chvíli bylo měření přerušeno, odpojen zdroj stejnosměrného proudu, uzavřen trojcestný ventil a po kontrole správnosti počátečních parametrů mohlo být měření opakováno. Takto byla provedena měření pro všechny počáteční teploty nahřátí trubky a následně byla nastavena nová hodnota teploty vody pro další sérii měření.

Na obrázku 28 můžeme vidět charakteristický průběh teplot jednotlivých termočlánků při zaplavování testovací sekce, který byl zobrazován v softwaru BenchLink Data Logger 3 během samotného experimentu.



Obrázek 28 – Snímek obrazovky ze softwaru BenchLink Data Logger 3

3 Zpracování naměřených hodnot

Naměřená data získaná z jednotlivých experimentů byla ukládána do samostatných souborů ve formátu .csv a následně pojmenována dle počátečních podmínek daného měření. Pro zpracování hodnot, tedy vykreslení grafů průběhů teplot, detekce začátku a konce experimentu, detekce důležitých teplotních bodů a poté výpočet rychlostí postupu chladicí fronty, byl použit výpočetní skript v programovacím jazyce Python verze 3.12. V programu jsou využity matematické, technické a vědecké knihovny NumPy verze 1.26.4 a SciPy verze 1.13.0 a pro zjištění vlastností vody a vodní páry knihovna CoolProp verze 6.6.0.

Skript vznikl původně jako součást disertační práce Ing. Jana Štěpánka, Ph.D. [10] a v rámci této diplomové práce byl upraven a přizpůsoben prováděným experimentálním měřením. V následujících kapitolách budou představeny nejdůležitější postupy při vyhodnocování dat a princip fungování samotného skriptu.

3.1 Struktura skriptu

Soubory s naměřenými daty jsou nejprve rozřizeny do čtyř složek dle teploty chladicí vody použité při daném experimentu. Tyto složky jsou potom umístěny do jednoho adresáře „Data“. Skript nejprve načte hodnoty z pomocných souborů, které obsahují informace o poloze jednotlivých termočlánků (kapitola 2.7.2) a další důležité údaje pro výpočty tlaku a příkonu. Následně postupně načítá jednotlivé .csv soubory ze složek, provede filtraci naměřených dat kvůli vyřazení nevyhovujících vychýlených hodnot a poté pokračuje se zpracováním dat.

V adresáři „Outputs“ jsou vytvářeny složky odpovídající příslušným počátečním podmínkám měření a do nich jsou ukládána zpracovaná data. Průběhy měřených veličin jsou zaznamenávány do grafů a ukládány ve formátu .jpg. Sledovanými veličinami jsou průtok chladiva, teplota chladiva, tepelný tok trubkou, teploty měřené jednotlivými termočlánky a relativní tlak v dolní komoře.

Skript následně detekuje začátek a konec experimentu (viz kapitola 3.2) a průběhy teplot na termočláncích vykreslí do jednoho grafu pro lepší porovnání. Dalším krokem je poté hledání důležitých teplotních bodů (viz kapitola 3.3) a výpočet rychlostí chladicí fronty (viz kapitola 3.4). Výsledné hodnoty jsou ukládány opět ve formátu .csv a mohou být dále zpracovávány.

3.2 Detekce začátku a konce experimentu

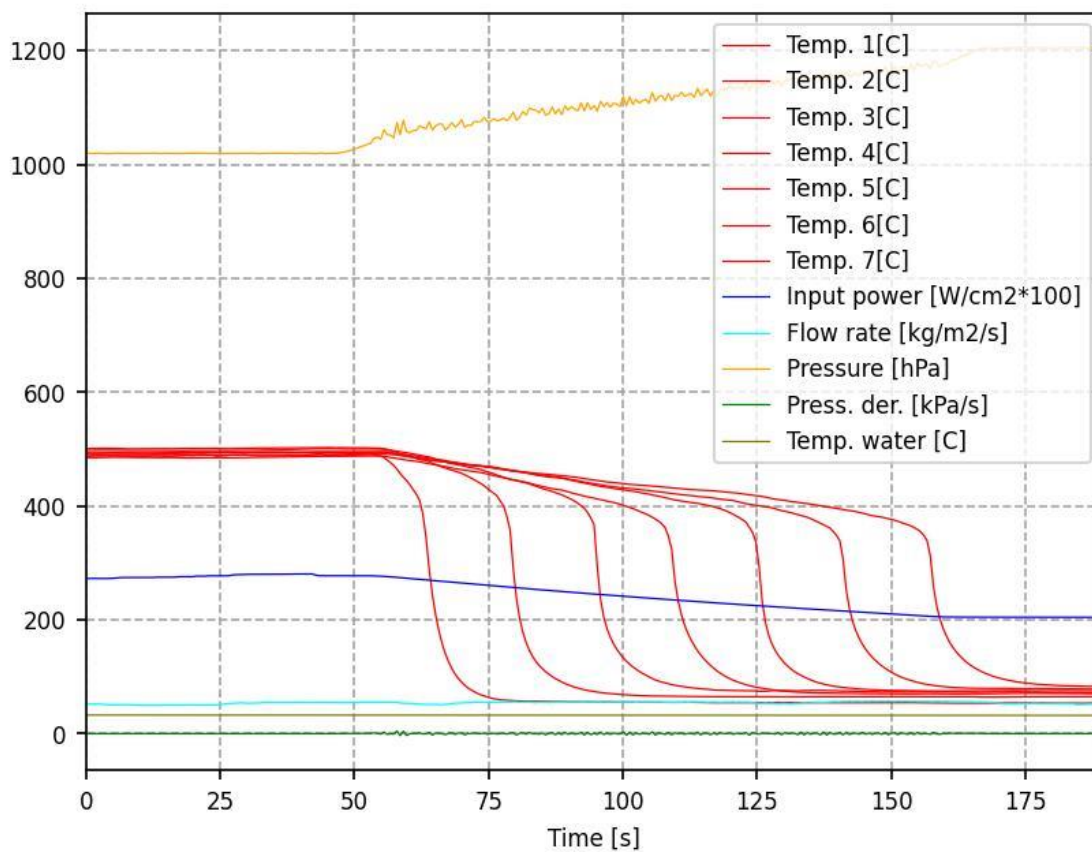
Aby mohly být porovnávány průběhy teplot na termočláncích napříč měřeními se stejnými počátečními podmínkami, bylo potřeba určit začátek samotného zaplavování testovací sekce. K začátku zaplavování nedocházelo vždy ve stejný čas, jelikož ventil, jímž byl otevírán přívod vody do testovací sekce, byl přepínán ručně několik sekund po spuštění zaznamenávání dat.

Začátek experimentu je detekován pomocí náhlého nárůstu tlaku v dolní komoře experimentálního zařízení, ke kterému dochází v okamžiku vstupu chladiva do vertikálního kanálu. Konkrétně je sledován průběh první derivace tlaku v dolní komoře a v případě, kdy překročí určitou nastavenou hranici, dojde ke zpětnému vyhledání lokálního minima a jeho příslušného časového okamžiku. Tento čas je následně nastaven jako počátek experimentu.

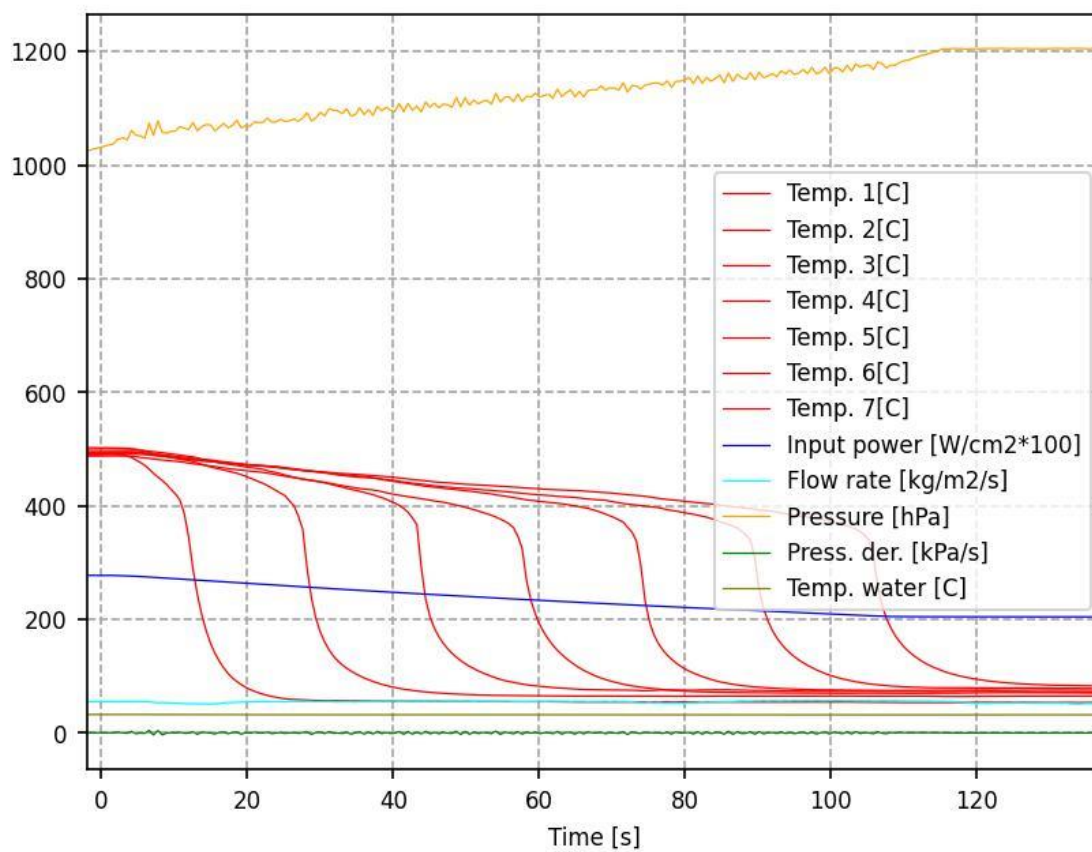
Konec experimentu je detekován několik různými způsoby. Jedním z nich je okamžik vypnutí zdroje stejnosměrného proudu, který je charakterizován poklesem dodávaného výkonu na nulovou hodnotu. Dalším způsobem je detekce okamžiku zastavení průtoku chladiva, ke kterému zpravidla dochází při naplnění celé testovací sekce vodou. Pokud ani jedna z těchto podmínek není splněna, jsou zobrazována všechna data až do ukončení jejich záznamu.

Je-li definován začátek i konec daného experimentu, jsou uvažovány pouze měřené hodnoty mezi těmito dvěma časy. Jednotlivá měření, uskutečněná za stejných počátečních podmínek, mohou být potom seskupena do jednoho grafu a porovnána.

Na obrázku 29 můžeme vidět všechna naměřená data a na obrázku 30 naměřená data s upraveným začátkem a koncem při jednom z experimentů pro teplotu chladiva 33 °C a počáteční teplotu povrchu 500 °C.



Obrázek 29 – Průběh měřených veličin během celého experimentu



Obrázek 30 – Průběh měřených veličin s upraveným začátkem a koncem

3.3 Hledání důležitých teplotních bodů

V souvislosti s prudkým ochlazováním horkých povrchů definujeme několik charakteristických teplotních bodů:

a. Teplota opětovného smočení horkého povrchu (Rewetting temperature)

Tato teplota je obecně vnímána jako maximální teplota, při které dochází k přímému kontaktu mezi horkou stěnou a chladičem. Tato definice odpovídá Leidenfrostovu bodu na křivce varu (viz obrázek 4, str. 15).

b. Teplota prudkého ochlazování (Quenching temperature)

Teplota prudkého ochlazování bývá v literatuře definována různými způsoby. Jedním z nich je definice pomocí první derivace průběhu teploty, kdy teplota prudkého ochlazování odpovídá maximální hodnotě této derivace. Avšak definice, jež byla použita v této práci, využívá pro účely hledání této teploty směrnice přechodového a blánového varu. Nalezením průsečíku těchto dvou směrnic získáme bod D1 (znázorněno na obrázku 31). Tato teplota však neleží na uvažovaném teplotním profilu, tudíž nemůže být fyzikálně správná. Jako teplotu prudkého ochlazování tedy v tomto případě uvažujeme bod na křivce teploty s minimální hodnotou druhé derivace dle času (bod D2 na obrázku 31). Tato metoda byla zvolena z důvodu jednoduchosti, jelikož nevyžaduje použití složitých numerických výpočtů. [10]

c. Teplota maximálního tepelného toku (Critical heat flux temperature)

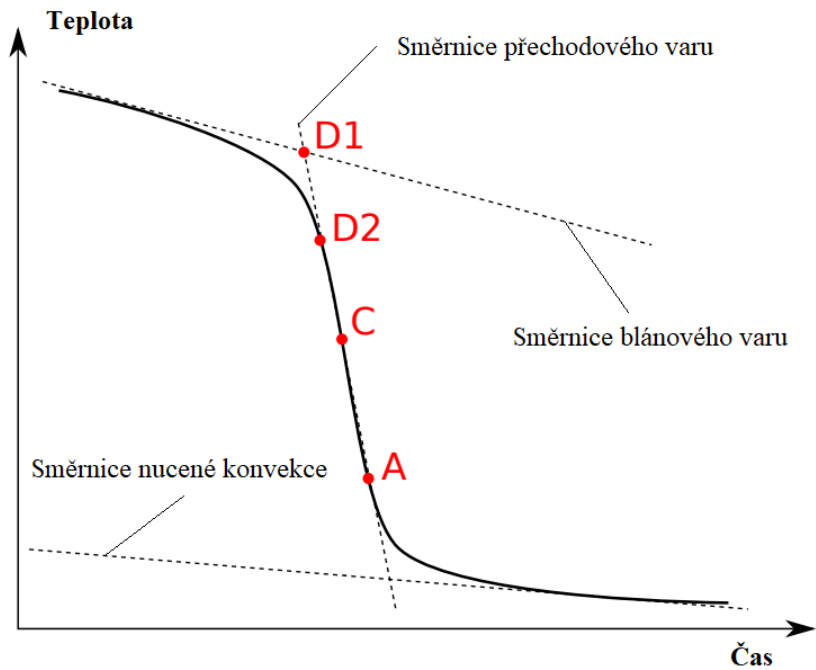
Jak již pojmenování napovídá, jedná se o teplotu dosaženou ve chvíli, kdy je tepelný tok na své maximální (kritické) hodnotě (viz obrázek 4, str. 15). Je definována jako bod na křivce s maximální první derivací průběhu teploty podle času (bod C na obrázku 31)

Jelikož tepelný tok je maximální, dosahuje součinitel přestupu tepla v tomto bodě také nejvyšší hodnoty a pokles teploty je tedy nejstrmější. Zároveň zde dochází k přechodu na bublinkový var.

Pro následný výpočet rychlosti chladící fronty byla kvůli jednoduché a přesnější detekci vybrána právě teplota maximálního tepelného toku. Oproti teplotě prudkého ochlazování vykazovala také menší rozptyl detekovaných hodnot v čase. [11]

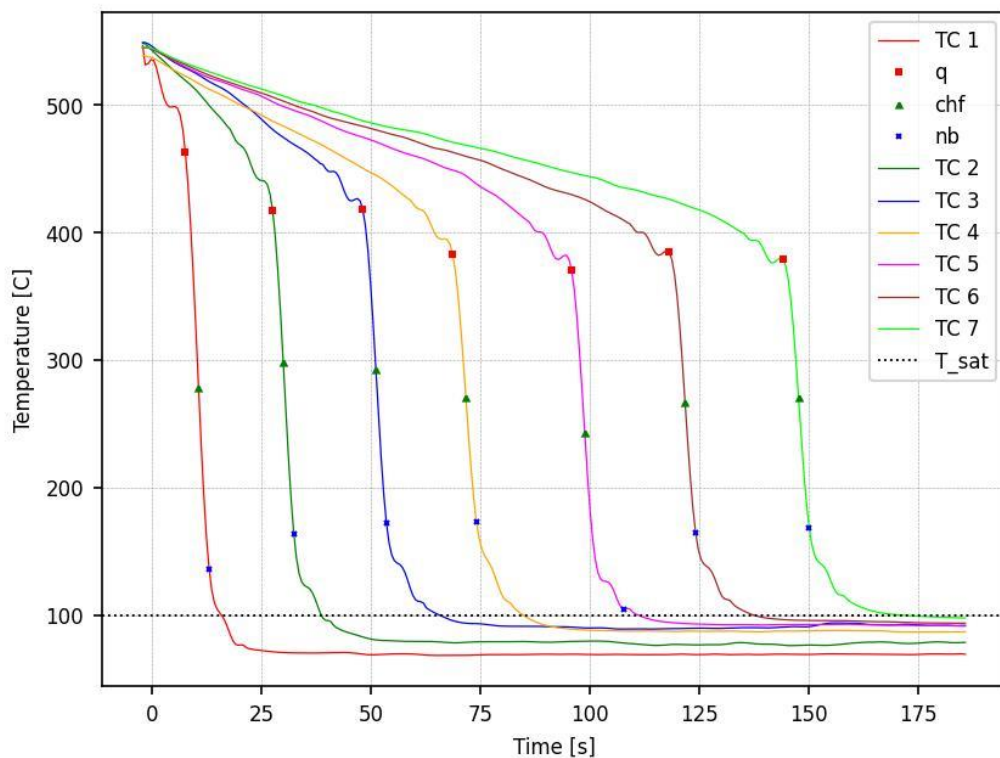
d. Teplota přechodu mezi bublinkovým varem a nucenou konvekcí

Posledním sledovaným teplotním bodem je teplota přechodu mezi bublinkovým varem a nucenou konvekcí, která je definována maximální hodnotou druhé derivace časového průběhu teploty (bod A na obrázku 31).



Obrázek 31 – Pozice definovaných teplotních bodů

Na obrázku 32 jsou znázorněny všechny důležité teplotní body pro jedno z experimentálních měření při teplotě chladiva 50 °C a počáteční teplotě povrchu 550 °C. Body „q“ odpovídají teplotám prudkého ochlazování, body „chf“ teplotám maximálního tepelného toku a body „nb“ teplotám přechodu mezi bublinkovým varem a nucenou konvekcí.



Obrázek 32 – Důležité teplotní body při jednom z provedených experimentálních měření

3.4 Výpočet rychlosti chladící fronty

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3, rychlost chladící fronty byla počítána pomocí teplot odpovídajících maximálnímu tepelnému toku. Pro vypočtení potřebných prvních a druhých derivací průběhu teploty byly v rámci skriptu využity následující rovnice:

$$T'(t) = \frac{T_{t+\Delta t} - T_{t-\Delta t}}{2\Delta t} \quad (11)$$

$$T''(t) = \frac{T_{t+\Delta t} - 2T_t + T_{t-\Delta t}}{2\Delta t} \quad (12)$$

kde $T'(t)$ a $T''(t)$ jsou hledané první, respektive druhé derivace v čase t , T je příslušná teplota a Δt je časový krok definovaný jako:

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i \quad (13)$$

Index i představuje index v poli naměřených hodnot.

Samotný výpočet rychlosti chladící fronty je principiálně velmi jednoduchý. Rychlost chladící fronty je definována jako vzdálenost, kterou chladící fronta urazí za určitý čas. Uraženou vzdálenost ΔH představuje rozdíl výšek dvou sousedních termočlánků na ohřívané trubce. Pro každý termočlánek je potom nalezena teplota maximálního tepelného toku T_{iCHF} a jí příslušný časový okamžik t_{iCHF} . Z těchto údajů se průměrná rychlost postupu chladící fronty vypočte pomocí vztahu:

$$u_{i,i+1} = \frac{\Delta H}{\Delta t_{CHF}} = \frac{H_{i+1} - H_i}{t_{i+1CHF} - t_{iCHF}} \quad (14)$$

kde H_i je výška i -tého termočlánku, přičemž výšky jednotlivých termočlánků jsou uvedeny v tabulce 7 na str. 42. Budeme-li uvažovat například úsek mezi prvním a druhým termočlánekem, bude pro rychlost postupu chladící fronty platit vztah:

$$u_{12} = \frac{\Delta H}{\Delta t_{CHF}} = \frac{H_2 - H_1}{t_{2CHF} - t_{1CHF}} \quad (15)$$

3.5 Výpočet relativní rychlosti chladící fronty

Rychlost chladící fronty se výrazně mění s rozdílnými hodnotami průtoku chladící vody. Pro lepší porovnání s jinými experimentálními měřeními, které jsou často prováděny při rozdílných počátečních parametrech, byla zavedena relativní rychlost chladící fronty.

Relativní rychlost chladící fronty u' je definována jako podíl absolutní rychlosti u a rychlosti chladící vody na vstupu do testovací sekce c :

$$u' = \frac{u_{ij}}{c_{ij}} \quad (16)$$

Rychlosti u_{ij} jsou vypočteny dle vztahu (15) a vstupní rychlost chladiva je určována pro každý úsek mezi jednotlivými termočlánky.

4 Výsledky měření

V této kapitole jsou shrnuta naměřená data z provedených experimentů a z nich vypočtené velikosti absolutních rychlostí postupu chladících front. Experimentální měření byla prováděna při čtyřech různých teplotách chladící vody a s různými počátečními teplotami nahřátí ocelové trubky. Závislosti postupu chladící fronty na těchto parametrech jsou graficky znázorněny a umožňují lepší náhled na zkoumané termohydraulické jevy.

4.1 Nejistota měření

Než začneme se samotným vyhodnocováním naměřených dat, je potřeba definovat způsob výpočtu nejistoty měření. Všechna experimentální měření jsou zatížena určitou nejistotou, která charakterizuje rozsah naměřených hodnot okolo výsledku měření. Zdrojů nejistot může být mnoho, avšak obecně se nejistoty rozdělují na standardní nejistoty typu A a standardní nejistoty typu B.

Standardní nejistoty typu A jsou způsobené náhodnými chybami bez známé příčiny a jsou stanovovány v závislosti na počtu opakování měřené veličiny za stejných podmínek. Standardní nejistoty typu B jsou způsobené známými příčinami jako například nedokonalostmi měřicího přístroje nebo měřicí metody. Tyto nejistoty jsou však v případě tohoto experimentu v porovnání s nejistotami způsobenými náhodnými chybami zanedbatelné, a proto nebudou uvažovány.

