

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2022

**JAKUB
ŠPAČEK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Špaček** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **473532**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Jaderná energetická zařízení**
Studijní obor: **Jaderná energetická zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Technologie měření průtoku tekutých solí

Název diplomové práce anglicky:

Liquid salt flow measurement technologies

Pokyny pro vypracování:

Tekuté soli se vyznačují některými vhodnými teplotními a materiálovými vlastnostmi a jejich výzkum v oblasti energetického využití probíhá již řadu dekad. Součástí výzkumu v této oblasti je i stavba a provoz experimentálních zařízení a tedy i vhodná forma měření vybraných fyzikálních veličin. Cílem této diplomové práce je navrhnout a ověřit funkčnost vybraného způsobu měření průtoku tekuté soli.

Diplomová práce zahrnuje následující body:

- 1) Rešerše solných reaktorů
- 2) Přehled měření vybraných veličin v zařízeních pracujících s tekutými solemi
- 3) Návrh způsobu měření průtoku tekuté soli
- 4) Ověření funkčnosti navrženého způsobu měření průtoku pomocí CFD modelu

Seznam doporučené literatury:

T.J. Dolan: Molten Salt Reactors and Thorium Energy. 2017
P.M. Bardet & P.F. Peterson (2008) Options for Scaled Experiments for High Temperature Liquid Salt and Helium Fluid Mechanics and Convective Heat Transfer, Nuclear Technology, 163:3, 344-357, DOI: 10.13182/NT163-344

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Zácha, Ph.D. ústav energetiky FS

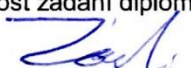
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

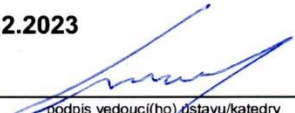
Ing. Michal Cihlář ústav energetiky FS


Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.06.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**


Ing. Pavel Zácha, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



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.

29. 4. 2022
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím literatury uvedené v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 10. 6. 2022

.....

Bc. Jakub Špaček

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, Ing. Pavlu Záchovi, Ph.D., za neuvěřitelnou trpělivost obzvláště v posledních dnech a Ing. Michalu Cihlářovi za odborně vedené konzultace a užitečné rady.

Dále bych chtěl poděkovat mému nejužšímu kruhu přátel, o které jsem se mohl vždy opřít v této šílené době, kdy jsem začal svou cestu za inženýrským titulem během celosvětové pandemie a končím ho během války v Evropě.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Jakub Špaček
Název DP:	Technologie měření průtoku tekutých solí
Anglický název:	Liquid salt measurement technologies
Akademický rok:	2021/2022
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky/Jaderná energetická zařízení
Vedoucí DP:	Ing. Pavel Zácha, Ph.D. Ústav energetiky, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze
Konzultant:	Ing Michal Cihlář
Bibliografické údaje:	Počet stran: 66 Počet obrázků: 45 Počet tabulek: 21 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	CFD, FLiBe, tekuté soli, průtokoměr, návrh, škálování, smyčka, simulace,
Keywords:	CFD, FLiBe, molten salt, flowmeter, design, scaling, loop, simulation
Anotace:	Reaktory používající roztavené soli byly v 60. letech minulého století jednou z vyvíjených jaderných technologií, které se přisuzoval velký potenciál. Jejich vývoj byl ale předčasně ukončen a velmi dlouho se touto technologií nikdo nezabýval. S příchodem reaktorů IV. Generace se ovšem obnovil zájem o tyto reaktory, které očividně předběhli svou dobu. Kvůli absenci asi třiceti let výzkumu zůstalo okolo této technologie mnoho otázek. Tato práce se snaží pokrýt jeden z těchto nedořešených problémů, tedy spolehlivý a jednoduchý průtokoměr. Tato práce se zabývá návrhem termického průtokoměru pro použití na smyčkách roztavené soli a vytvářením škálovaného modelu smyčky roztavené soli. Byl proveden návrh termického průtokoměru. Následně se pomocí CFD simulace provedla jeho optimalizace a vytvoření měřících metod. Aby mohl být tento návrh

průtokoměru ověřen, byly vytvořeny výpočetní podklady pro stavbu škálovaného modelu solné smyčky, na které bude tento průtokoměr experimentálně ověřen. Navržená škálovaná smyčka používá místo roztavené soli teplotnosný olej o čtvrtinové teplotě, která je vhodnější pro realizaci ve školním prostředí.