Odhad výsledné hodnoty měřené veličiny se při n -opakováních měření určí jako aritmetický průměr z jednotlivých naměřených hodnot y_i :

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (17)$$

Dále se stanoví směrodatná odchylka $s(\bar{y})$:

$$s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (18)$$

A pro výslednou hodnotu potom platí:

$$y = \bar{y} + k \cdot s(\bar{y}) \quad (19)$$

Koeficientu k říkáme studentův koeficient a při uvažování Gaussova rozdělení můžeme zjistit jeho hodnotu pro použitý počet opakování zvolením hladiny spolehlivosti. Hladina

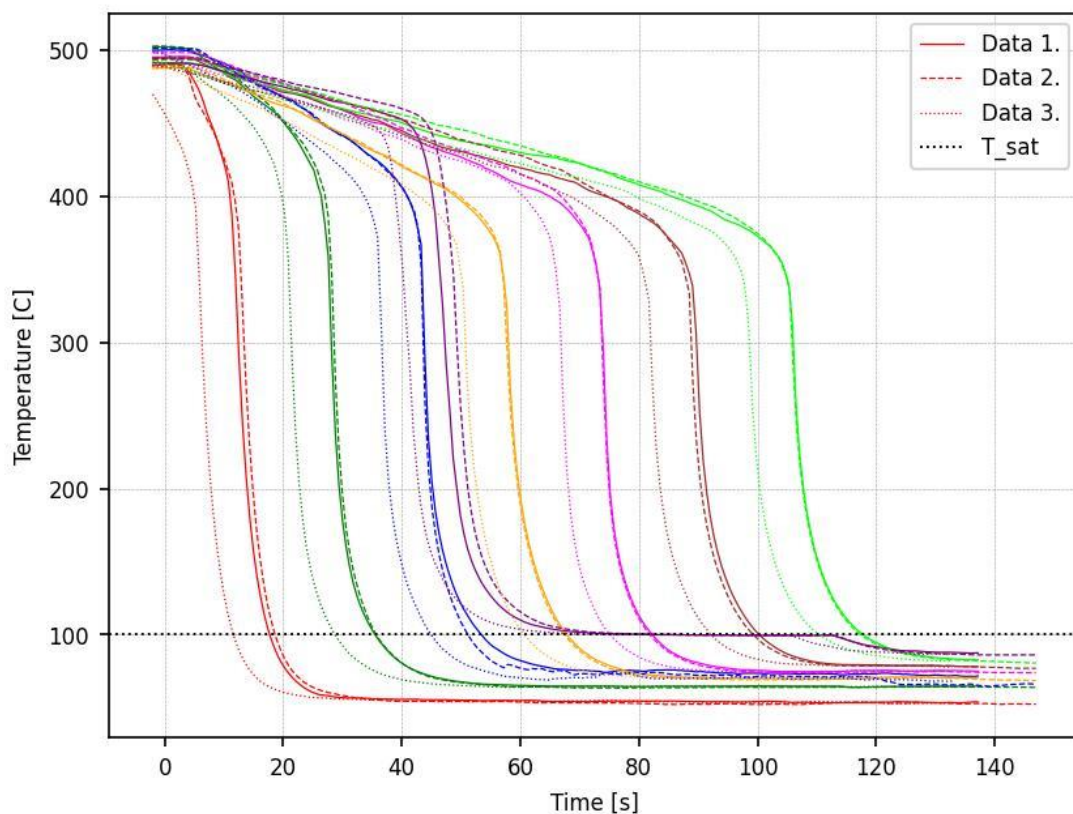
spolehlivosti představuje pravděpodobnost, s jakou správná hodnota leží ve výsledném intervalu. Zvolíme-li pravděpodobnost 68,27 %, bude hodnota studentova koeficientu pro použitý počet opakování měření ($n = 3$):

$$k = 1,321 \quad (20)$$

4.2 Výsledné hodnoty rychlosti postupu chladicí fronty

Jak již bylo zmíněno, rychlost postupu chladicí fronty byla vyhodnocována jako průměrná rychlost na úsecích mezi 8 termočlánky, které byly umístěny na povrchu ocelové trubky. V průběhu měření však bylo zjištěno, že termočlánky umístěné na horním konci testovací sekce jsou ovlivněny sekundární chladicí frontou a poskytují zkreslené naměřené hodnoty. Sekundární chladicí fronta je způsobena kondenzací páry v horní komoře experimentálního zařízení a následným vtokem vody zpět do testovací sekce.

Na základě naměřených hodnot byl z uvažování vyřazen poslední termočlánek na povrchu trubky (TČ 8), jelikož docházelo k jeho předčasnému ochlazování a smočení při všech provedených měřeních. Jak můžeme vidět na obrázku 33, ke smočení osmého termočlánku (na obrázku fialová barva) docházelo již v době, kdy se chladicí fronta nacházela mezi třetím a čtvrtým termočlánkem.



Obrázek 33 – Předčasné smočení 8. TČ při jednom z experimentálních měření

Ze stejného důvodu byly u některých měření vyřazeny hodnoty naměřené pomocí 7. TČ a ve dvou výjimečných případech i hodnoty získané pomocí 6. TČ. Tato vyřazená data jsou v tabulkách naměřených hodnot nahrazena symbolem „x“.

4.2.1 Závislost rychlosti na jednotlivých úsecích testovací sekce

První zkoumanou závislostí byl vývoj rychlosti chladicí fronty na jednotlivých úsecích testovací sekce pro různé počáteční hodnoty teploty ohřátí trubky. Výsledky jsou rozděleny do čtyř tabulek (tabulky 8 až 11) dle použitých teplot chladicí vody t_v a hodnoty jsou uvedeny spolu s příslušnou nejistotou měření vypočtenou dle postupu v kapitole 4.1.

Úsek	Teplota trubky [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
1 -- 2	1,96	1,72	1,55	1,41	1,31	1,25	1,14	1,06	0,97	0,84
	0,15	0,07	0,06	0,06	0,08	0,10	0,06	0,10	0,05	0,00
2 -- 3	2,73	2,11	1,87	1,65	1,51	1,24	1,20	0,99	0,85	0,69
	0,16	0,00	0,00	0,06	0,11	0,15	0,06	0,06	0,03	0,04
3 -- 4	2,82	2,08	1,77	1,59	1,43	1,28	1,09	0,92	0,75	0,55
	0,19	0,10	0,00	0,00	0,11	0,07	0,12	0,10	0,06	0,02
4 -- 5	3,02	2,29	1,83	1,58	1,43	1,28	1,00	0,83	0,59	0,40
	0,20	0,20	0,08	0,06	0,07	0,09	0,13	0,06	0,13	0,01
5 -- 6	3,31	2,52	1,81	1,54	1,33	1,18	0,89	0,66	0,50	0,30
	0,27	0,16	0,16	0,05	0,01	0,06	0,16	0,05	0,02	0,04
6 -- 7	x	x	1,99	1,51	1,28	1,06	0,77	0,57	0,37	0,23
	x	x	0,16	0,05	0,08	0,03	0,09	0,01	0,12	0,01

Tabulka 8 – Rychlost chladicí fronty na jednotlivých úsecích při $t_v = 17\text{ °C}$

Úsek	Teplota trubky [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
1 -- 2	2,04	1,75	1,51	1,36	1,31	1,17	1,04	0,96	0,89	0,76
	0,10	0,13	0,09	0,04	0,03	0,07	0,04	0,02	0,04	0,03
2 -- 3	2,41	1,87	1,61	1,41	1,30	1,12	1,00	0,87	0,73	0,59
	0,00	0,00	0,11	0,13	0,06	0,00	0,08	0,02	0,02	0,01
3 -- 4	2,52	1,88	1,62	1,43	1,35	1,17	0,93	0,77	0,60	0,44
	0,16	0,15	0,07	0,05	0,05	0,09	0,05	0,03	0,03	0,04
4 -- 5	2,94	2,39	1,74	1,49	1,30	1,05	0,84	0,63	0,47	0,37
	0,20	0,12	0,07	0,09	0,04	0,08	0,02	0,00	0,01	0,01
5 -- 6	3,00	2,28	1,80	1,37	1,23	0,96	0,76	0,59	0,40	0,26
	0,22	0,00	0,08	0,11	0,00	0,13	0,06	0,01	0,04	0,01
6 -- 7	x	x	1,84	1,58	1,23	0,91	0,72	0,46	0,29	0,24
	x	x	0,08	0,15	0,04	0,07	0,03	0,05	0,02	0,01

Tabulka 9 – Rychlost chladicí fronty na jednotlivých úsecích při $t_v = 33\text{ °C}$

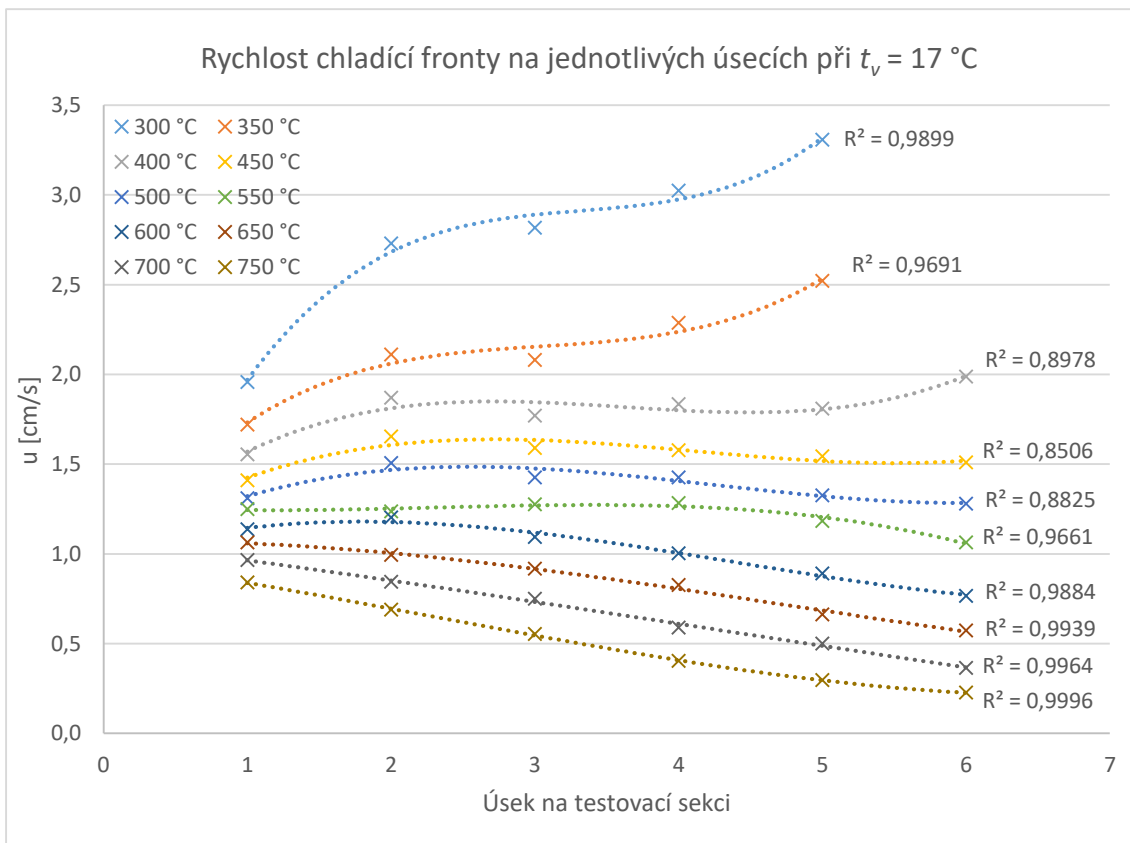
Úsek	Teplota trubky [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
1 -- 2	1,95	1,61	1,36	1,23	1,10	1,00	0,90	0,78	0,69	0,60
	0,00	0,06	0,04	0,00	0,03	0,03	0,00	0,03	0,02	0,02
2 -- 3	2,30	1,71	1,45	1,25	1,09	0,97	0,83	0,68	0,56	0,47
	0,13	0,07	0,05	0,00	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
3 -- 4	2,39	1,81	1,47	1,28	1,11	0,91	0,76	0,59	0,48	0,35
	0,13	0,08	0,05	0,07	0,03	0,03	0,03	0,01	0,00	0,01
4 -- 5	2,50	1,87	1,49	1,25	1,04	0,79	0,67	0,53	0,33	0,23
	0,14	0,08	0,01	0,03	0,07	0,04	0,01	0,00	0,02	0,01
5 -- 6	2,82	1,99	1,62	1,26	1,00	0,83	0,68	0,39	0,26	0,22
	0,18	0,00	0,06	0,05	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01
6 -- 7	x	x	x	x	1,47	0,79	0,47	0,30	0,26	0,27
	x	x	x	x	0,09	0,04	0,00	0,01	0,00	0,01

Tabulka 10 – Rychlost chladící fronty na jednotlivých úsecích při $t_v = 50\text{ °C}$

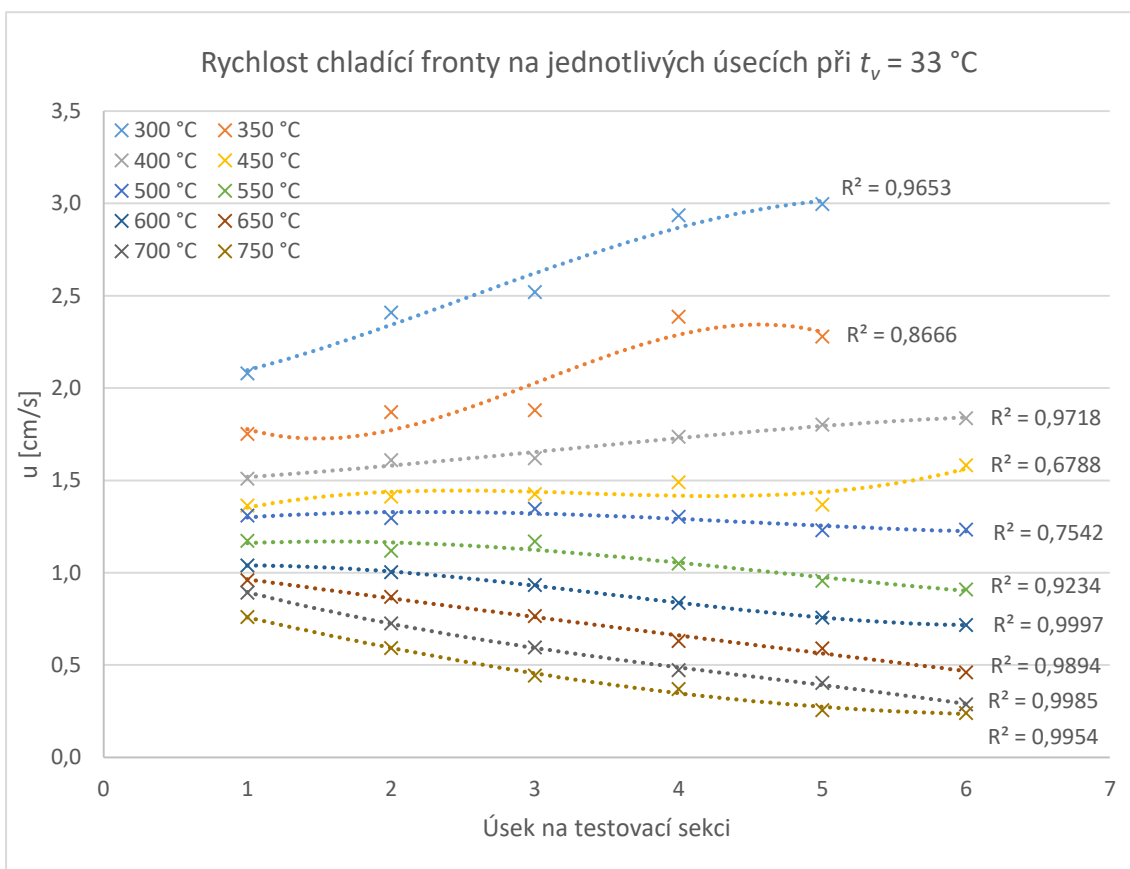
Úsek	Teplota trubky [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
1 -- 2	2,02	1,47	1,31	1,11	0,98	0,83	0,75	0,65	0,56	0,49
	0,12	0,14	0,08	0,05	0,00	0,05	0,03	0,00	0,01	0,02
2 -- 3	2,33	1,77	1,47	1,16	1,01	0,75	0,73	0,61	0,52	0,43
	0,15	0,00	0,01	0,05	0,03	0,21	0,02	0,00	0,02	0,01
3 -- 4	2,37	1,77	1,49	1,17	0,99	1,00	0,71	0,58	0,37	0,25
	0,16	0,00	0,07	0,07	0,03	0,13	0,00	0,01	0,01	0,02
4 -- 5	2,63	1,80	1,45	1,18	0,92	0,74	0,52	0,33	0,23	0,20
	0,01	0,13	0,05	0,00	0,00	0,02	0,03	0,05	0,01	0,01
5 -- 6	x	x	1,78	1,23	0,99	0,68	0,38	0,28	0,24	0,26
	x	x	0,13	0,01	0,02	0,07	0,04	0,02	0,02	0,01
6 -- 7	x	x	1,78	1,24	0,87	0,42	0,33	0,29	0,29	0,31
	x	x	0,12	0,15	0,02	0,00	0,03	0,02	0,01	0,03

Tabulka 11 – Rychlost chladící fronty na jednotlivých úsecích při $t_v = 67\text{ °C}$

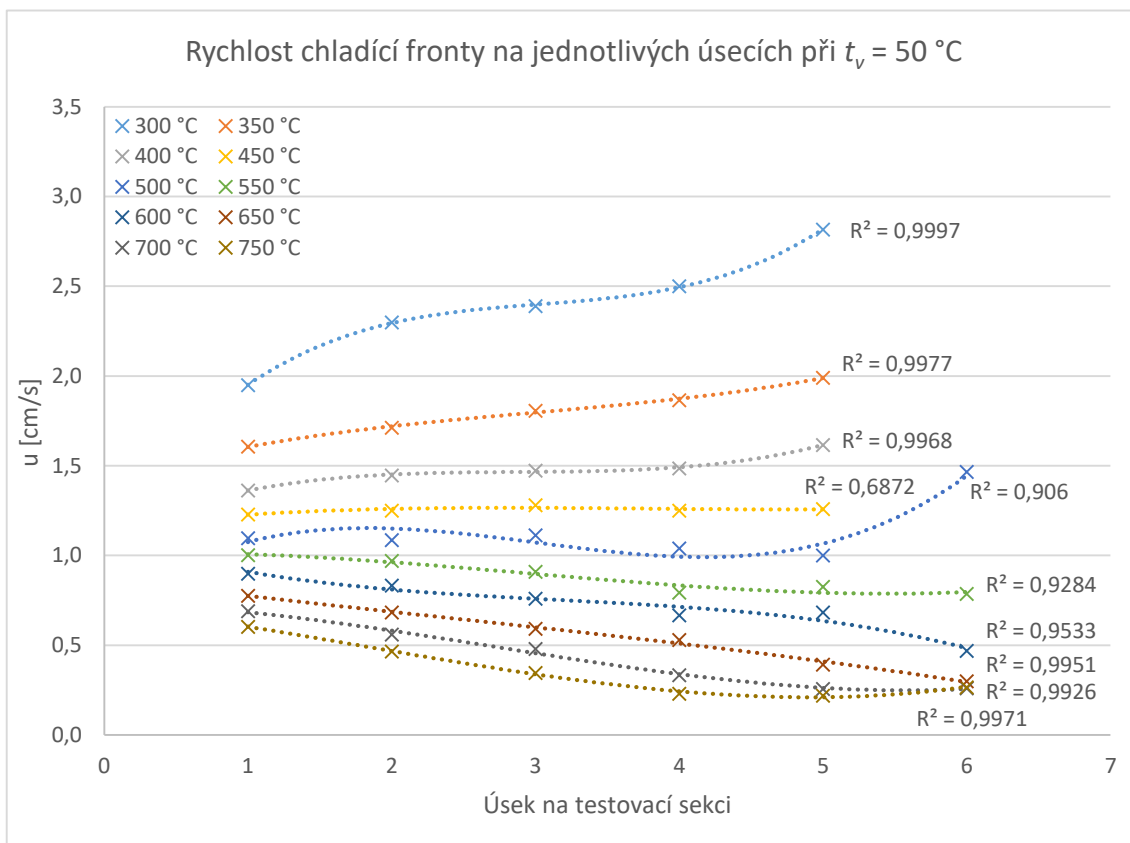
Výsledné závislosti jsou znázorněny na obrázcích 34 až 37 a jsou proloženy polynomičnými funkcemi třetího řádu, jejichž hodnota spolehlivosti je uvedena u příslušné křivky v grafu.



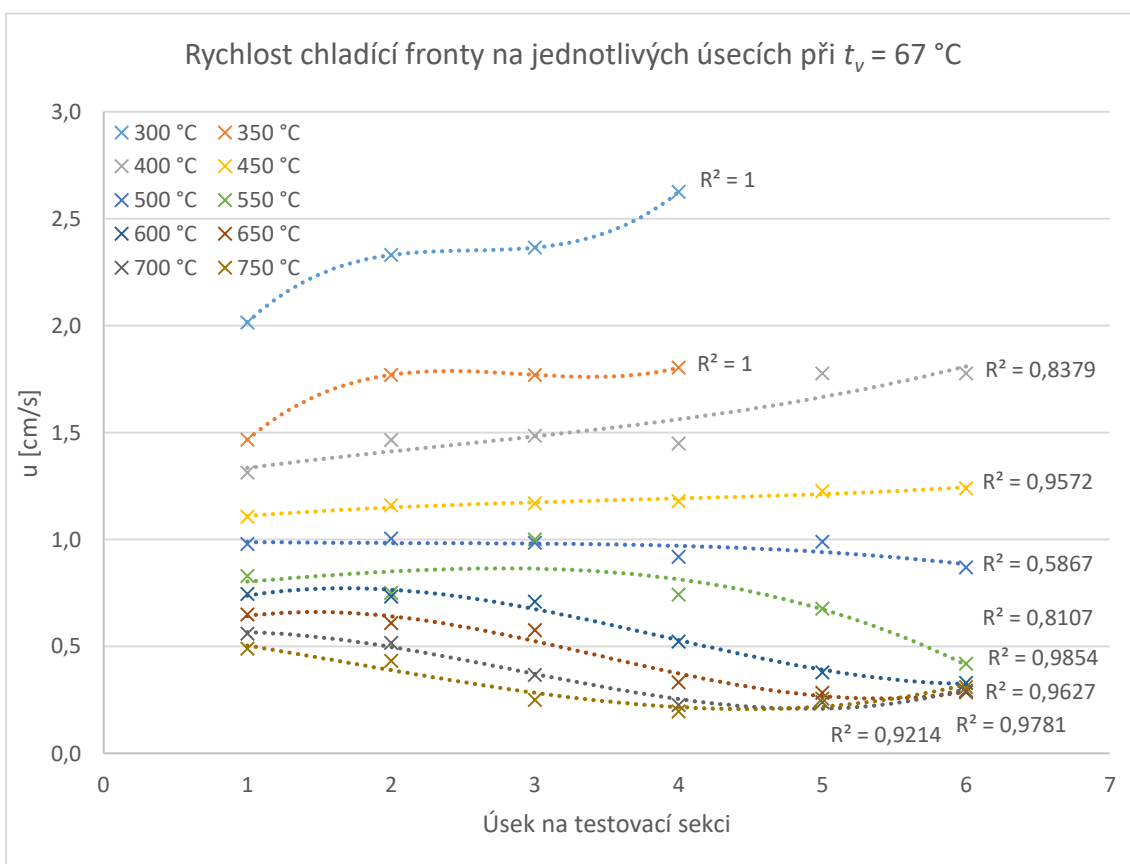
Obrázek 34 – Rychlosti chladících front na jednotlivých úsecích při $t_v = 17\text{ }^\circ\text{C}$



Obrázek 35 – Rychlosti chladících front na jednotlivých úsecích při $t_v = 33\text{ }^\circ\text{C}$



Obrázek 36 – Rychlosti chladících front na jednotlivých úsecích při $t_v = 50\text{ }^\circ\text{C}$



Obrázek 37 – Rychlosti chladících front na jednotlivých úsecích při $t_v = 67\text{ }^\circ\text{C}$

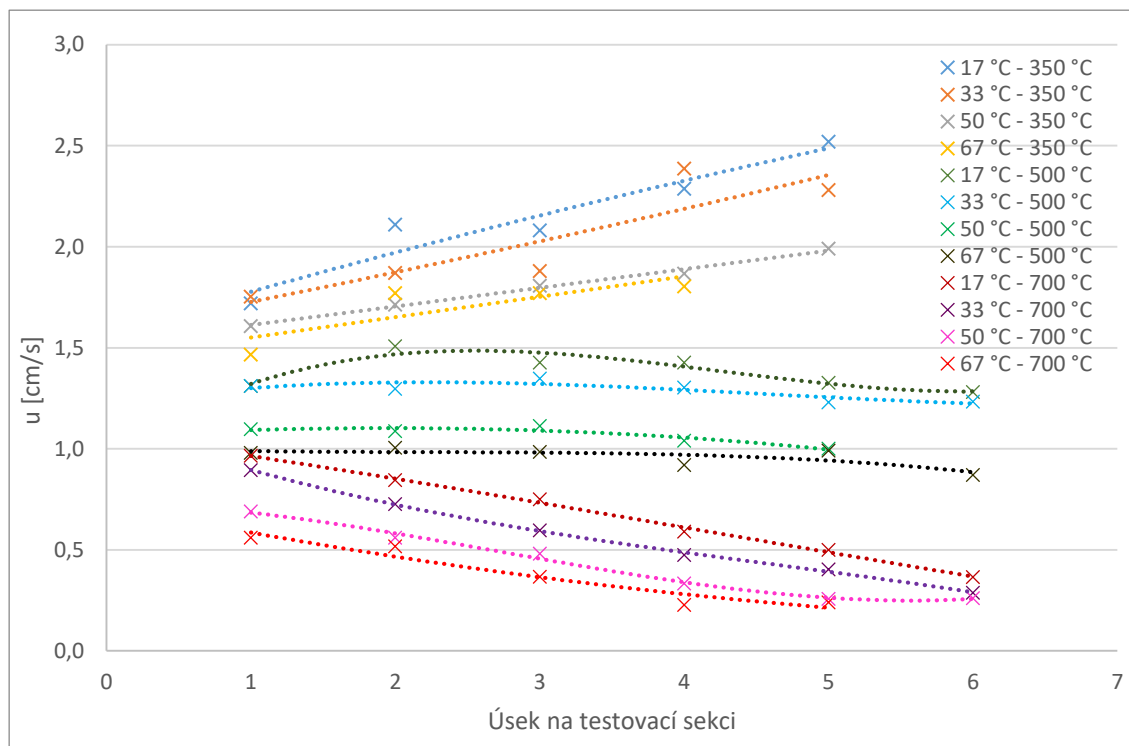
Na obrázcích 34 až 37 můžeme vidět, že průběhy rychlostí chladicí fronty na jednotlivých úsecích jsou obdobné při různých teplotách chladicí vody, avšak výrazně se liší v závislosti na počáteční teplotě povrchu. Rozdílné hodnoty rychlostí po výšce testovací sekce jsou způsobené několika fyzikálními jevy.

Jedním z těchto jevů je předchlazování povrchu horkého kanálu, které již bylo zmíněno v kapitole 1.4.2.3. Chladicí voda se po kontaktu s horkým povrchem vypařuje, vznikající pára stoupá vzhůru a ochlazuje dosud nesmočené části testovací sekce. Postupující chladicí fronta tak dosahuje jednotlivých úseků mezi termočlánky v době, kdy je teplota povrchu na daném místě znatelně nižší oproti původní teplotě nahřátí. Rychlost zaplavování jednotlivých úseků se tedy zvětšuje s rostoucí vzdáleností od začátku trubky.

Druhou skutečností, která ovlivňuje průběh rychlosti chladicí fronty, je nutnost odvádět teplo dodávané již zaplavenou částí testovací sekce. Jelikož trubka je vyhřívána po celou dobu experimentu, musí chladivo odvádět teplo i z úseků nacházejících se pod úrovní chladicí fronty, což zpomaluje samotný postup chladicí fronty. Tento efekt je výraznější s rostoucí počáteční teplotou nahřátí povrchu a tedy i rostoucím dodávaným výkonem.

Při nižších počátečních teplotách nahřátí trubky (do 400 °C) převažuje při zaplavování efekt předchlazování horkého povrchu a rychlost postupu chladicí fronty se s jednotlivými úseky zvyšuje. Zvětšujeme-li počáteční teplotu testovací sekce (450 až 550 °C), začíná se projevovat odvádění tepla z již zaplavené části kanálu a rychlost chladicí fronty je na celé výšce přibližně konstantní. Při teplotách přesahujících 600 °C již nad předchlazováním převažuje odvod „zbytkového tepla“ a postup chladicí fronty je postupně zpomalován. Pokud bychom dále zvyšovali počáteční teplotu testovací sekce nebo například snížili průtok chladiva, mohlo by dojít k tomu, že se chladicí fronta ustálí na určité hladině a horký kanál nebude možné zaplavit vodou po celé výšce. Na tuto situaci jsme však během experimentálního měření nenarazili. Při všech zkoumaných kombinacích teploty chladicí vody a počáteční teploty nahřátí trubky bylo dosaženo úplného zaplavení horkého kanálu.

Pro lepší ilustraci jsou na obrázku 38 porovnány průběhy rychlostí chladicí fronty pro 3 různé počáteční teploty povrchu. První zvolenou je trubka o teplotě 350 °C, u které můžeme vidět rostoucí trend, dále trubka o teplotě 500 °C, u které byla rychlost přibližně konstantní a nakonec trubka o teplotě 700 °C, kde je trend rychlosti klesající.

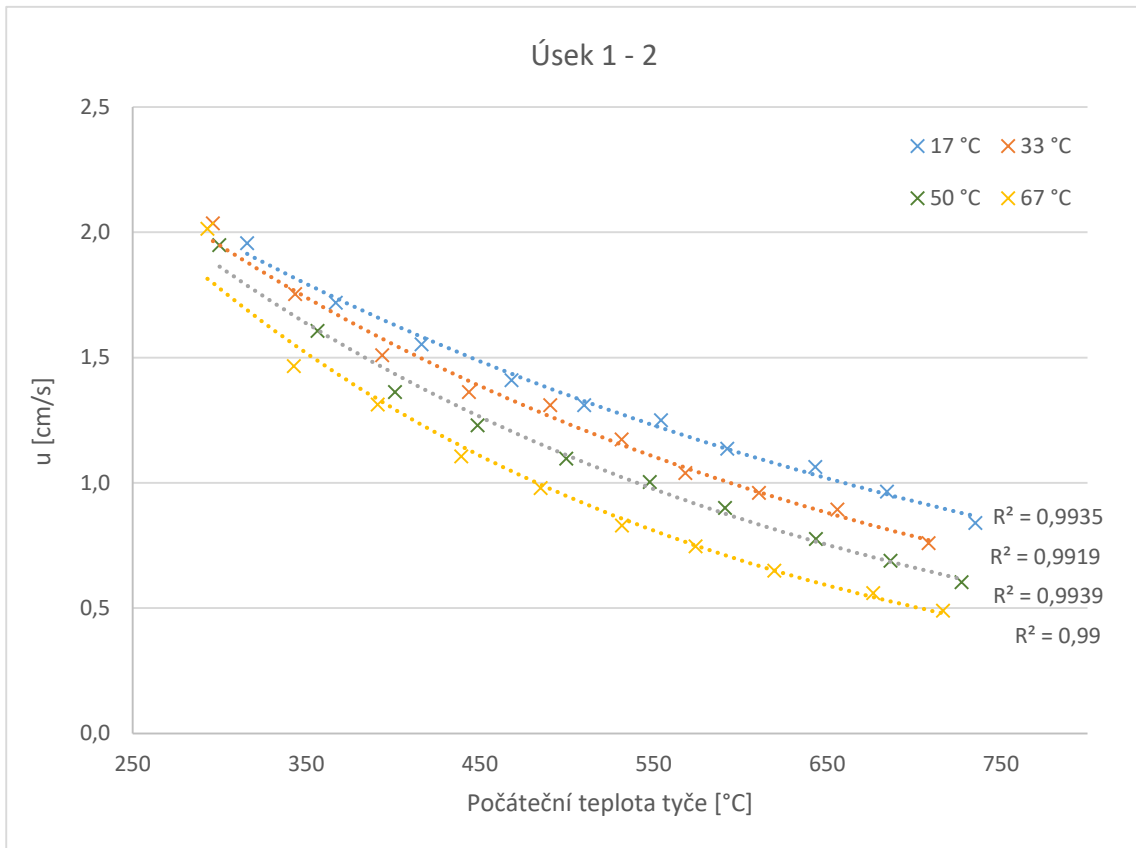


Obrázek 38 – Porovnání rychlostí na jednotlivých úsecích pro 3 různé teploty povrchu

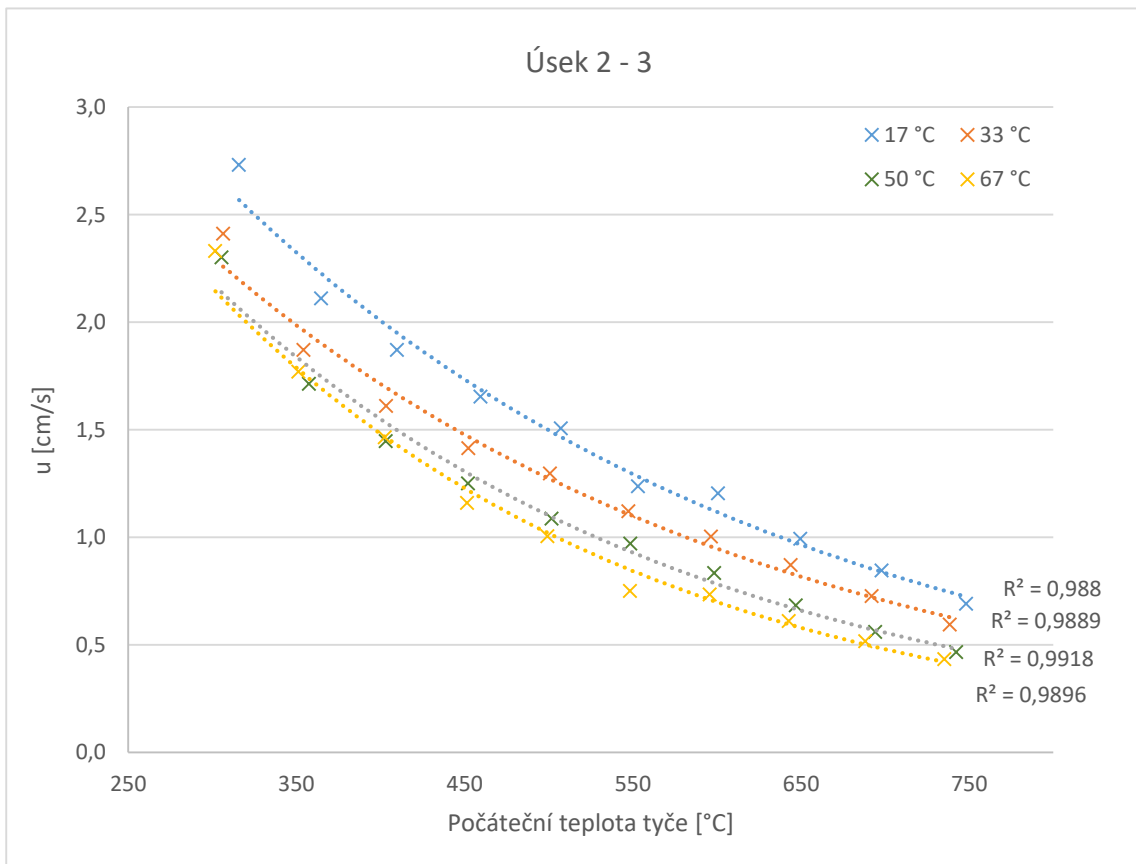
4.2.2 Závislost rychlosti na počáteční teplotě testovací sekce

Dále byla zkoumána závislost rychlosti na počáteční teplotě nahřátí testovací sekce pro vybraný úsek na testovací sekci. Na vodorovných osách grafů je namísto odhadované přibližné teploty trubky vynesena aritmetický průměr teplot povrchu u dvou příslušných termočlánků při zahájení zaplavování. Tím je alespoň částečně eliminována nepřesnost způsobená nerovnoměrným zahřátím povrchu po výšce trubky.

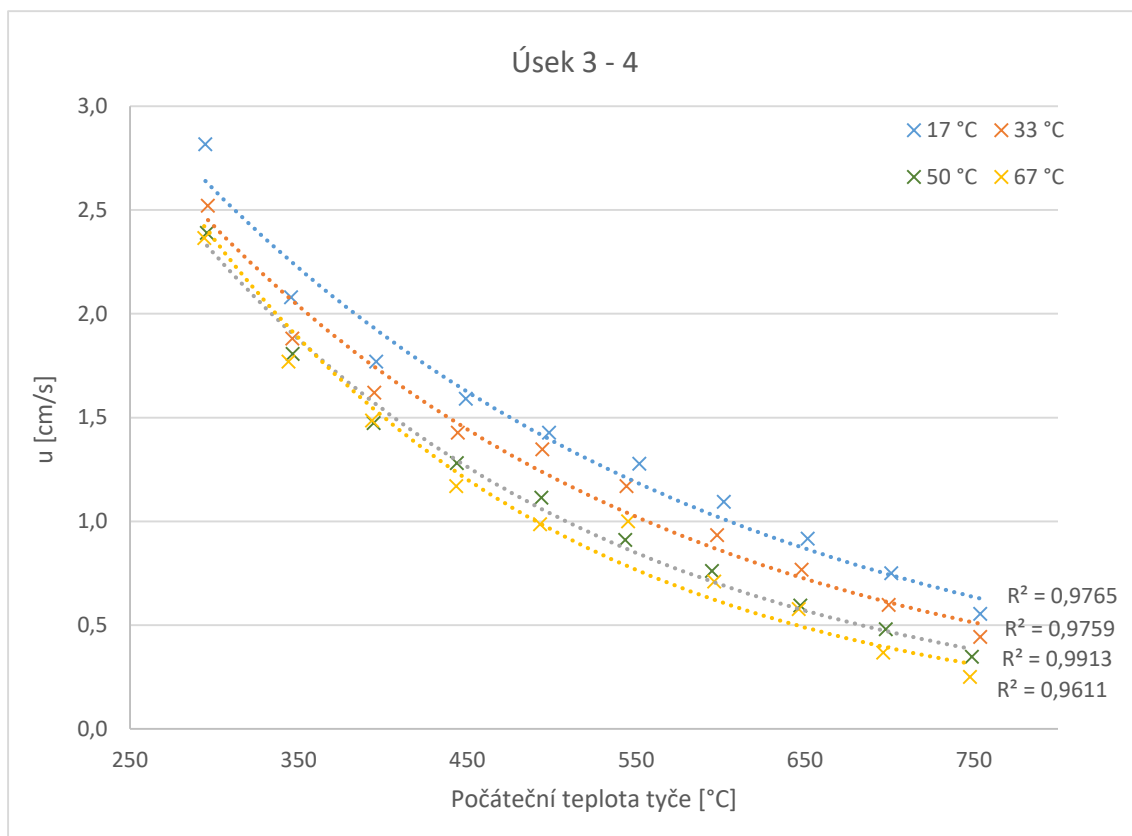
Na obrázcích 39 až 41 jsou zobrazeny závislosti rychlosti na počáteční teplotě povrchu pro úseky mezi termočlánky 1 a 2, 2 a 3 a 3 a 4, pro všechny zkoumané teploty chladicí vody. Data jsou proložena exponenciálními funkcemi, jejichž hodnoty spolehlivosti jsou uvedeny u příslušných křivek.



Obrázek 39 – Závislost rychlosti na počáteční teplotě testovací sekce na úseku 1 – 2



Obrázek 40 – Závislost rychlosti na počáteční teplotě testovací sekce na úseku 2 – 3



Obrázek 41 – Závislost rychlosti na počáteční teplotě testovací sekce na úseku 3 – 4

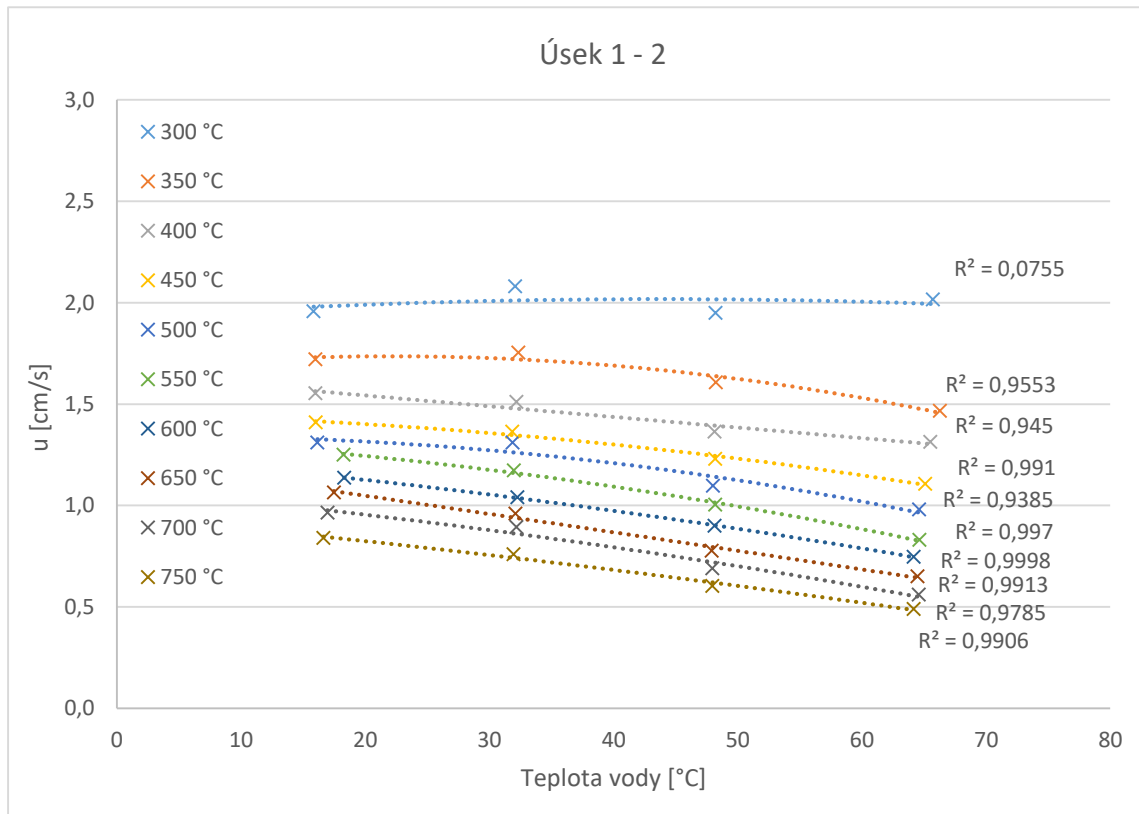
Na grafech můžeme vidět, že rychlost postupu chladící fronty s rostoucí počáteční teplotou testovací sekce klesá. Dle očekávání dosahujeme vyšších velikostí rychlostí při použití chladiva o nižší teplotě. Přesnější popis závislosti rychlosti na teplotě chladiva však bude uveden v následující kapitole.

4.2.3 Závislost rychlosti na teplotě chladící vody

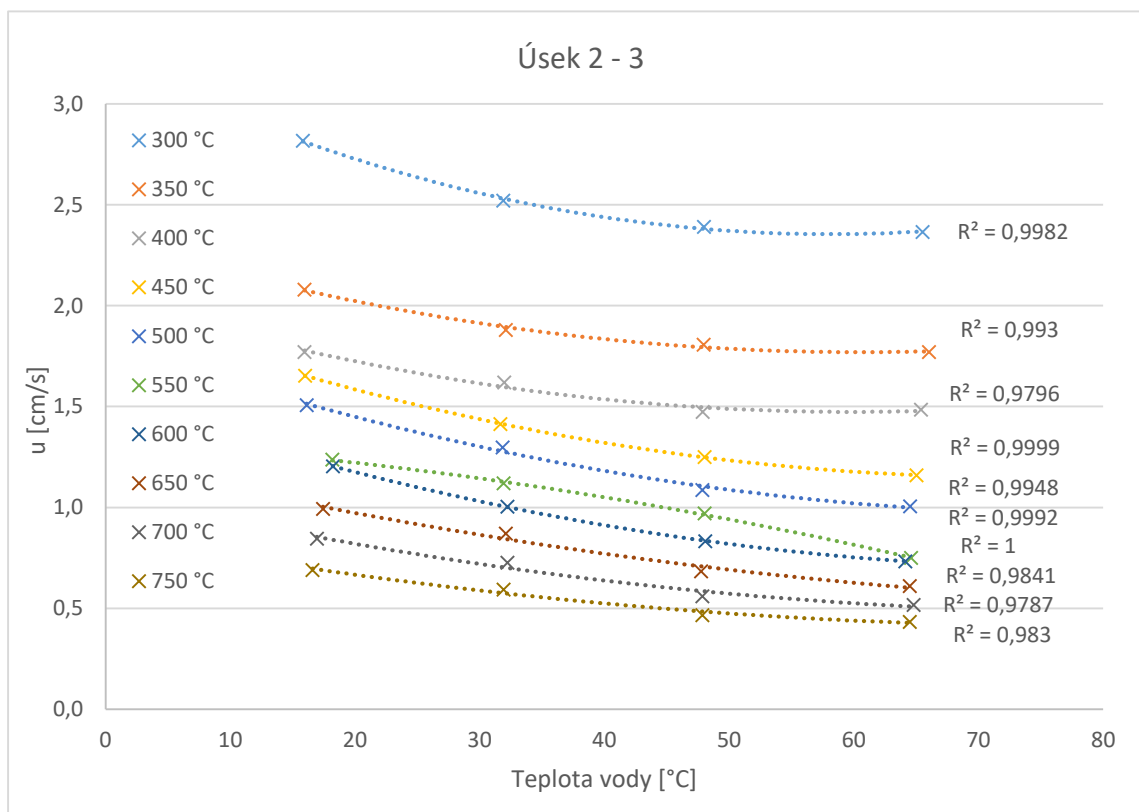
V předchozích kapitolách byly uvažovány pouze přibližné teploty chladící vody, přičemž reálné teploty při jednotlivých měřeních nebyly vždy stejné. Na obrázcích 42 až 45 jsou pro vybrané úseky testovací sekce znázorněny příslušné závislosti rychlostí postupu chladící fronty na skutečné teplotě chladiva.