Abstract:

Molten salt reactors were one of the nuclear technologies being developed in the 1960s that was credited with great potential. However, their development was prematurely terminated and for a very long time no research was done in this field. However, with the advent of Generation IV reactors, there was renewed interest in this technology, which was obviously ahead of its time. Due to the absence of about thirty years of research, many questions about this technology remained unanswered. This work seeks to cover one of these unsolved problems, namely a reliable and simple flow meter. This work deals with the design of a thermal flow meter for use on molten salt loops and the creation of a scaled model of a molten salt loop. A thermal flow meter was designed. Subsequently, its optimization and the creation of measurement methods were carried out using CFD simulation. In order to validate this flow meter design, calculation materials were created for the construction of a scaled model of a salt loop on which this flow meter will be experimentally validated. The proposed scaled loop uses a heat transfer oil instead of molten salt with temperature of about one quarter of the original, which is more suitable for implementation in a school environment.

Obsah

Seznam obrázků.....	4
Seznam tabulek	6
Seznam použitých zkratk	7
Seznam použitých symbolů.....	8
1. Úvod.....	9
1.1. Vznik solných smyček	9
1.1.1. ARE.....	9
1.1.2. MSRE	10
1.2. Ukončení vývoje a jeho důvody	10
1.3. Využití solných smyček v současnosti a znovuoobnovení výzkumu.....	11
1.4. Specifika solných smyček pro jaderný průmysl.....	12
2. Měření průtoku v solných smyčkách	14
2.1. Metody měření průtoku.....	14
2.1.2. Neinvazivní metody	15
3. Výzvy s měřením na experimentálních solných smyčkách.....	17
3.1. Použití škálované smyčky.....	17
3.2. Limitace škálovaných smyček.....	18
4. Návrh škálované smyčky	19
4.1. Podobnostní čísla	19
4.1.1. Prandtlovo číslo	19
4.1.2. Reynoldsovo číslo.....	20
4.1.3. Strouhalovo číslo.....	20
4.1.4. Grashofovo číslo.....	21
4.1.5. Froudeho číslo.....	21
4.1.6. Biotovo číslo	21
4.1.7. Fourierovo číslo	22
4.2. Parametry prototypové a škálované smyčky	23
4.2.1. Hustota soli.....	24
4.2.2. Měrná tepelná kapacita	24

4.2.3.	Tepelná vodivost.....	24
4.2.4.	Dynamická viskozita.....	25
4.2.5.	Vlastnosti dalších materiálů.....	26
4.3.	Výběr simulačního média	27
4.4.	Výběr materiálu škálované smyčky	30
4.5.	Parametry možných smyček.....	30
4.6.	Alternativní zjednodušení škálované smyčky.....	32
5.	Rámcový návrh průtokoměru.....	34
5.1.	Způsoby měření průtoku	34
5.1.1.	Ustálená teplota.....	34
5.1.2.	Rozdíl ustálených teplot	34
5.1.3.	Transit-time.....	34
5.1.4.	Teplota po fixním čase.....	35
5.1.5.	Čas poklesu teploty.....	35
5.1.6.	Měření inflexního bodu	35
6.	CFD simulace.....	36
6.1.	2D simulace.....	36
6.1.1.	2D modely průtokoměru	36
6.1.2.	Okrajové podmínky.....	39
6.1.3.	Nastavení parametrů řešiče.....	41
6.1.4.	Citlivostní analýza výpočtové sítě	41
6.1.5.	Ověření funkčnosti škálovaného modelu	43
6.1.6.	Výsledky 2D simulace.....	45
6.1.7.	Výsledky optimalizace	50
6.2.	3D simulace.....	51
6.2.1.	Limitace 3D modelů.....	51
6.2.2.	3D modely průtokoměru	51
6.2.3.	CFD sítě a jejich parametry	53
6.2.4.	Okrajové podmínky.....	54
6.2.5.	Nastavení parametrů řešiče.....	56
6.2.6.	Citlivostní analýza výpočtové sítě	57
6.2.7.	Ověření funkčnosti škálovaného modelu	58