Při každém měření byla po celou dobu experimentu měřena teplota vody na vstupu do testovací sekce. Pomocí skriptu byly nalezeny důležité teplotní body a jim odpovídající časové intervaly, kdy docházelo k zaplavování jednotlivých úseků. Následně byla vypočtena průměrná teplota vody na vstupu během těchto časových intervalů a ta byla přiřazena k hodnotám rychlosti chladící fronty na odpovídajícím úseku testovací sekce. Touto metodou měření dochází k určité chybě, jelikož voda, jejíž teplota byla změřena, dorazí na úroveň chladící fronty s určitým zpožděním. Teplota vody však

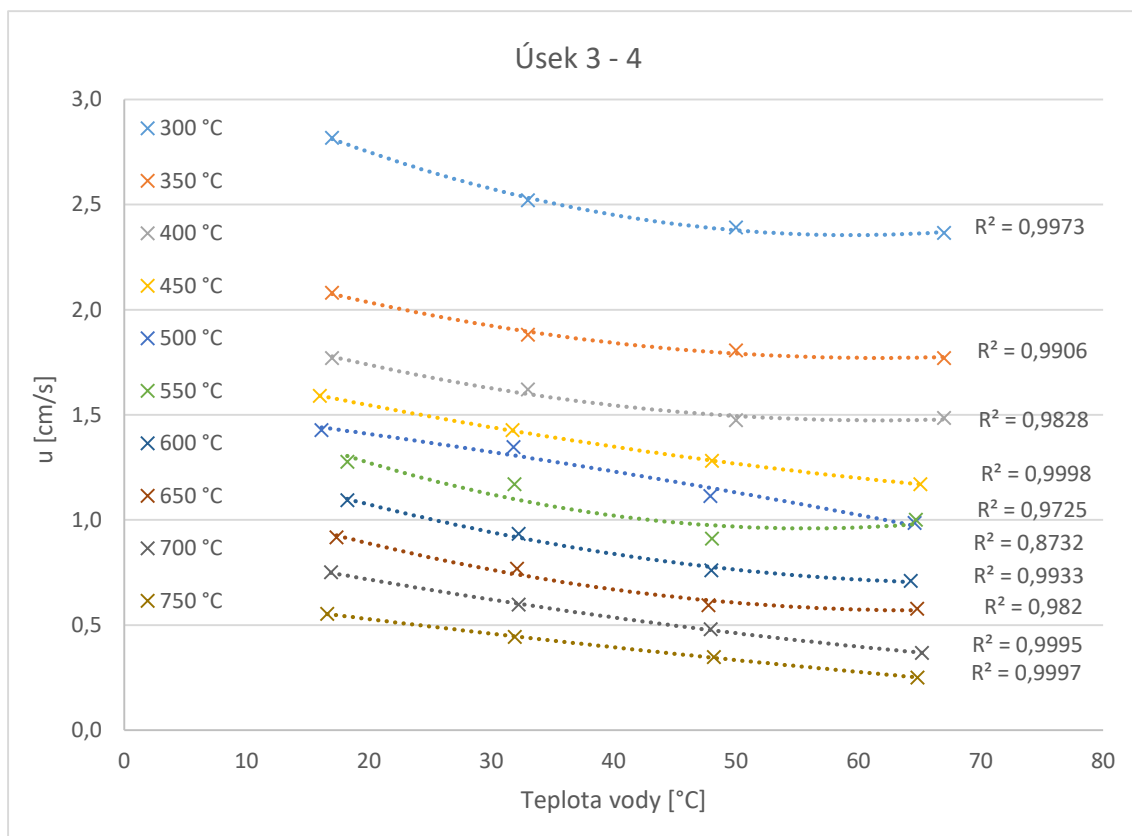
v průběhu jednoho měření kolísala pouze v rozmezí několika desetin stupně, tudíž tuto chybu můžeme považovat za zanedbatelnou.



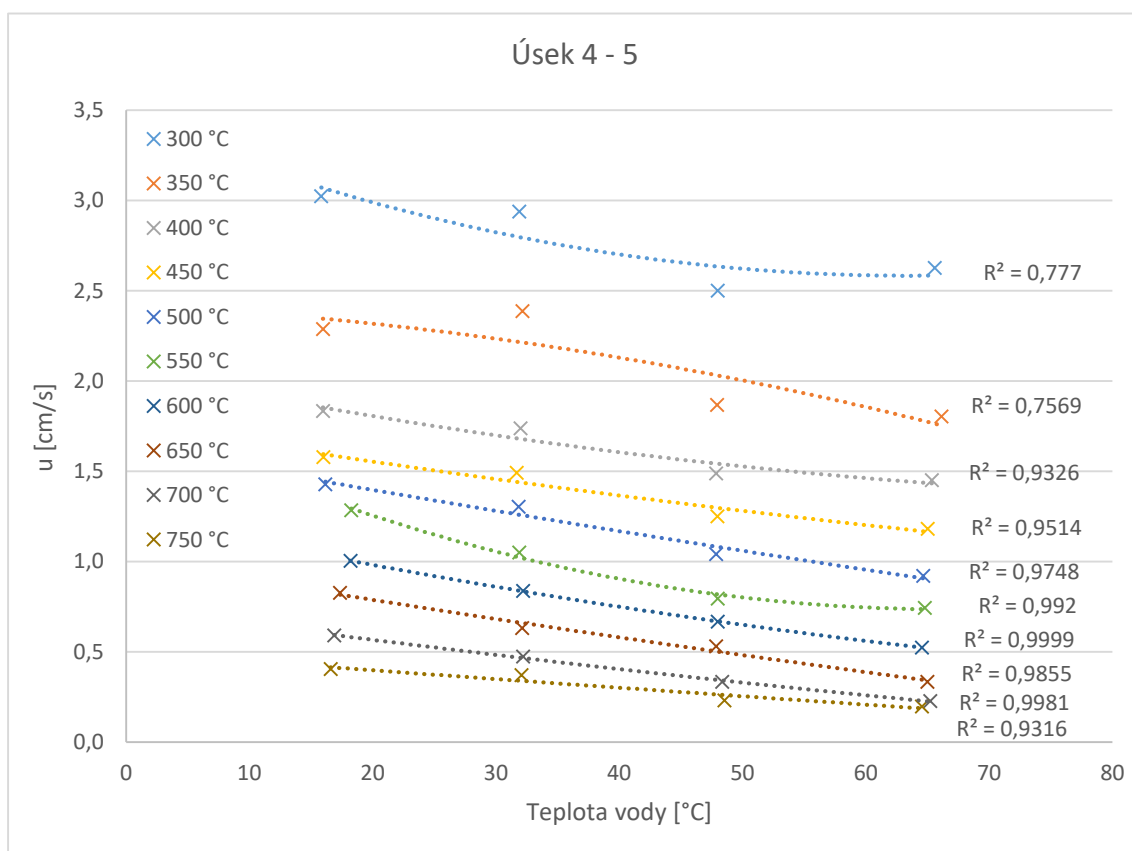
Obrázek 42 – Závislost rychlosti na teplotě chladicí vody na úseku 1 – 2



Obrázek 43 – Závislost rychlosti na teplotě chladicí vody na úseku 2 – 3



Obrázek 44 – Závislost rychlosti na teplotě chladicí vody na úseku 3 – 4



Obrázek 45 – Závislost rychlosti na teplotě chladicí vody na úseku 4 – 5

Naměřené hodnoty jsou v grafech proloženy polynomickými funkcemi druhého řádu, u kterých jsou uvedeny jejich hodnoty spolehlivosti. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, rychlosti chladicí fronty na jednotlivých úsecích se zmenšují s rostoucí teplotou chladiva.

4.2.4 Rychlost chladicí fronty na delších úsecích

Většina již provedených podobných experimentálních měření vyhodnocovala rychlost postupu chladicí fronty na úsecích o větší délce, než byly rozestupy mezi použitými termočlánky v tomto experimentu. Z toho důvodu je pro lepší porovnání s dalšími pracemi výhodné určit závislosti rychlosti i pro delší úseky testovací sekce.

Zjištěné rychlosti pro jednotlivé úseky u_{ij} jsou vynásobeny příslušnou vzdáleností mezi termočlánky l_{ij} (viz tabulka 7, str. 42), sečteny a vyděleny součtem délek uvažovaných úseků. Například pro úsek mezi prvním a pátým termočlánkem bude vztah pro výslednou hodnotu rychlosti:

$$u_{15} = \frac{u_{12}l_{12} + u_{23}l_{23} + u_{34}l_{34} + u_{45}l_{45}}{l_{12} + l_{23} + l_{34} + l_{45}} \quad (21)$$

Rychlosti získané tímto postupem mají větší výpovědní hodnotu, jelikož berou v úvahu větší množství dat a případné výchyly mají tedy menší vliv na výslednou závislost. V této práci byly počítány rychlosti na pěti různých úsecích, které jsou uvedeny v tabulce 12 s odpovídajícími délkami.

Úsek	1 - 5	1 - 6	1 - 7	2 - 6	2 - 7
Délka [mm]	801	993	1196	793	996

Tabulka 12 – Uvažované delší úseky a jejich délky

Výsledné hodnoty s nejistotou měření jsou uvedeny v tabulkách 13 až 16 a vybrané grafické závislosti jsou znázorněny na obrázcích 46 až 52. Na vodorovné osy grafů jsou vynášeny přesnější hodnoty počátečních teplot testovací sekce a teplot chladicí vody. V případě teploty vody se jedná o průměrné teploty během celého zaplavování a v případě teploty povrchu je použita průměrná hodnota nahřátí ze všech uvažovaných termočlánků. Závislosti rychlosti na teplotě trubky jsou proloženy exponenciálními funkcemi a v grafu jsou rovněž pro jednotlivé hodnoty znázorněny chybové úsečky. Grafy závislostí na teplotě vody jsou proloženy polynomickými funkcemi druhého řádu.

Úsek	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
1 -- 7	x	x	1,80	1,55	1,38	1,22	1,02	0,84	0,67	0,50
	x	x	0,08	0,05	0,08	0,08	0,10	0,06	0,07	0,02
1 -- 6	2,76	2,14	1,77	1,55	1,40	1,25	1,07	0,89	0,73	0,56
	0,16	0,09	0,05	0,04	0,06	0,08	0,09	0,06	0,05	0,02
1 -- 5	2,63	2,05	1,76	1,56	1,42	1,26	1,11	0,95	0,79	0,62
	0,17	0,09	0,03	0,04	0,09	0,10	0,09	0,08	0,07	0,02
2 -- 7	x	x	1,86	1,57	1,39	1,21	0,99	0,79	0,61	0,43
	x	x	0,08	0,04	0,07	0,08	0,11	0,06	0,07	0,02
2 -- 6	2,97	2,25	1,82	1,59	1,42	1,25	1,05	0,85	0,67	0,49
	0,20	0,12	0,06	0,04	0,07	0,09	0,12	0,07	0,06	0,03

Tabulka 13 – Rychlost chladicí fronty na delších úsecích při $t_v = 17 \text{ °C}$

Úsek	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
1 -- 7	x	x	1,69	1,44	1,29	1,06	0,88	0,71	0,56	0,44
	x	x	0,08	0,10	0,04	0,07	0,05	0,02	0,02	0,02
1 -- 6	2,58	2,03	1,66	1,41	1,30	1,09	0,91	0,76	0,62	0,49
	0,11	0,07	0,07	0,07	0,03	0,06	0,04	0,01	0,02	0,02
1 -- 5	2,48	1,98	1,62	1,42	1,31	1,13	0,95	0,81	0,67	0,54
	0,11	0,10	0,08	0,08	0,05	0,06	0,05	0,02	0,02	0,02
2 -- 7	x	x	1,72	1,46	1,28	1,04	0,85	0,66	0,50	0,38
	x	x	0,08	0,11	0,04	0,07	0,05	0,02	0,02	0,02
2 -- 6	2,72	2,11	1,69	1,43	1,29	1,07	0,88	0,71	0,55	0,42
	0,14	0,07	0,08	0,10	0,04	0,08	0,05	0,02	0,02	0,02

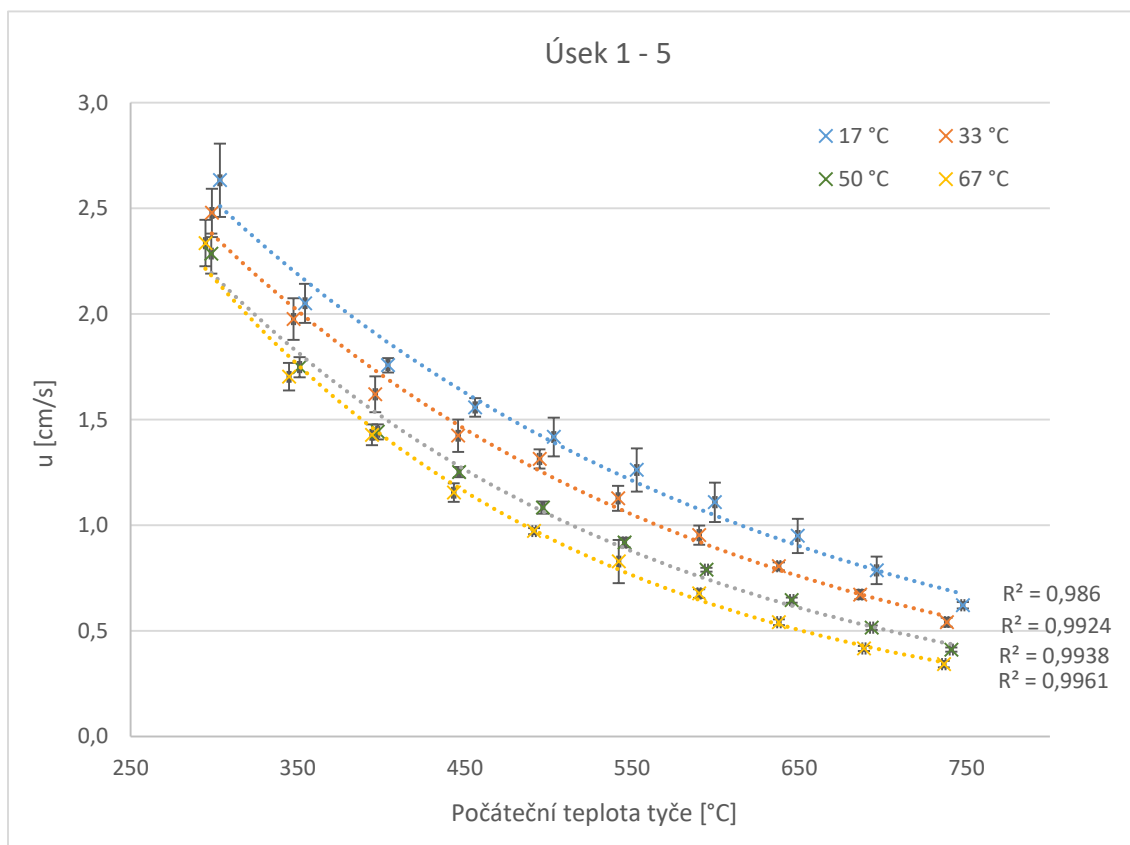
Tabulka 14 – Rychlost chladicí fronty na delších úsecích při $t_v = 33 \text{ °C}$

Úsek	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
1 -- 7	x	x	x	x	1,14	0,88	0,72	0,55	0,43	0,36
	x	x	x	x	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01
1 -- 6	2,39	1,80	1,48	1,25	1,07	0,90	0,77	0,60	0,47	0,37
	0,09	0,05	0,04	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
1 -- 5	2,29	1,75	1,44	1,25	1,08	0,92	0,79	0,65	0,51	0,41
	0,10	0,07	0,04	0,03	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01
2 -- 7	x	x	x	x	1,14	0,86	0,68	0,50	0,38	0,31
	x	x	x	x	0,05	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01
2 -- 6	2,50	1,84	1,50	1,26	1,06	0,87	0,74	0,55	0,41	0,32
	0,14	0,06	0,04	0,04	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01

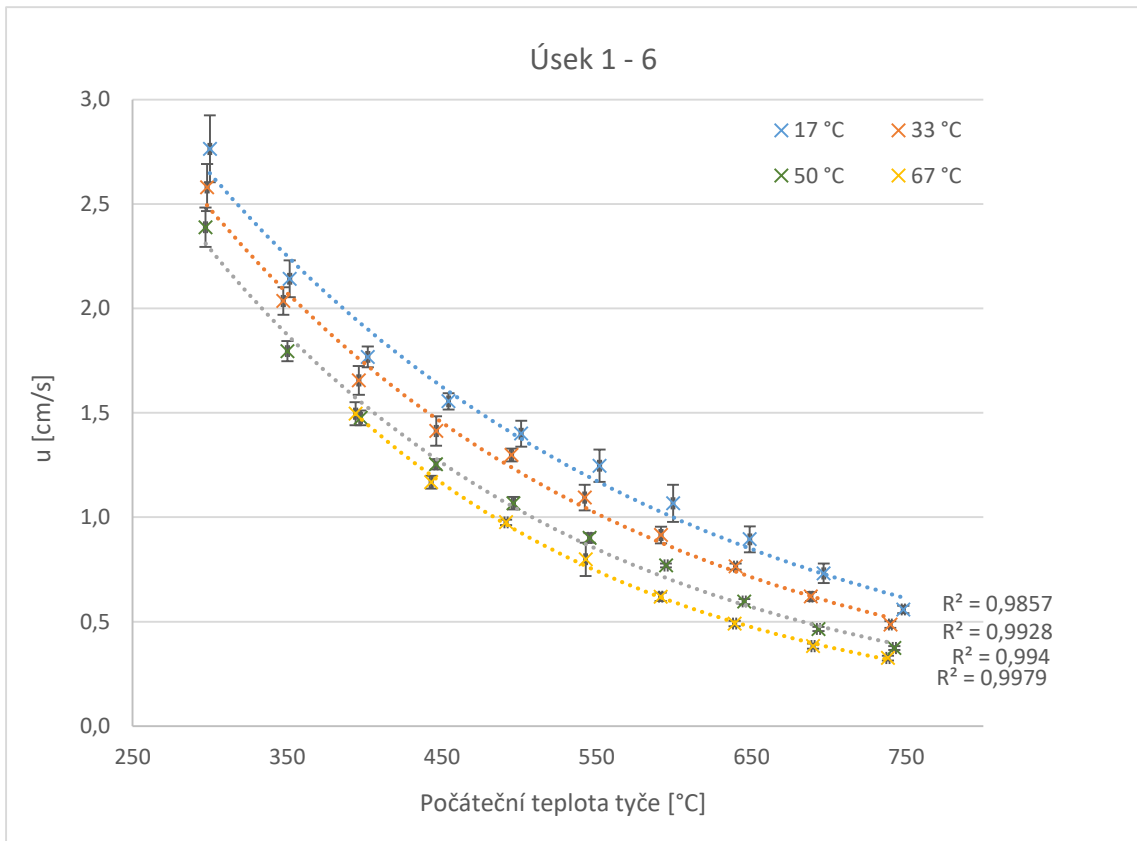
Tabulka 15 – Rychlost chladicí fronty na delších úsecích při $t_v = 50 \text{ °C}$

Úsek	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
1 -- 7	x	x	1,54	1,18	0,96	0,73	0,57	0,46	0,37	0,32
	x	x	0,07	0,06	0,02	0,08	0,02	0,02	0,01	0,02
1 -- 6	x	x	1,50	1,17	0,98	0,80	0,62	0,49	0,38	0,33
	x	x	0,05	0,03	0,01	0,08	0,02	0,01	0,01	0,01
1 -- 5	2,34	1,70	1,43	1,15	0,97	0,83	0,68	0,54	0,42	0,34
	0,11	0,07	0,05	0,04	0,01	0,10	0,02	0,01	0,01	0,02
2 -- 7	x	x	1,59	1,20	0,95	0,72	0,54	0,42	0,33	0,29
	x	x	0,07	0,06	0,02	0,09	0,02	0,02	0,01	0,02
2 -- 6	x	x	1,54	1,18	0,97	0,79	0,59	0,45	0,34	0,28
	x	x	0,06	0,03	0,02	0,11	0,02	0,02	0,01	0,01

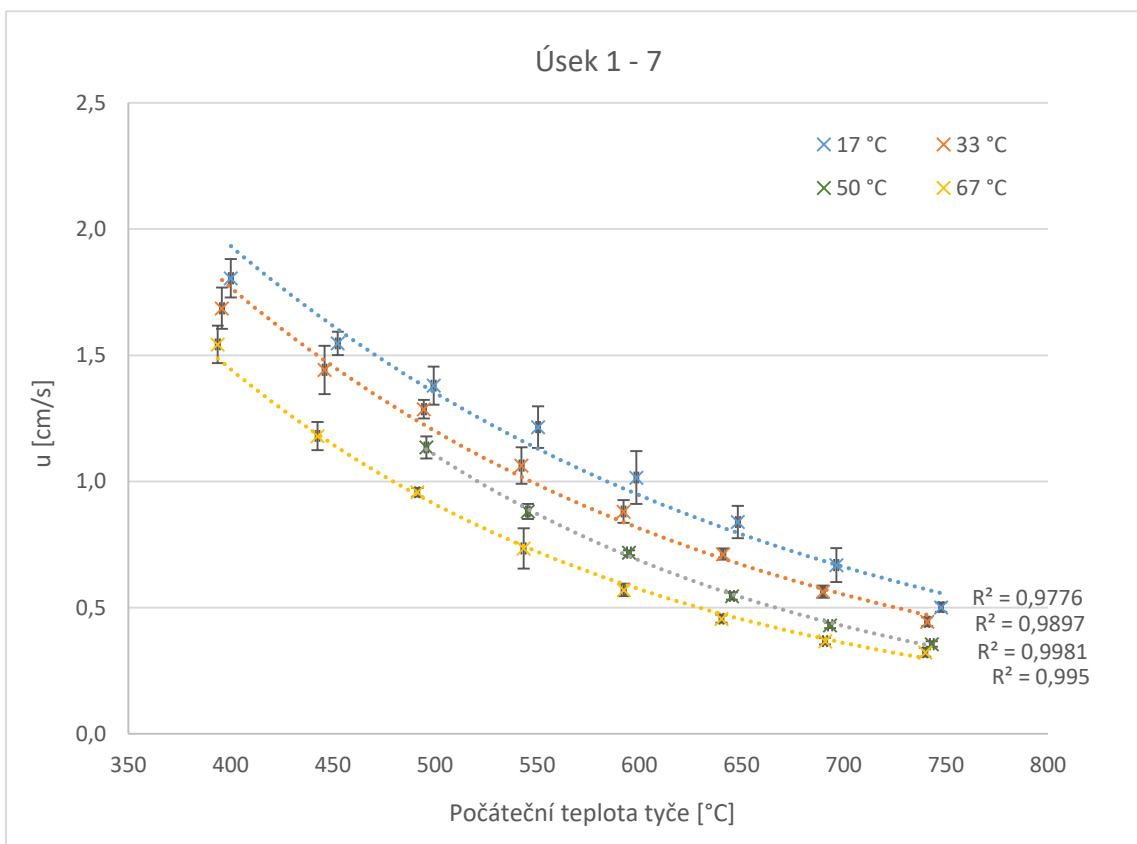
Tabulka 16 – Rychlost chladicí fronty na delších úsecích při $t_v = 67\text{ °C}$



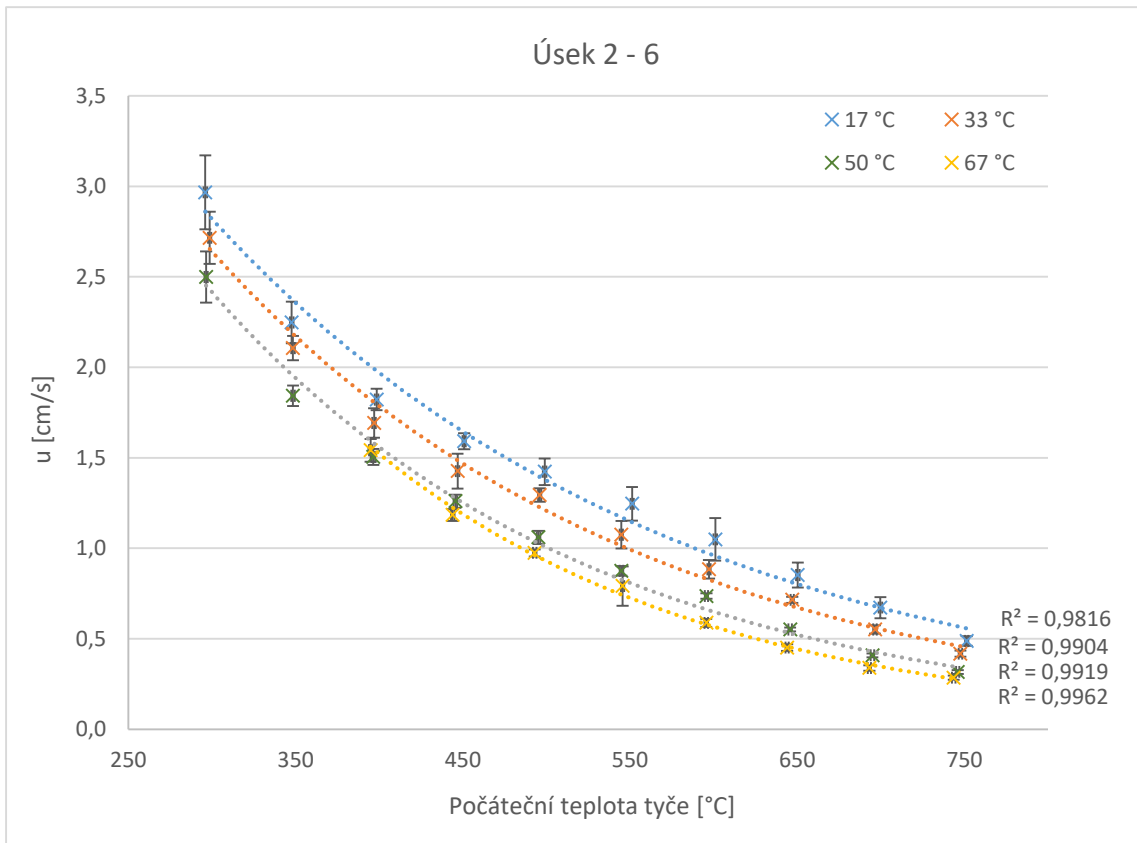
Obrázek 46 - Závislost rychlosti na počáteční teplotě testovací sekce na úseku 1 – 5



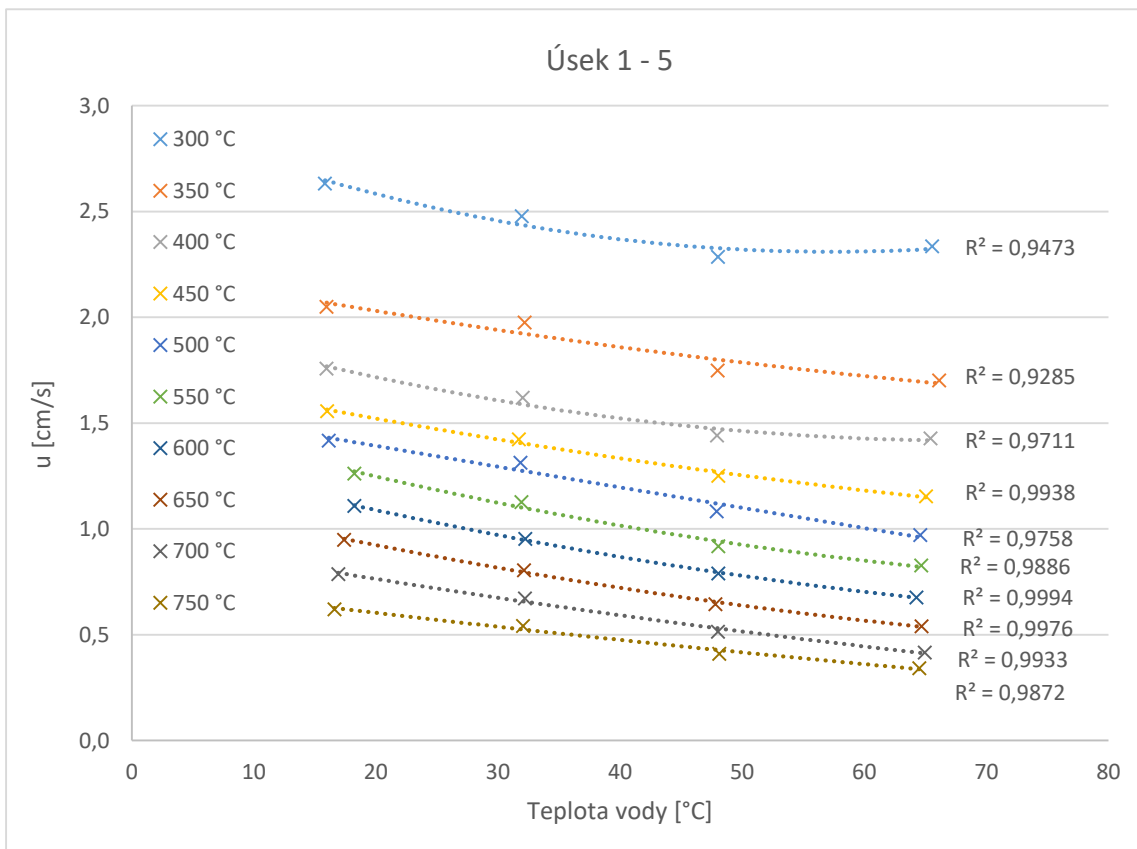
Obrázek 47 - Závislost rychlosti na počáteční teplotě testovací sekce na úseku 1 – 6



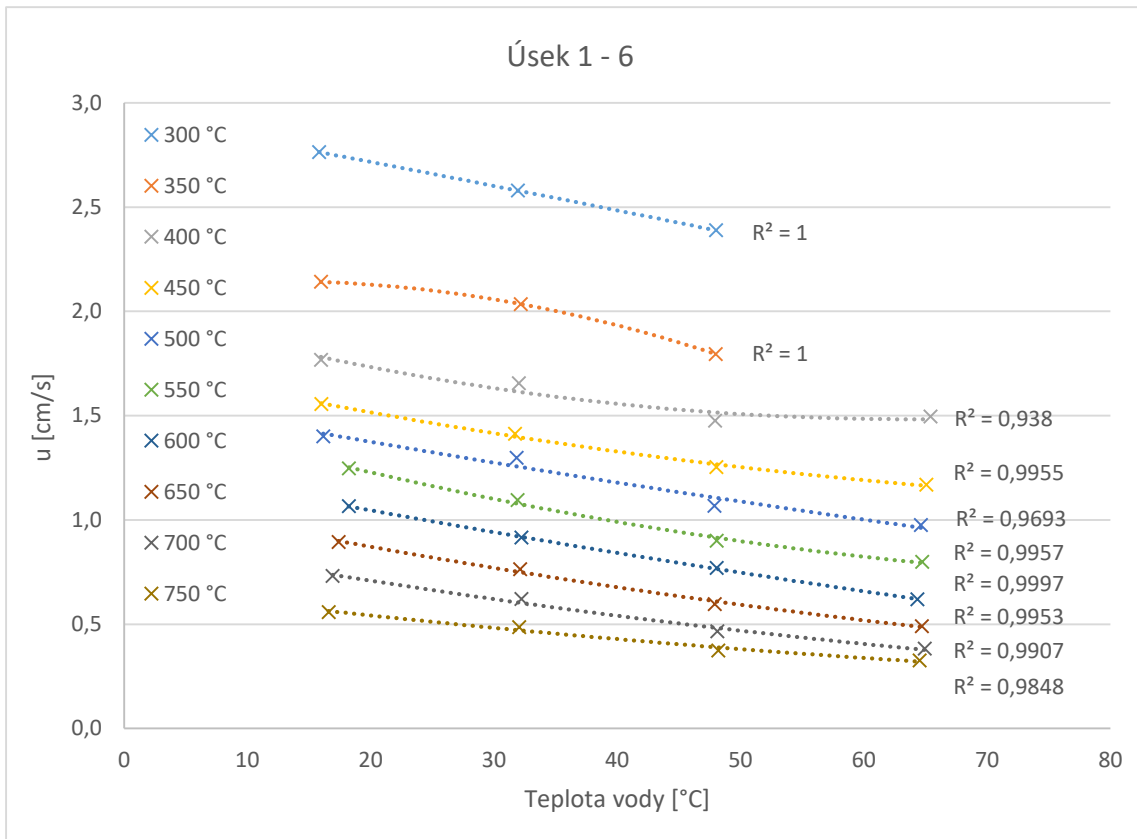
Obrázek 48 - Závislost rychlosti na počáteční teplotě testovací sekce na úseku 1 – 7



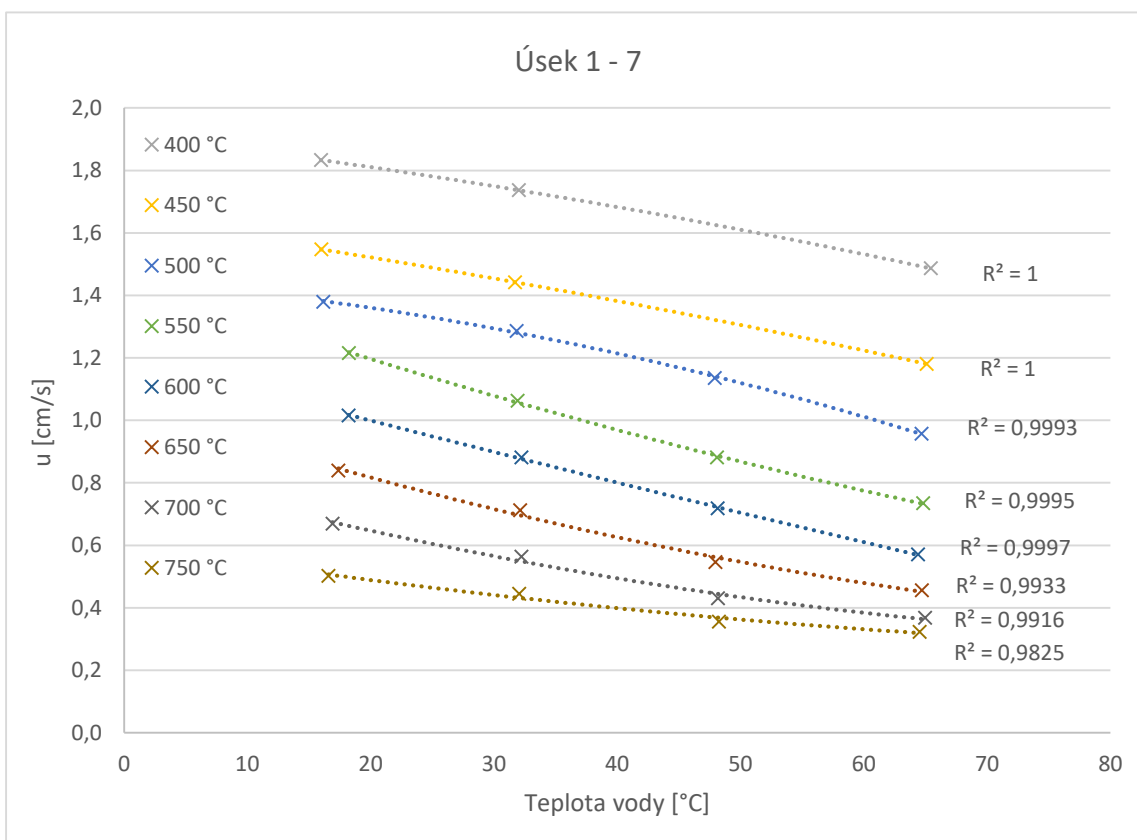
Obrázek 49 - Závislost rychlosti na počáteční teplotě testovací sekce na úseku 2 – 6



Obrázek 50 – Závislost rychlosti na teplotě chladící vody na úseku 1 - 5



Obrázek 51 – Závislost rychlosti na teplotě chladící vody na úseku 1 - 6



Obrázek 52 – Závislost rychlosti na teplotě chladící vody na úseku 1 - 7

4.2.5 Relativní rychlost chladicí fronty

Relativní rychlosti byly počítány na delších úsecích testovací sekce. Konkrétně na úsecích 1 – 7 a 1 – 6, tedy na délkách trubky 1196 mm, respektive 993 mm. Hodnoty relativních rychlostí pro jednotlivé úseky byly vypočteny dle vztahu (16) a rychlosti na delších úsecích potom analogickou úpravou vztahu (21):

$$u'_{16} = \frac{u'_{12}l_{12} + u'_{23}l_{23} + u'_{34}l_{34} + u'_{45}l_{45} + u'_{56}l_{56}}{l_{12} + l_{23} + l_{34} + l_{45} + l_{56}} \quad (22)$$

Výsledné hodnoty pro všechny použité teploty chladicí vody jsou uvedeny v tabulkách 17 až 20.

Úsek	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
1 -- 7	x	x	0,34	0,28	0,25	0,22	0,18	0,15	0,13	0,10
1 -- 6	0,50	0,41	0,34	0,28	0,25	0,22	0,19	0,16	0,14	0,11

Tabulka 17 – Relativní rychlost chladicí fronty při $t_v = 17 \text{ °C}$

Úsek	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
1 -- 7	x	x	0,34	0,29	0,23	0,20	0,17	0,13	0,10	0,08
1 -- 6	0,50	0,40	0,33	0,28	0,23	0,20	0,17	0,14	0,11	0,09

Tabulka 18 – Relativní rychlost chladicí fronty při $t_v = 33 \text{ °C}$

Úsek	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
1 -- 7	x	x	x	x	0,21	0,17	0,14	0,10	0,08	0,07
1 -- 6	0,46	0,34	0,28	0,24	0,20	0,17	0,14	0,11	0,09	0,07

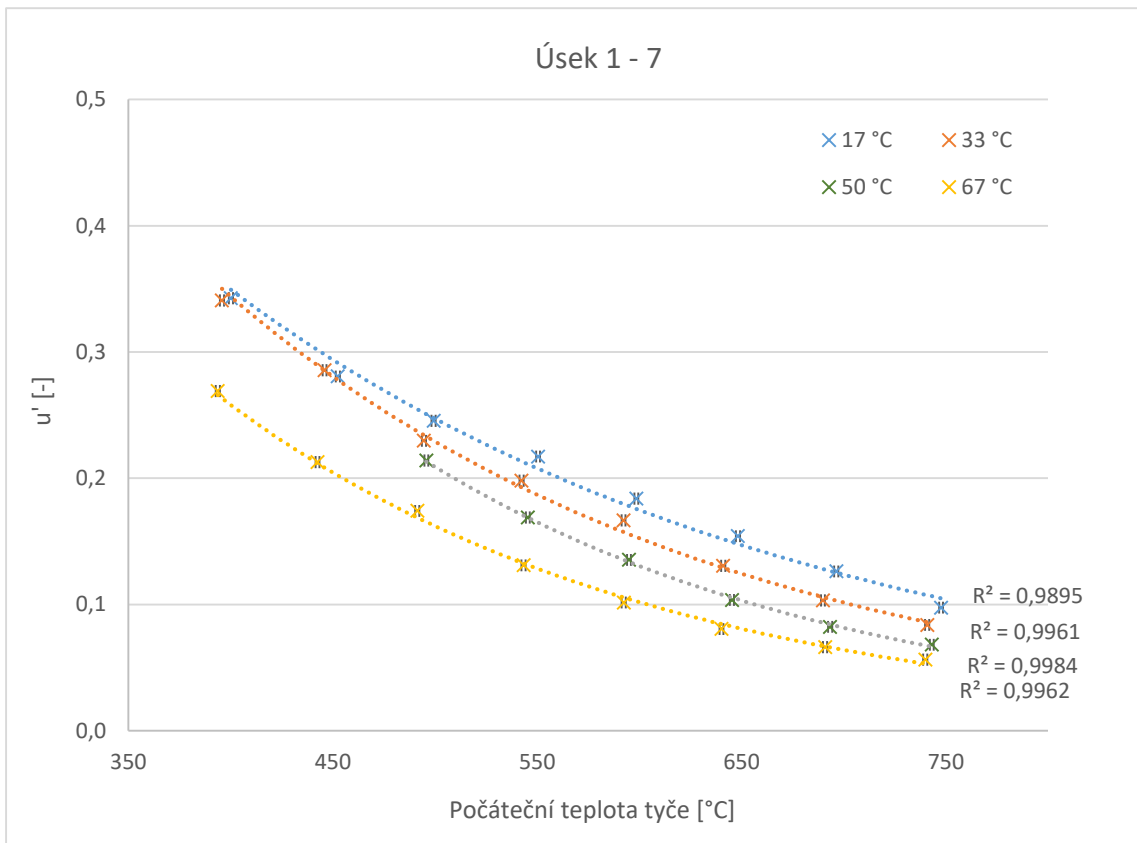
Tabulka 19 – Relativní rychlost chladicí fronty při $t_v = 50 \text{ °C}$

Úsek	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
1 -- 7	x	x	0,27	0,21	0,17	0,13	0,10	0,08	0,07	0,06
1 -- 6	x	x	0,26	0,21	0,18	0,14	0,11	0,09	0,07	0,06

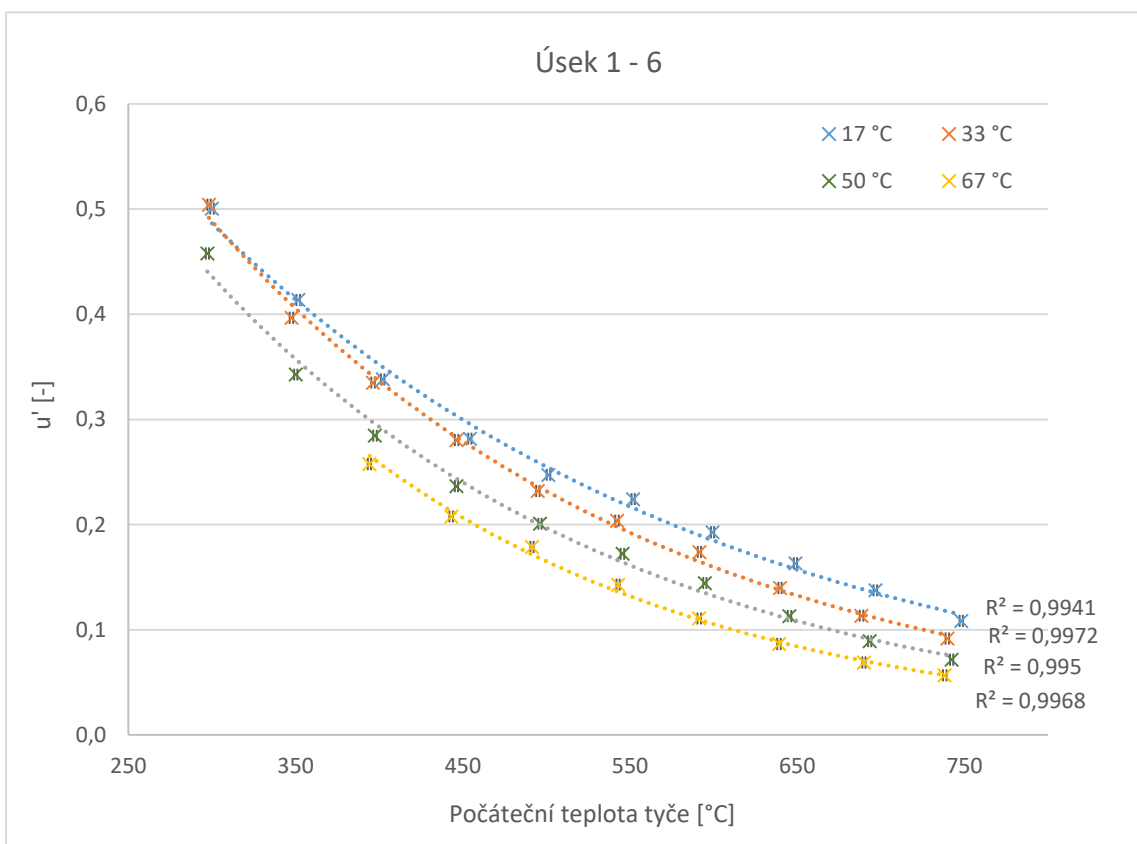
Tabulka 20 – Relativní rychlost chladicí fronty při $t_v = 67 \text{ °C}$

Na obrázcích 53 a 54 jsou znázorněny závislosti relativních rychlostí na počáteční teplotě nahřátí testovací sekce. Na obrázcích 55 a 56 jsou závislosti relativních rychlostí na teplotě chladicí vody. Na vodorovné ose jsou vynášeny průměrné hodnoty počátečních teplot všech termočlánků, které byly při výpočtu uvažovány, respektive průměrné teploty vody v průběhu experimentu.