6.2.8. Výsledky 3D simulace.....	59
7. Závěr.....	63
8. Literatura.....	64

Seznam obrázků

Obrázek 1 Vyobrazení funkce kalorimetrického senzoru.....	16
Obrázek 2 Naměřená data a korelace pro hustotu FLiBe soli [10].....	24
Obrázek 3 Naměřená data a korelace pro tepelnou vodivost FLiBe soli [10] ...	25
Obrázek 4 Naměřená data a korelace pro dynamickou viskozitu FLiBe soli [10]	25
Obrázek 5 Závislost Prandtlova čísla na teplotě ve smyčce.....	28
Obrázek 6 Závislost Reynoldsova čísla na teplotě ve smyčce.....	28
Obrázek 7 Závislost Grashofova čísla na teplotě ve smyčce.....	29
Obrázek 8 Závislost Biotova čísla na teplotě ve smyčce.....	29
Obrázek 9 Síť prototypového 2D modelu průtokoměru.....	37
Obrázek 10 Detail sítě prototypového 2D modelu průtokoměru.....	37
Obrázek 11 2D prototypový model pro vytvoření rychlostního profilu.....	38
Obrázek 12 Detail sítě prototypového 2D modelu pro vytvoření rychlostního profilu.....	38
Obrázek 13 Porovnání teplotních profilů původní a zjemněné sítě.....	41
Obrázek 14 Produkce turbulentní kinetické energie u stěny při rychlosti 1,1 m/s.....	42
Obrázek 15 Intenzita turbulence u stěny při rychlosti 1,1 m/s.....	42
Obrázek 16 Teplota soli u stěny trubky pod topným tělesem při rychlosti 1,1 m/s.....	42
Obrázek 17 Teplotní rozdělení v okolí topného tělesa pro rychlost 0,9 m/s	43
Obrázek 18 Teplotní rozdělení v okolí topného tělesa pro rychlost 0,9 m/s po korekcích.....	43
Obrázek 19 Průběh teploty po zapnutí topného tělesa při rychlosti 0,9 m/s...	44
Obrázek 20 Průběh teploty po zapnutí topného tělesa při rychlosti 0,9 m/s po započítání časové akcelerace modelu.....	44
Obrázek 21 Výsledek výpočtu pro ustálený stav s délkou topného tělesa 100 mm a střední rychlostí proudění 0,1 m/s.....	45
Obrázek 22 Teplota za topným tělesem v ustáleném stavu.....	46
Obrázek 23 Závislost teploty v bodě na rychlosti.....	46
Obrázek 24 Přírůstek teploty se zvětšujícím se topným tělesem.....	47
Obrázek 25 Teplota za topným tělesem po fixním čase pro nižší rychlosti.....	47
Obrázek 26 První závislost teploty na střední rychlosti.....	48
Obrázek 27 Teplota za topným tělesem po fixním čase pro vyšší rychlosti.....	48
Obrázek 28 Druhá závislost teploty na střední rychlosti.....	48
Obrázek 29 Hodnota první derivace teploty v čase po zapnutí topného tělesa	49
Obrázek 30 Závislost času do dosažení inflexního bodu na střední rychlosti ...	50
Obrázek 31 Geometrie modelu průtokoměru.....	52