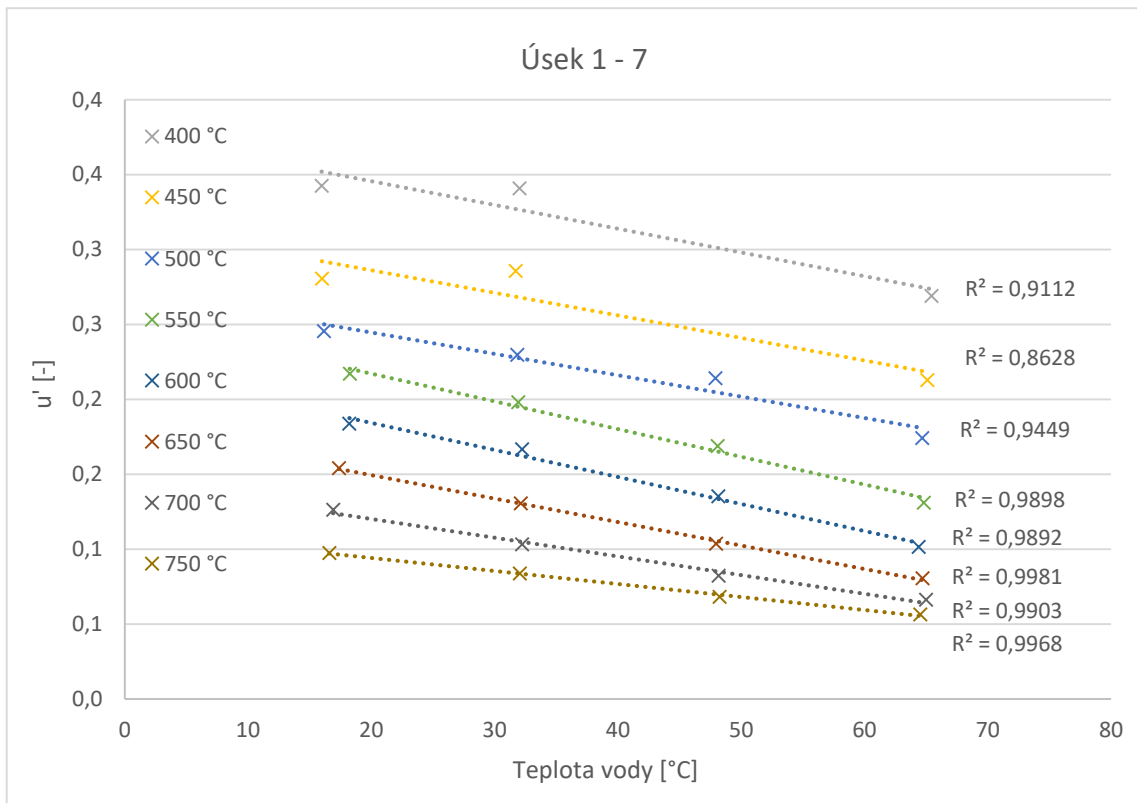
Data jsou proložena exponenciálními (obrázky 53 a 54) a lineárními (obrázky 55 a 56) funkcemi, jejichž hodnota spolehlivosti je uvedena u příslušných křivek.



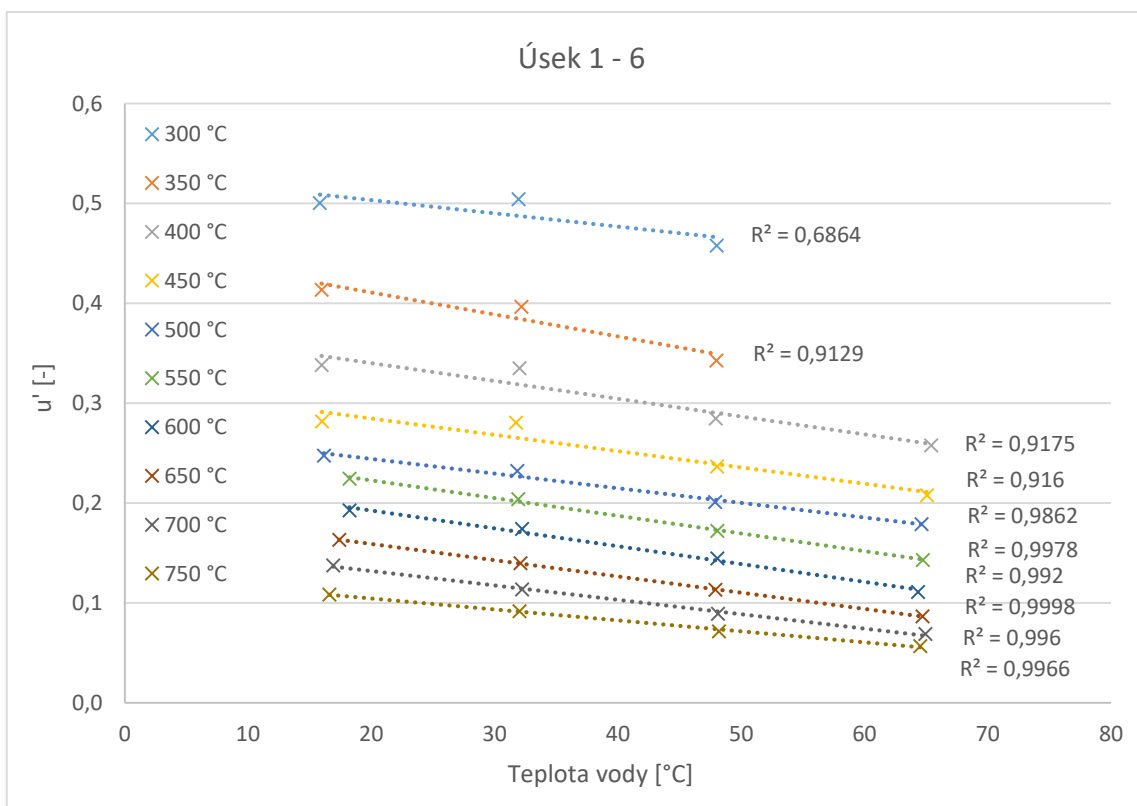
Obrázek 53 – Závislost relativní rychlosti na počáteční teplotě trubky na úseku 1 - 7



Obrázek 54 – Závislost relativní rychlosti na počáteční teplotě trubky na úseku 1 - 6



Obrázek 55 – Závislost relativní rychlosti na teplotě chladicí vody na úseku 1 – 7



Obrázek 56 – Závislost relativní rychlosti na teplotě chladicí vody na úseku 1 – 6

4.3 Výsledné hodnoty teplot prudkého ochlazování

Teploty prudkého ochlazování označují okamžik, kdy dochází ke znovuzaplavení části testovací sekce u příslušného termočlánku, tedy opětovnému kontaktu vody a horkého povrchu. V tu chvíli se výrazně zlepší vlastnosti přestupu tepla mezi stěnou trubky a chladičem a teplota na daném termočlánku začíná prudce klesat.

Detekované teploty prudkého ochlazování jsou uvedeny v tabulkách 21 až 24.

	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
TČ 1	316,8	366,9	412,4	459,6	517,2	460,9	537,1	563,3	605,5	626,5
TČ 2	287,9	339,7	365,7	405,5	424,2	455,5	491,3	502,8	516,0	531,4
TČ 3	253,8	318,8	356,6	393,2	425,4	452,9	470,4	477,0	491,0	498,6
TČ 4	245,2	293,8	338,5	366,0	390,6	428,1	445,8	433,9	444,5	447,9
TČ 5	229,2	262,9	324,3	361,9	391,0	427,5	438,5	434,8	439,0	485,5
TČ 6	229,1	276,3	317,0	356,3	382,4	404,7	426,0	421,4	457,5	495,9
TČ 7	246,3	288,9	323,5	349,4	368,9	385,8	405,9	426,9	469,0	488,6

Tabulka 21 – Teploty prudkého ochlazování při $t_v = 17\text{ °C}$

	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
TČ 1	279,7	325,2	375,4	440,2	488,6	489,4	465,4	588,8	464,4	500,7
TČ 2	283,2	319,7	370,9	382,1	413,4	438,2	447,9	467,1	479,9	489,9
TČ 3	279,3	316,8	345,2	374,0	414,6	434,3	455,4	465,1	470,9	483,3
TČ 4	253,5	295,2	325,6	348,9	369,2	396,3	420,4	421,7	436,5	479,7
TČ 5	226,3	261,8	299,9	335,2	375,3	397,5	420,6	423,6	460,5	497,8
TČ 6	229,8	267,4	301,2	338,9	360,5	378,2	407,2	440,4	480,7	485,1
TČ 7	x	286,8	309,3	340,2	360,6	370,3	389,9	440,3	462,0	491,5

Tabulka 22 – Teploty prudkého ochlazování při $t_v = 33\text{ °C}$

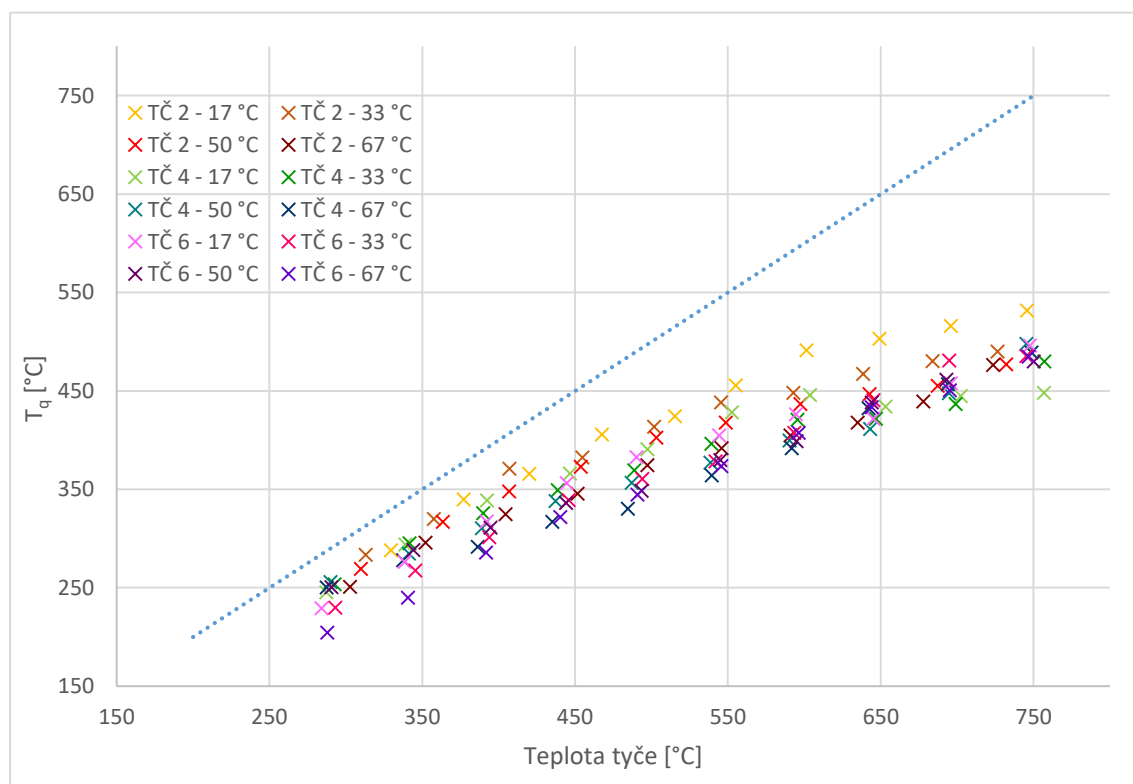
	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
TČ 1	290,5	345,2	396,9	428,4	448,6	534,5	594,9	609,6	525,1	660,1
TČ 2	269,1	317,0	347,9	372,7	402,4	417,5	436,4	446,5	455,2	477,0
TČ 3	264,7	309,0	341,7	370,2	387,7	408,3	436,8	445,6	475,0	507,5
TČ 4	255,6	284,8	310,3	337,9	356,4	376,9	399,3	411,2	447,6	497,6
TČ 5	253,6	285,3	305,0	336,7	346,4	365,3	404,5	427,7	477,6	501,6
TČ 6	250,4	288,1	311,0	336,1	348,4	379,4	398,7	438,0	461,2	479,8
TČ 7	247,8	306,4	330,8	352,8	371,0	375,6	408,6	435,9	455,6	476,1

Tabulka 23 – Teploty prudkého ochlazování při $t_v = 50\text{ °C}$

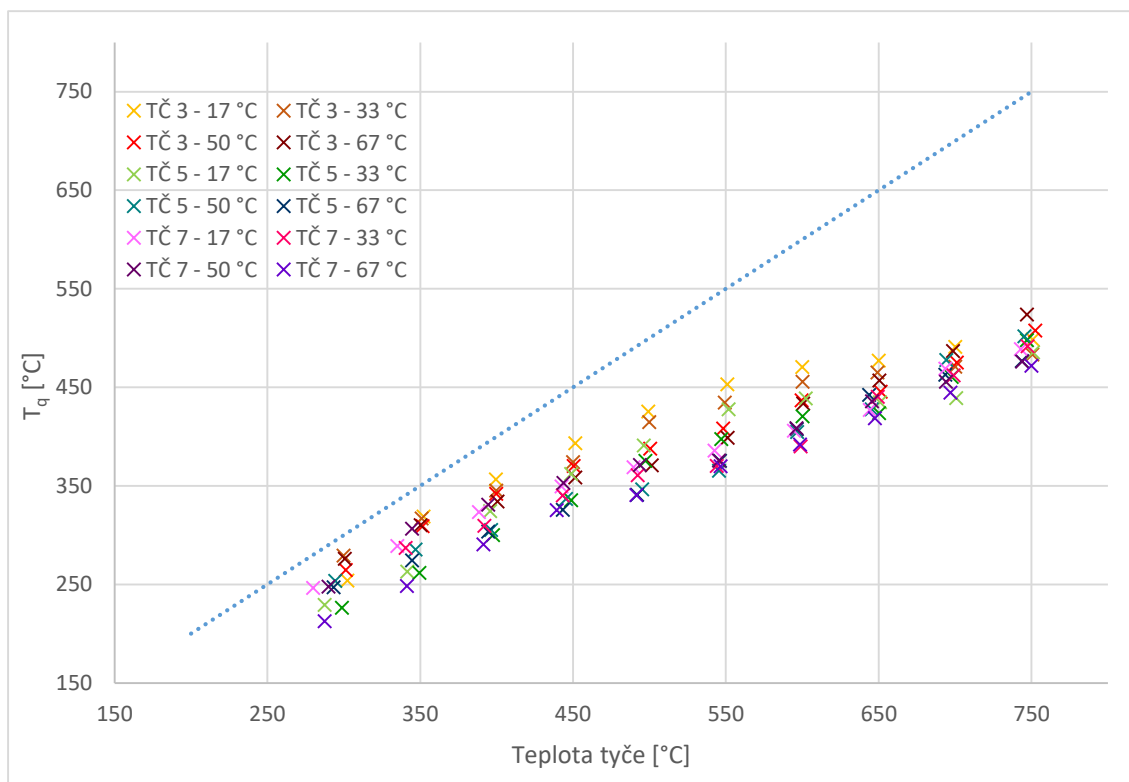
	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
TČ 1	278,7	340,4	391,0	381,9	353,3	434,3	424,2	435,5	543,8	508,0
TČ 2	250,6	295,6	324,7	345,5	374,5	391,8	404,7	417,7	439,0	476,3
TČ 3	275,9	310,1	334,2	358,5	370,7	398,6	433,6	456,9	486,6	523,8
TČ 4	250,2	277,8	291,4	316,7	330,0	363,9	391,7	432,3	456,8	489,0
TČ 5	246,9	274,2	303,6	325,6	341,0	375,4	407,6	442,2	462,8	476,6
TČ 6	204,2	239,8	285,7	321,7	344,5	373,6	407,1	433,3	450,4	484,6
TČ 7	212,7	248,2	290,5	325,1	340,6	369,8	391,8	418,7	444,6	471,7

Tabulka 24 – Teploty prudkého ochlazování při $t_v = 67\text{ °C}$

Na obrázcích 57 a 58 jsou znázorněny teploty prudkého ochlazování jednotlivých termočlánků v závislosti na počáteční teplotě testovací sekce t_t . Na vodorovné ose jsou vyneseny zpřesněné hodnoty teplot a pro porovnání je v grafu vykreslena přímka $t_q = t_t$. Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, vertikální kanál je v průběhu zaplávání ochlazován stoupající parovodní směsí, což má za následek snižování teploty prudkého ochlazování. Tento efekt je výraznější s rostoucí počáteční teplotou trubky, hodnoty v pravé části grafu se tedy od přímky $t_q = t_t$ odchylují více než hodnoty v levé části. Zároveň pozorujeme, že termočlánky na začátku testovací sekce se smáčejí při vyšších teplotách povrchu než termočlánky u horního konce.



Obrázek 57 – Detekované teploty prudkého ochlazování u TČ 2, TČ 4 a TČ 6



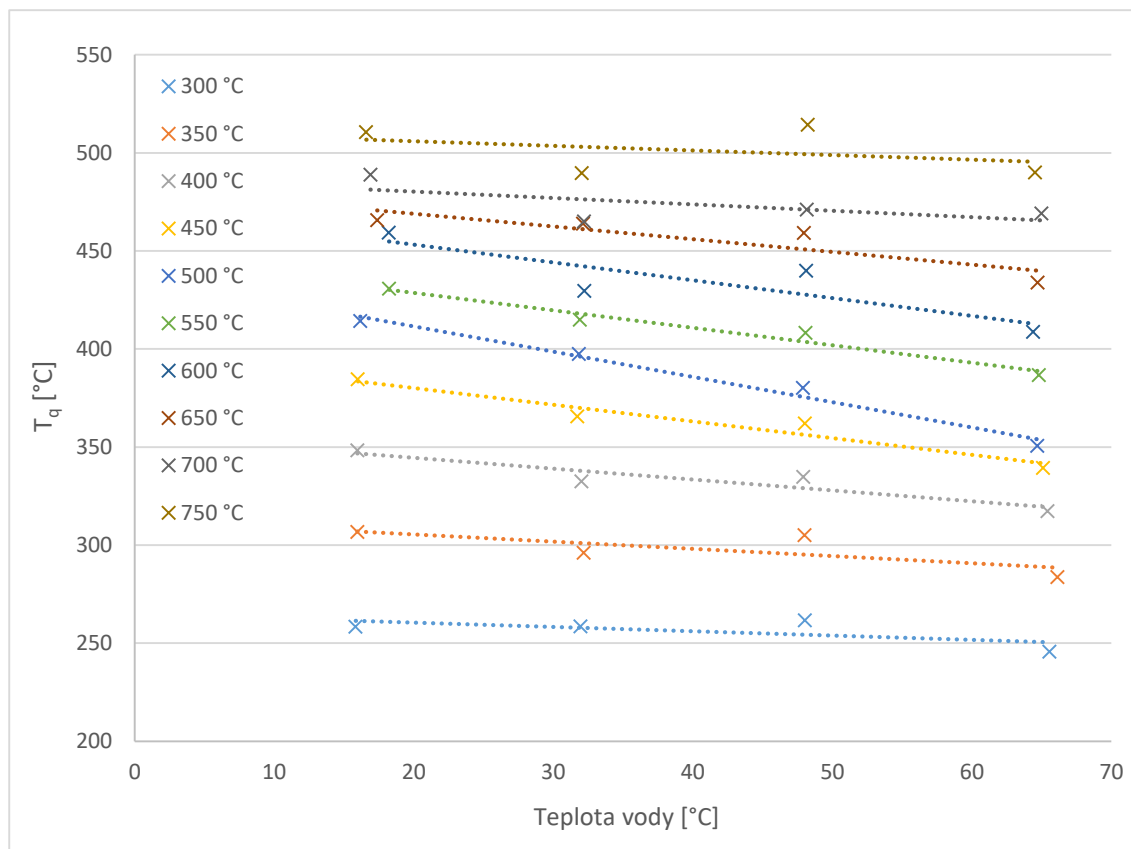
Obrázek 58 – Detekované teploty prudkého ochlazování u TČ 3, TČ 5 a TČ 7

Závislost teplot prudkého ochlazování na teplotě chladicí vody není z naměřených dat na první pohled zřejmá. Proto byla vypočtena průměrná teplota z detekovaných teplot na všech termočláncích a byla vykreslena závislost na teplotě chladicí vody pro všechny použité počáteční teploty nahřátí testovací sekce. Ty jsou uvedeny v tabulce 25 a na obrázku 59.

Na výsledných závislostech můžeme vidět, že s rostoucí teplotou chladiva mírně klesají teploty prudkého ochlazování, a to při všech počátečních teplotách povrchu. To může být způsobeno tím, že chladicí fronta postupuje při vyšších teplotách vody pomaleji, čímž dochází k výraznějšímu předchlazení horkého povrchu před jeho zaplavením.

Teplota vody [°C]	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
17	258,3	306,8	348,3	384,5	414,2	430,8	459,3	465,8	488,9	510,6
33	258,6	296,1	332,5	365,6	397,5	414,9	429,6	463,8	465,0	489,7
50	261,7	305,1	334,8	362,1	380,1	408,2	439,9	459,2	471,0	514,2
67	245,6	283,7	317,3	339,3	350,7	386,8	408,7	433,8	469,1	490,0

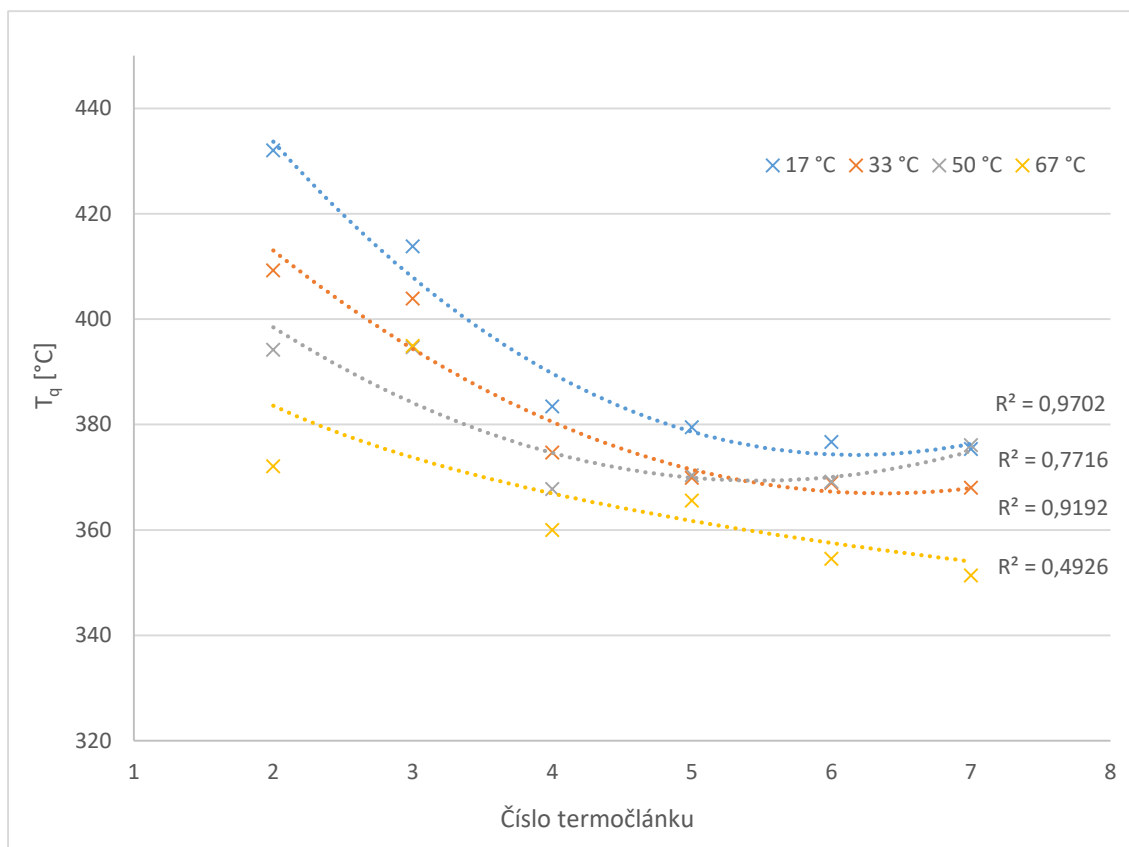
Tabulka 25 – Průměrné teploty prudkého ochlazování v závislosti na teplotě chladicí vody



Obrázek 59 – Závislost průměrných teplot prudkého ochlazování na teplotě chladiva

Termočlánky na začátku testovací sekce jsou zaplavovány dříve, než se povrch stihne výrazněji předchladit stoupající párou. Proto pozorujeme vyšší teploty prudkého ochlazování právě u těchto termočlánků. Pro grafické znázornění této závislosti byly vypočteny průměrné hodnoty teplot zaplavení pro jednotlivé termočlánky napříč všemi provedenými měřeními.

Výsledky vykazují značný rozptyl hodnot, jelikož se průměrují data z měření o různých počátečních teplotách nahřátí trubky. I přesto však pozorujeme klesající závislost teplot zaplavení na vzdálenosti od počátku testovací sekce. Pokles je nejvýraznější u termočlánků na spodní části trubky, termočlánky 5 až 7 vykazují již téměř konstantní hodnoty teplot. Tato závislost je znázorněna na obrázku 60, přičemž naměřené hodnoty jsou proloženy polynomy druhého řádu.



Obrázek 60 – Závislost teplot prudkého ochlazování na čísle termočláňku

4.3.1 Bezrozměrné teploty prudkého ochlazování

Pro lepší porovnání výsledků se v literatuře pro teplotu smočení horkého povrchu často používá bezrozměrná teplota. Ta je definována pomocí vztahu:

$$T' = \frac{T_q - T_{sat}}{T_t - T_{sat}} \quad (23)$$

kde T_q jsou vypočtené hodnoty teplot prudkého ochlazování, T_t je počáteční teplota nahřátí stěny a T_{sat} je teplota sytosti vodní páry při daném tlaku. Experiment byl prováděn při atmosférickém tlaku, uvažována byla tedy teplota sytosti $T_{sat} = 100$ °C.

Výsledné hodnoty bezrozměrných teplot pro různé teploty chladící vody jsou uvedené v tabulkách 26 až 29. Z těchto dat byly následně vykresleny závislosti teploty smočení na teplotě chladící vody a teplotě nahřátí testovací sekce a průběh teploty smočení po výšce experimentálního kanálu. Tyto závislosti jsou znázorněny na obrázcích 61 až 64. Data jsou proložena polynomickými funkcemi druhého či třetího řádu a lineárními funkcemi v případě závislosti na teplotě vody. Pro lepší přehlednost jsou u závislosti na teplotě testovací sekce zobrazena pouze data pro TČ 3 a TČ 5 (obrázek 63), respektive TČ 6 a TČ 7 (obrázek 64).

	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
TČ 1	1,07	1,04	1,00	0,97	1,03	0,80	0,90	0,86	0,88	0,84
TČ 2	0,82	0,86	0,83	0,83	0,78	0,78	0,78	0,73	0,70	0,67
TČ 3	0,76	0,87	0,86	0,83	0,81	0,78	0,74	0,69	0,65	0,61
TČ 4	0,78	0,81	0,82	0,77	0,73	0,72	0,69	0,60	0,57	0,53
TČ 5	0,69	0,67	0,76	0,75	0,73	0,73	0,67	0,61	0,56	0,59
TČ 6	0,70	0,74	0,74	0,74	0,72	0,69	0,66	0,59	0,60	0,61
TČ 7	0,81	0,80	0,78	0,73	0,69	0,65	0,62	0,60	0,62	0,60

Tabulka 26 – Bezrozměrné teploty prudkého ochlazování při $t_v = 17$ °C

	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
TČ 1	1,00	0,98	0,98	1,02	1,02	0,93	0,82	1,01	0,69	0,68
TČ 2	0,86	0,85	0,88	0,80	0,78	0,76	0,71	0,68	0,65	0,62
TČ 3	0,90	0,86	0,82	0,78	0,79	0,74	0,71	0,66	0,62	0,59
TČ 4	0,80	0,81	0,78	0,73	0,69	0,67	0,65	0,59	0,56	0,58
TČ 5	0,64	0,65	0,67	0,67	0,69	0,67	0,64	0,59	0,60	0,61
TČ 6	0,67	0,68	0,68	0,69	0,66	0,63	0,62	0,62	0,64	0,60
TČ 7	x	0,78	0,72	0,70	0,66	0,61	0,58	0,62	0,60	0,60

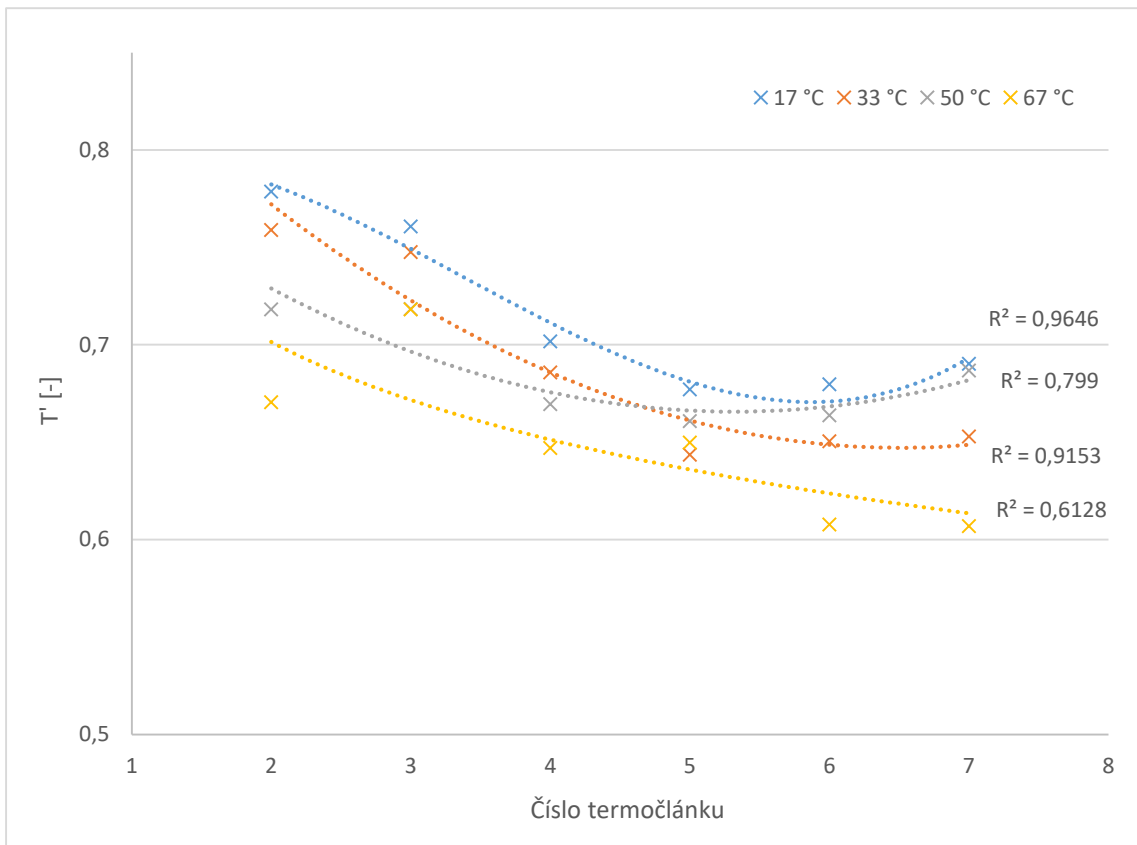
Tabulka 27 – Bezrozměrné teploty prudkého ochlazování při $t_v = 33$ °C

	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
TČ 1	1,00	0,98	1,00	0,96	0,88	0,97	1,02	0,94	0,73	0,90
TČ 2	0,81	0,82	0,81	0,77	0,75	0,71	0,68	0,64	0,60	0,60
TČ 3	0,82	0,83	0,81	0,77	0,72	0,69	0,67	0,63	0,62	0,62
TČ 4	0,82	0,77	0,73	0,71	0,66	0,63	0,61	0,57	0,58	0,62
TČ 5	0,79	0,75	0,69	0,69	0,62	0,60	0,61	0,60	0,64	0,62
TČ 6	0,79	0,77	0,72	0,69	0,63	0,63	0,60	0,62	0,61	0,58
TČ 7	0,78	0,84	0,78	0,74	0,69	0,62	0,62	0,62	0,60	0,58

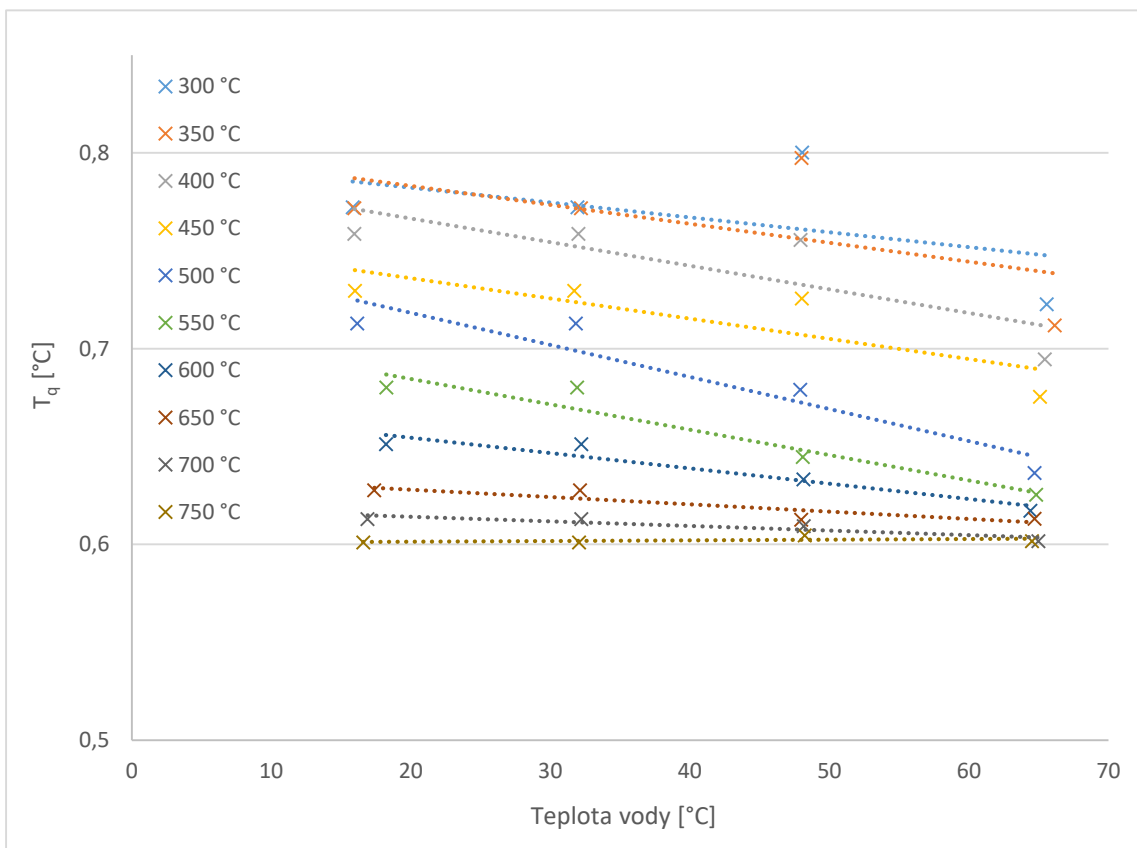
Tabulka 28 – Bezrozměrné teploty prudkého ochlazování při $t_v = 50$ °C

	Počáteční teplota testovací sekce [°C]									
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
TČ 1	0,97	1,03	1,05	0,86	0,68	0,80	0,71	0,66	0,77	0,67
TČ 2	0,74	0,78	0,74	0,70	0,69	0,65	0,62	0,59	0,59	0,60
TČ 3	0,88	0,84	0,78	0,74	0,67	0,66	0,67	0,65	0,65	0,66
TČ 4	0,80	0,75	0,67	0,65	0,60	0,60	0,59	0,61	0,60	0,60
TČ 5	0,76	0,71	0,69	0,66	0,62	0,62	0,62	0,63	0,61	0,59
TČ 6	0,55	0,58	0,64	0,65	0,63	0,61	0,62	0,61	0,59	0,59
TČ 7	0,60	0,61	0,65	0,66	0,61	0,60	0,59	0,58	0,58	0,57

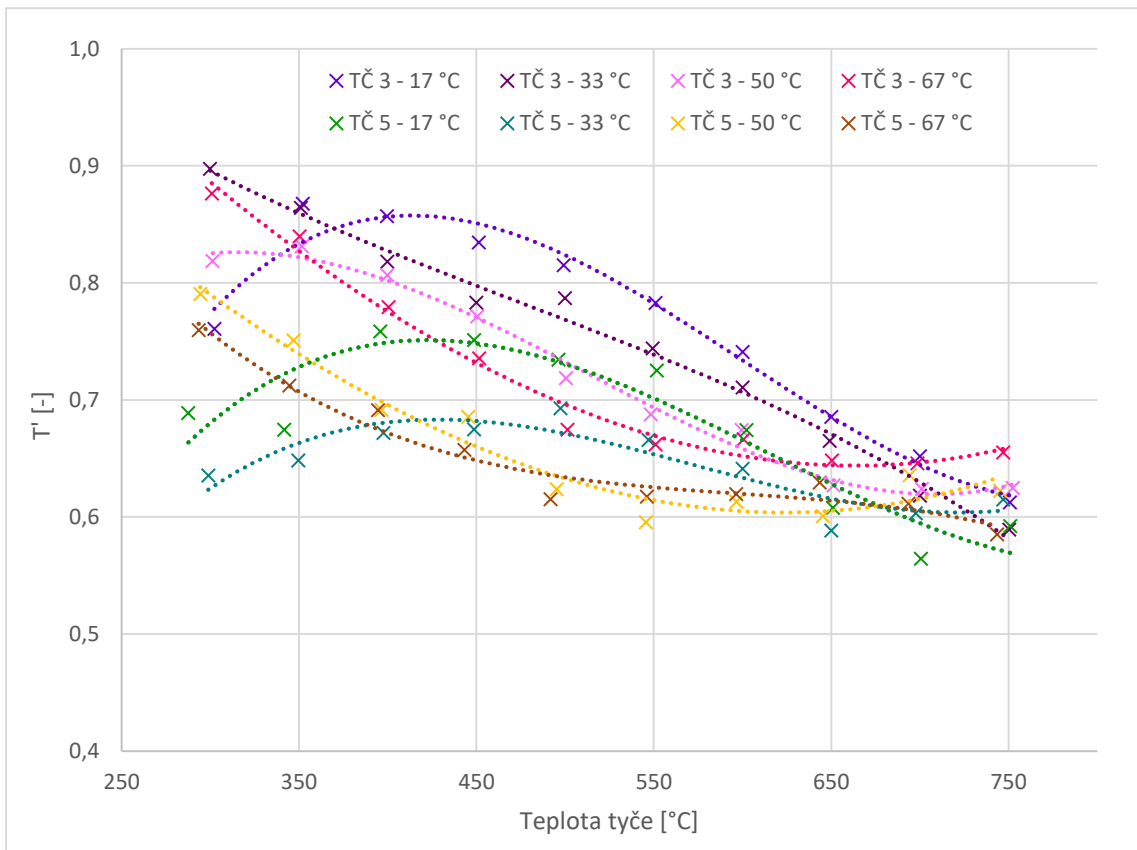
Tabulka 29 – Bezrozměrné teploty prudkého ochlazování při $t_v = 67$ °C



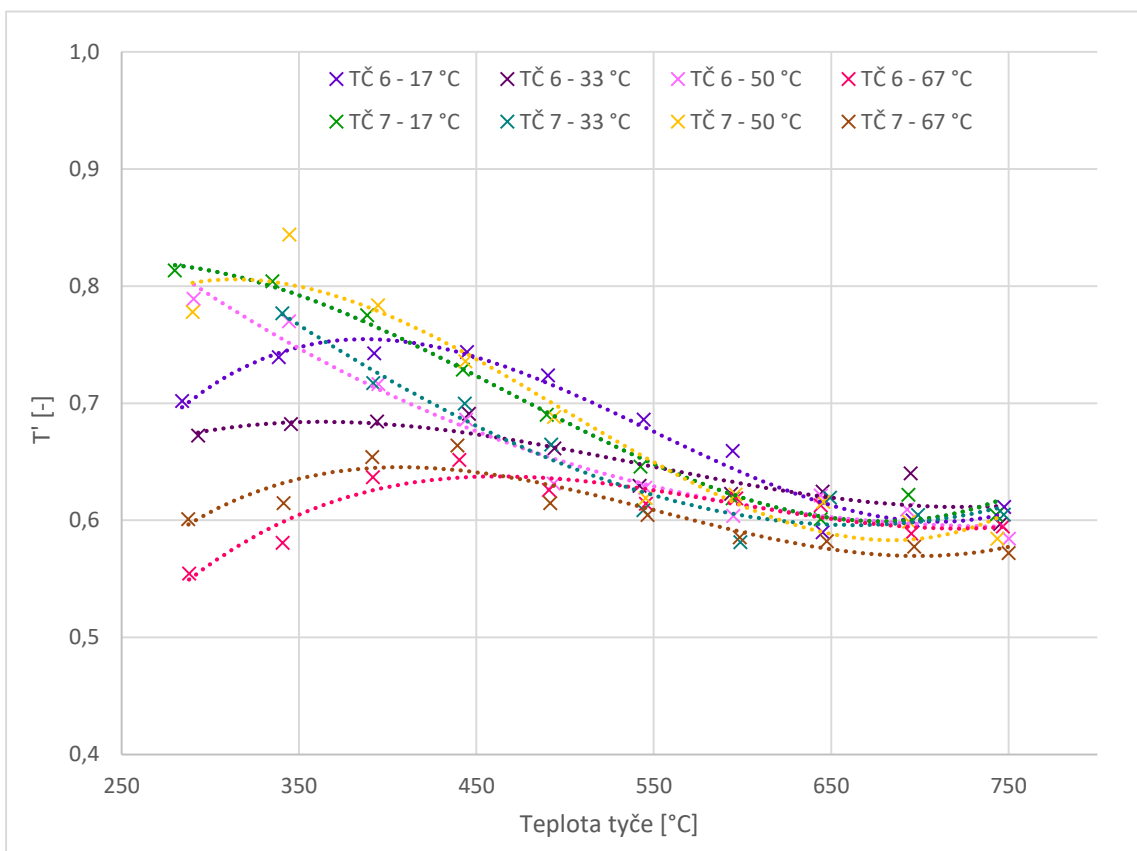
Obrázek 61 – Závislost bezrozměrných teplot smočení na čísle termočlánku



Obrázek 62 – Závislost bezrozměrných teplot smočení na teplotě chladicí vody



Obrázek 63 – Závislost bezrozměrných teplot smočení TČ 3 a TČ 5 na teplotě trubky



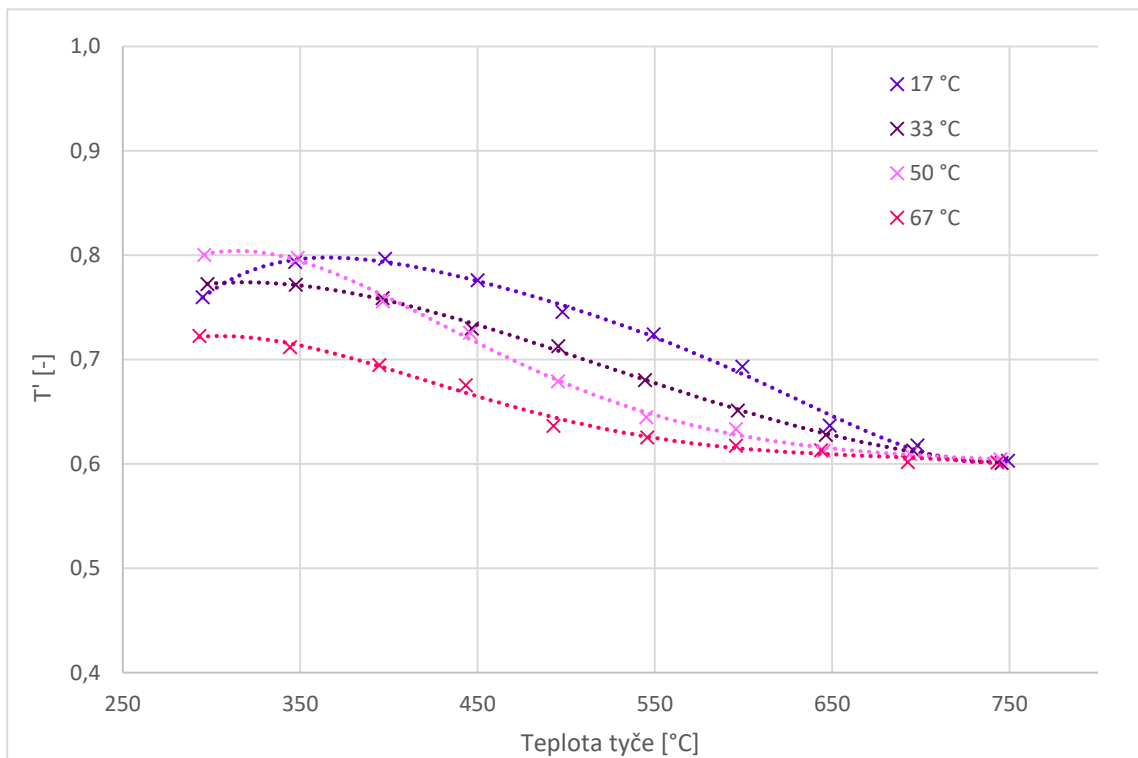
Obrázek 64 – Závislost bezrozměrných teplot smočení TČ 6 a TČ 7 na teplotě trubky

Bezrozměrná teplota prudkého ochlazování poskytuje informaci o tom, v kolika procentech rozsahu mezi teplotou sytosti a počáteční teplotou nahřátí trubky dojde ke smočení povrchu na příslušném místě testovací sekce.

Závislosti bezrozměrné teploty na číse termočlánku (obrázek 61) a na teplotě chladicí vody (obrázek 62) jsou podobné závislostem absolutních teplot prudkého ochlazování (obrázky 59 a 60). V obou případech je průběh teplot mírně klesající.

Při nízkých hodnotách průtoku a vysokých počátečních teplotách povrchu lze pozorovat typické chování teploty prudkého ochlazování, kdy nad určitou limitní teplotou již povrch nemůže být smočen a zaplavování je zpomalováno, dokud teplota trubky neklesne pod tuto limitní hodnotu. V tu chvíli dojde ke kolapsu izolující parní vrstvy a povrch je smočen chladícím médiem. [10]

Tento jev má za následek, že při nižších počátečních teplotách dojde ke smočení v podstatě ve chvíli, kdy na dané místo dorazí chladící fronta, zatímco při vyšších teplotách je postup chladící fronty striktně podmíněn kolapsem parního filmu. Díky tomu, lze s rostoucí teplotou nahřátí povrchu pozorovat postupné ustálení bezrozměrných teplot na jedné konkrétní hodnotě, jak je znázorněno na obrázcích 63 a 64. Stejné ustálení teploty pozorujeme i v případě, že uvažujeme průměrnou hodnotu bezrozměrné teploty ze všech termočlánků (obrázek 65).



Obrázek 65 – Závislost průměrné bezrozměrné teploty na počáteční teplotě trubky

5 Závěr

Tato experimentální práce byla zaměřena na problematiku spojenou s prudkým ochlazováním horkých povrchů. V teoretické části práce byly popsány principy přestupu tepla a jejich uplatnění v jaderném reaktoru. Dále se práce věnovala režimům proudění a s nimi souvisejícím krizím přestupu tepla. Tyto jevy mají významný vliv na bezpečnost celého jaderného zařízení, zejména při extrémních situacích jako jsou velké LOCA havárie. Právě při těchto haváriích, konkrétně při znovu zaplavování obnažené aktivní zóny, dochází k využití prudkého ochlazování, a proto je nutné klást důraz na zkoumání fyzikálních jevů spojených s touto problematikou.

Za tímto účelem byl proveden návrh a modifikace experimentálního zařízení pro studium spodního zaplavování aktivní zóny reaktoru, které je navrženo tak, aby co nejlépe odpovídalo situacím u současně provozovaných reaktorů. Zmíněná modifikace zahrnovala instalaci topného tělesa pro ohřev vody, upevnění termočlánků pro měření teploty povrchu a vody a další úpravy, které zajistily zefektivnění měřicího postupu a zpřesnění výsledných hodnot.

Na experimentálním zařízení bylo provedeno více než 120 měření. Během měření byly sledovány teploty povrchu, vody a dalších pomocných veličin, pomocí kterých byly následně výpočetním skriptem určeny důležité teplotní body a rychlosti chladicí fronty.

Hlavním cílem práce bylo vyhodnotit rychlosti chladicí fronty a jejich závislosti na počátečních parametrech s důrazem na vliv teploty chladiva vstupujícího do testovací sekce. U rychlostí na jednotlivých úsecích testovací sekce byl diskutován vliv předchlazení vertikálního kanálu stoupající párou a vliv nutnosti odebrat teplo dodávané již zaplavenou částí kanálu. Závislosti rychlosti chladicí fronty na počáteční teplotě nahřátí povrchu a na teplotě chladicí vody byly zkoumány jak pro jednotlivé úseky, tak na celé délce testovací sekce. Bylo zjištěno, že s rostoucí počáteční teplotou povrchu rychlost klesá exponenciálně. S rostoucí teplotou chladiva rychlost postupu chladicí fronty dle očekávání klesá, přičemž trend je v podstatě lineární. Tento pokles odpovídá teplu, které je potřeba dodat pro ohřev na teplotu sytosti na čele fronty a zdá se tedy, že k žádným složitějším hydrodynamickým jevům souvisejícím s přestupem tepla při vyšších teplotách chladiva nedochází.

Pro lepší porovnání s dalšími experimentálními pracemi, které mohou být prováděny s odlišnými počátečními podmínkami, byla rovněž určena relativní rychlost postupu chladicí fronty. Ta byla vyhodnocována na úsecích o délkách přibližně 1 m a 1,2 m a výsledné závislosti odpovídají trendům absolutních rychlostí.

V neposlední řadě byly analyzovány teploty prudkého ochlazování, tedy teploty, při kterých dojde k opětovnému smočení povrchu na daném místě testovací sekce. Výsledné hodnoty ukázaly, že s rostoucí počáteční teplotou povrchu se teploty prudkého ochlazování více odchyľují od přímky $t_q = t_t$, což je způsobeno zvýrazněním efektu předchlazování. Zároveň termočlánky na začátku testovací sekce jsou smáčeny při vyšších teplotách než termočlánky nad nimi. V souvislosti s teplotou prudkého ochlazování byla také definována bezrozměrná teplota, pomocí níž byl ilustrován fakt, že existuje určitá limitní teplota smočení.

V návaznosti na tuto práci se nabízí provedení měření s více teplotními hladinami chladicí vody pro zjištění přesnější závislosti rychlosti postupu chladicí fronty na této teplotě. Při dalším navyšování počáteční teploty povrchu můžou být zkoumány situace, kdy se chladicí fronta ustálí na určité hladině a nedojde tak k zaplavení celého vertikálního kanálu. Výsledky této práce mohou být také dále použity jako vstupní data pro CFD modely.

Seznam použité literatury

- [1] ŠESTÁK, Jiří a František RIEGER. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Vyd. 2. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1715-X.
- [2] CHHABRA, R. P. a V. SHANKAR. *Coulson and Richardson's Chemical Engineering, Volume 1B - Heat and Mass Transfer - Fundamentals and Applications* [online]. 7th Edition. Elsevier, 2018 [cit. 2023-08-30].
Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=5162998>
- [3] CENGEL, Yunus A. a Afshin J. GHAJAR. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & applications*. 5th Edition. McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-339818-1.
- [4] DOLEŽAL, Jaroslav. *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [5] TONG, L. S. a Joel WEISMAN. *Thermal analysis of pressurized water reactors*. 3rd ed. La Grange Park, Ill.: American Nuclear Society, 1996. ISBN 0894480383.
- [6] HEŘMANSKÝ, Bedřich. *Termomechanika jaderných reaktorů: vysokoškolská učebnice pro vysoké školy technické, studijní obor 39-39-8 Jaderné inženýrství*. Praha: Academia, 1986.
- [7] ZÁCHA, Pavel. *Dvoufázové proudění* [online]. [cit. 2023-09-01]. Dostupné z: https://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/2014-ZS_3c-prestup-tepla-dvoufazove-proudeni.pdf
- [8] FAGHRI, Amir a Yuwen ZHENG. *Transport Phenomena in Multiphase Systems*. Academic Press, 2006. ISBN 9780123706102.
- [9] NUKIYAMA, Shiro. The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1966, **9**(12), 1419-1433. ISSN 0017-9310.
- [10] ŠTĚPÁNEK, Jan. *Dynamics of Heat Transfer During Cooling of Overheated Surfaces*. Disertační práce. Praha: ČVUT, 2018
- [11] KATOVSKÝ, Karel. *Experimentální smyčka pro studium krize varu na povrchu proutků jaderného paliva* [online]. [cit. 2023-09-05]. Dostupné z: <https://allforpower.cz/jaderna-energetika/experimentalni-smycka-pro-studium-krize-varu-na-povrchu-proutku-jaderneho-paliva-323>

- [12] JEON, Byong Guk, Moon Hee CHOI, Dong Hoon KAM, Young Jung YOUN a Sang-Ki MOON. Observation of departure from nucleate boiling under flow using optical visualization and IR thermometry. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022, **185**(122417). ISSN 0017-9310.
- [13] ZIPFEL, Theodor a Vladimír LIBICH. *Příspěvek k problematice krize varu při nuceném proudění parovodní směsi ve vodorovných trubkách*. Brno: Výzkumný ústav Závodů energetického strojírenství, 1979.
- [14] *Westinghouse Technology Systems Manual, Section 2.2, Power Distribution Limits* [online]. [cit. 2023-09-11]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1122/ML11223A208.pdf>
- [15] BEDNÁŘ, Michal. *Krize varu v jaderných reaktorech*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [16] TODREAS, Neil E. a KAZIMI, Mujid S. *NUCLEAR SYSTEMS I Thermal Hydraulic Fundamentals*. 2nd Edition. USA: Taylor & Francis, 2011. ISBN 9781439808870.
- [17] TOURAN, Nick. *What is afterglow/decay heat?* [online]. [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://whatisnuclear.com/decay-heat.html>.
- [18] HEŘMANSKÝ, Bedřich. *Těžké havárie JE I.: Fenomenologie a analýzy*. Praha, 2011.
- [19] XIONG, Qingwen; GOU, Junli a SHAN, Jianqiang. *Parameter importance ranking for SBLOCA of CPR1000 with moment-independent sensitivity analysis*. [online]. Nuclear Engineering and Technology. 2020, roč. 52, č. 12, s. 2821-2835. ISSN 1738-5733. [cit. 2024-03-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573320302849>.
- [20] *VALIDATION MATRIX FOR THE ASSESSMENT OF THERMAL-HYDRAULIC CODES FOR VVER LOCA AND TRANSIENTS*. [online]. NEA/CSNI/R(2001)4, 2001. [cit. 2024-03-13]. Dostupné z: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_17492/validation-matrix-for-the-assessment-of-thermal-hydraulic-codes-for-vver-locas-and-transients?details=true
- [21] XIONG, Qingwen; DU, Peng; DENG, Jian; HUANG, Daishun; SONG, Gongle et al. *Global sensitivity analysis for nuclear reactor LBLOCA with time-dependent outputs*. [online]. Reliability Engineering & System Safety. 2022, roč. 221, č. 108337. ISSN 0951-8320. [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832022000187>.
- [22] KIM, Woo Shik; JEON, Byong Guk; JUNG, Satbyoul; KIM, Seok a MOON, Sang-Ki. *Optical and thermal visualization of quench front on hot wall during reflood*. [online]. Annals of Nuclear Energy. 2022, roč. 165, č. 108797. ISSN 0306-4549. [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454921006745>.

- [23] SAXENA, A. K.; VENKAT RAJ, V. a GOVARDHANA RAO, V. *Experimental studies on rewetting of hot vertical annular channel*. [online]. Nuclear Engineering and Design. 2001, roč. 208, č. 3, s. 283-303. ISSN 0029-5493. [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549301003569>.
- [24] LYMPEREA, N.; NIKOGLOU, A. a HINIS, E. P., *An Experimental Study on the Quench Front Velocity and Temperature During Rewetting of a Hot Vertical Rod.*, NURETH-16, Chicago, IL, USA, 2015, pp. 3525–3538
- [25] HLINKA, Ondřej. *Měření hydrodynamiky přestupu tepla pro vnitřní úlohu zaplavování válcové geometrie*. Diplomová práce. Praha: ČVUT, 2020.
- [26] MIKOLÁŠ, Pavel. *VVER-440 Fuel Cycles Possibilities Using Modified FA Design*. 2010. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/131/41131417.pdf.
- [27] *Data sheet SM15K series*. [online]. [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: https://www.delta-elektronika.nl/sites/default/files/2023-06/SM15K_DTS_V202306_0.pdf
- [28] *KANTHAL® A-1 Resistance Heating Wire And Resistant Wire DATASHEET* [online]. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/wire/resistance-heating-wire-and-resistance-wire/kanthal-a-1/>
- [29] *Refrasil Sleeving Info Sheet*. [online]. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://agaus.com.au/content/Product-Info-Sheets/Refrasil%20Sleeving%20Info%20Sheet.pdf>
- [30] *ROSEMOUNT 1151 Differential Pressure Transmitter* [online]. [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://cascadeautomation.com/shop/differential-pressure-transmitters/rosemount-1151-dp/>.
- [31] IWAMURA, Takamichi a ADACHI, Hiromichi. *Initial Thermal-Hydraulic Behaviors under Simultaneous ECC Water Injection into Cold Leg and Upper Plenum in a PWR-LOCA*. [online]. Journal of Nuclear Science and Technology. 1985, roč. 22, č. 6, s. 451-460. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/18811248.1985.9735681>
- [32] *Topné těleso 3,0 kW*. [online]. [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://eshop.triven.cz/topne-teleso-backer-3-0-kw/>.
- [33] *Keysight Data Logger Switch Unit*. [online]. [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/product/34972A/lxi-data-acquisition-data-logger-switch-unit>

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Závislost poměrného zbytkového tepla na době po odstavení reaktoru.....	13
Obrázek 2 – Režimy dvoufázového proudění u horizontálního kanálu.....	14
Obrázek 3 – Režimy dvoufázového proudění u vertikálního kanálu.....	15
Obrázek 4 – Křivka varu vody při atmosférickém tlaku	15
Obrázek 5 – Režimy proudění v ohřivaném vertikálním kanálu	17
Obrázek 6 – Vznik krize přestupu tepla 1. druhu (vlevo) a 2. druhu (vpravo).....	19
Obrázek 7 – Grafické znázornění DNBR	20
Obrázek 8 – Závislost tlaku na čase při LOCA havárii	21
Obrázek 9 – Závislost teploty pokrytí paliva na čase při LB LOCA.....	23
Obrázek 10 – Grafické znázornění chladicí fronty	25
Obrázek 11 – Jednotlivé fáze havárie LB LOCA	26
Obrázek 12 – Schéma původního experimentálního zařízení	28
Obrázek 13 – Palivová kazeta u reaktoru VVER-440 a detail průtočné plochy.....	29
Obrázek 14 – Schéma upraveného experimentálního zařízení	30
Obrázek 15 – Experimentální měřící stanice	31
Obrázek 16 - Zdroj stejnosměrného napětí SM70-CP-450	32
Obrázek 17 – Schéma zapojení pro měření dat	33
Obrázek 18 – Schéma uchycení termočlásku	34
Obrázek 19 – Uchycení termočlásku.....	34
Obrázek 20 – Tlakový snímač Rosemount 1151	36
Obrázek 21 – Závislost objemového průtoku na napětí při kalibraci průtoku.....	37
Obrázek 22 – Topné těleso	38
Obrázek 23 – Připojení patrony k experimentálnímu zařízení	38
Obrázek 24 – Připojení termočlásku pro měření teploty vody.....	39
Obrázek 25 – Datový záznamník Keysight 34972A LXI.....	40
Obrázek 26 – Závislost teploty 3. termočlásku na čase při ohřevu trubky na 650 °C ...	42
Obrázek 27 – Rozestupy termočlásků	42
Obrázek 28 – Snímek obrazovky ze softwaru BenchLink Data Logger 3	43
Obrázek 29 – Průběh měřených veličin během celého experimentu.....	46
Obrázek 30 – Průběh měřených veličin s upraveným začátkem a koncem.....	46
Obrázek 31 – Pozice definovaných teplotních bodů	48
Obrázek 32 – Důležité teplotní body při jednom z experimentálních měření	48

Obrázek 33 – Předčasné smočení 8. TČ při jednom z experimentálních měření	52
Obrázek 34 – Rychlosti chladících front na jednotlivých úsecích při $t_v = 17\text{ °C}$	55
Obrázek 35 – Rychlosti chladících front na jednotlivých úsecích při $t_v = 33\text{ °C}$	55
Obrázek 36 – Rychlosti chladících front na jednotlivých úsecích při $t_v = 50\text{ °C}$	56
Obrázek 37 – Rychlosti chladících front na jednotlivých úsecích při $t_v = 67\text{ °C}$	56
Obrázek 38 – Porovnání rychlostí na jednotlivých úsecích pro 3 různé teploty trubky. 58	
Obrázek 39 – Závislost rychlosti na počáteční teplotě testovací sekce na úseku 1 – 2..	59
Obrázek 40 – Závislost rychlosti na počáteční teplotě testovací sekce na úseku 2 – 3..	59
Obrázek 41 – Závislost rychlosti na počáteční teplotě testovací sekce na úseku 3 – 4..	60
Obrázek 42 – Závislost rychlosti na teplotě chladící vody na úseku 1 – 2.....	61
Obrázek 43 – Závislost rychlosti na teplotě chladící vody na úseku 2 – 3.....	61
Obrázek 44 – Závislost rychlosti na teplotě chladící vody na úseku 3 – 4.....	62
Obrázek 45 – Závislost rychlosti na teplotě chladící vody na úseku 4 – 5.....	62
Obrázek 46 - Závislost rychlosti na počáteční teplotě testovací sekce na úseku 1 – 5... 65	
Obrázek 47 - Závislost rychlosti na počáteční teplotě testovací sekce na úseku 1 – 6... 66	
Obrázek 48 - Závislost rychlosti na počáteční teplotě testovací sekce na úseku 1 – 7... 66	
Obrázek 49 - Závislost rychlosti na počáteční teplotě testovací sekce na úseku 2 – 6... 67	
Obrázek 50 – Závislost rychlosti na teplotě chladící vody na úseku 1 - 5	67
Obrázek 51 – Závislost rychlosti na teplotě chladící vody na úseku 1 - 6	68
Obrázek 52 – Závislost rychlosti na teplotě chladící vody na úseku 1 - 7	68
Obrázek 53 – Závislost relativní rychlosti na počáteční teplotě trubky na úseku 1 - 7..	70
Obrázek 54 – Závislost relativní rychlosti na počáteční teplotě trubky na úseku 1 – 6 .	70
Obrázek 55 – Závislost relativní rychlosti na teplotě chladící vody na úseku 1 – 7	71
Obrázek 56 – Závislost relativní rychlosti na teplotě chladící vody na úseku 1 – 6	71
Obrázek 57 – Detekované teploty prudkého ochlazování u TČ 2, TČ 4 a TČ 6	73
Obrázek 58 – Detekované teploty prudkého ochlazování u TČ 3, TČ 5 a TČ 7	74
Obrázek 59 – Závislost teplot prudkého ochlazování na teplotě chladiva	75
Obrázek 60 – Závislost teplot prudkého ochlazování na čísle termočlánku.....	76
Obrázek 61 – Závislost bezrozměrných teplot na čísle termočlánku	78
Obrázek 62 – Závislost bezrozměrných teplot na teplotě chladící vody	78
Obrázek 63 – Závislost bezrozměrných teplot smočení TČ 3 a TČ 5 na teplotě trubky	79
Obrázek 64 – Závislost bezrozměrných teplot smočení TČ 6 a TČ 7 na teplotě trubky	79
Obrázek 65 – Závislost průměrné bezrozměrné teploty na teplotě trubky	80

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Rozdělení energií z jednoho štěpení uranu U235	12
Tabulka 2 – Hydraulické průměry jednoho segmentu pro různé typy reaktorů	29
Tabulka 3 – Parametry zdroje stejnosměrného napětí SM70-CP-450.....	32
Tabulka 4 – Naměřené hodnoty při kalibraci průtoku.....	37
Tabulka 5 – Použité teploty chladící vody.....	39
Tabulka 6 – Hodnoty proudu odpovídající jednotlivým teplotám trubky	41
Tabulka 7 – Rozestupy termočlánků	42
Tabulka 8 – Rychlost chladící fronty na jednotlivých úsecích při $t_v = 17\text{ °C}$	53
Tabulka 9 – Rychlost chladící fronty na jednotlivých úsecích při $t_v = 33\text{ °C}$	53
Tabulka 10 – Rychlost chladící fronty na jednotlivých úsecích při $t_v = 50\text{ °C}$	54
Tabulka 11 – Rychlost chladící fronty na jednotlivých úsecích při $t_v = 67\text{ °C}$	54
Tabulka 12 – Uvažované delší úseky a jejich délky	63
Tabulka 13 – Rychlost chladící fronty na delších úsecích při $t_v = 17\text{ °C}$	64
Tabulka 14 – Rychlost chladící fronty na delších úsecích při $t_v = 33\text{ °C}$	64
Tabulka 15 – Rychlost chladící fronty na delších úsecích při $t_v = 50\text{ °C}$	64
Tabulka 16 – Rychlost chladící fronty na delších úsecích při $t_v = 67\text{ °C}$	65
Tabulka 17 – Relativní rychlost chladící fronty při $t_v = 17\text{ °C}$	69
Tabulka 18 – Relativní rychlost chladící fronty při $t_v = 33\text{ °C}$	69
Tabulka 19 – Relativní rychlost chladící fronty při $t_v = 50\text{ °C}$	69
Tabulka 20 – Relativní rychlost chladící fronty při $t_v = 67\text{ °C}$	69
Tabulka 21 – Teploty prudkého ochlazování $t_v = 17\text{ °C}$	72
Tabulka 22 – Teploty prudkého ochlazování $t_v = 33\text{ °C}$	72
Tabulka 23 – Teploty prudkého ochlazování $t_v = 50\text{ °C}$	72
Tabulka 24 – Teploty prudkého ochlazování $t_v = 67\text{ °C}$	73
Tabulka 25 – Teploty prudkého ochlazování v závislosti na teplotě chladící vody	74
Tabulka 26 – Bezrozměrné teploty prudkého ochlazování při $t_v = 17\text{ °C}$	77
Tabulka 27 – Bezrozměrné teploty prudkého ochlazování při $t_v = 33\text{ °C}$	77
Tabulka 28 – Bezrozměrné teploty prudkého ochlazování při $t_v = 50\text{ °C}$	77
Tabulka 29 – Bezrozměrné teploty prudkého ochlazování při $t_v = 67\text{ °C}$	77