Obrázek 32 Geometrie průtokoměru bez izolace.....	52
Obrázek 33 Detail realizace modelu topného tělesa	53
Obrázek 34 Celá síť průtokoměru včetně izolace	53
Obrázek 35 Detail sítě na okraji topného tělesa a u stěny	54
Obrázek 36 Zdeformovaný rychlostní profil následkem nehomogenní hustoty soli v trubce.....	55
Obrázek 37 Porovnání tlakové ztráty sítě.....	57
Obrázek 38 Teplota na povrchu trubky originální a zjemněné sítě.....	58
Obrázek 39 Porovnání modelů pro přechodový jev při rychlosti proudění 1,1 m/s.....	58
Obrázek 40 Teplotní profil v průtokoměru při rychlosti proudění 0,4 m/s.....	59
Obrázek 41 Teplotní profil v průtokoměru při rychlosti proudění 0,1 m/s.....	59
Obrázek 42 Vznik „polštáře“ teplé soli držící se okolo topného tělesa při 0,04 m/s.....	59
Obrázek 43 Ukázka korelace pro vyšší rychlosti s vysokou hodnotou R^2	60
Obrázek 44 Ukázka korelace pro nižší rychlosti s horší hodnotou R^2	60
Obrázek 45 Oblasti aplikovatelnosti měřících metod seskupené podle režimu topného tělesa.....	61

Seznam tabulek

Tabulka 1 Informativní hodnoty vlastností FLiBe soli	13
Tabulka 2 Základní parametry prototypové smyčky	23
Tabulka 3 Vybrané korelace materiálových vlastností FLiBe soli	26
Tabulka 4 Materiály ostatních částí smyčky	27
Tabulka 5 Podobnostní čísla prototypové smyčky.....	27
Tabulka 6 Oleje řady Therminol	27
Tabulka 7 Oleje řady Marlotherm	27
Tabulka 8 Srovnání vlastností perspektivních olejů pro návrh smyčky	31
Tabulka 9 Porovnání přesnosti škálování perspektivních olejů.....	32
Tabulka 10 Převod mezi střední rychlostí proudění a průtoku ve smyčce	36
Tabulka 11 Parametry sítě jednotlivých modelů	39
Tabulka 12 Okrajové podmínky modelu pro tvorbu profilu	40
Tabulka 13 Okrajové podmínky modelu průtokoměru	40
Tabulka 14 Výpis optimálních hodnot pro jednotlivé měřicí metody	50
Tabulka 15 Finální rozměry průtokoměru.....	51
Tabulka 16 Parametry objemové sítě průtokoměru.....	54
Tabulka 17 Okrajové podmínky modelu pro tvorbu profilu	55
Tabulka 18 Okrajové podmínky modelu průtokoměru	56
Tabulka 19 Výpis použitých metod a modelů v řešiči	57
Tabulka 20 Výpis korelací a ostatních parametrů pro jednotlivé měřicí metody	62

Seznam použitých zkratek

AHR	Aqueous Homogeneous Reactor
ANL	Argonne National Laboratory
ANP	Aircraft Nuclear Propulsion
ARE	Aircraft Reactor Experiment
CFD	Computational Fluid Dynamics
FLiBe	LiF-BeF ₂ (sůl)
FLiNaK	LiF-NaF-KF (sůl)
FLUENT	CFD kód
HRE	Homogeneous Reactor Experiment
KEMA	Keuring van Elektrotechnische Materialen Arnhem
LMFBR	Liquid Metal Fast Breeder Reactor
MSBR	Molten Salt Breeder Reactor
MSR	Molten Salt Reactor
MSRE	Molten Salt Reactor Experiment
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked (sekvenční algoritmus)
SST	Shear Stress Transport
TMF	Thermal Mass Flowmeter
USA	United States of America

Seznam použitých symbolů

c_p	Měrná tepelná kapacita materiálu	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
f	Frekvence cyklických jevů	[s ⁻¹]
g	Gravitační zrychlení	[m·s ⁻²]
k	Tepelná vodivost trubky	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
l	Tloušťka stěny	[m]
L	Vnitřní průměr trubky	[m]
Δp	Tlakový spád	[Pa]
T	Teplota	[°C]
ΔT	Teplotní rozdíl	[°C]
a	Teplotní difuzivita	[m ² ·s ⁻¹]
ρ	Hustota	[kg·m ⁻³]
u	Rychlost proudění	[m·s ⁻¹]
λ	Tepelná vodivost	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
μ	Dynamická viskozita	[Pa·s]
τ	Charakteristický čas	[s]

Dolní indexy

p	prototyp
m	model

1. Úvod

Historie solných smyček začala, stejně jako velká část jaderných technologií, během druhé světové války v projektu Manhattan v USA. Jaderný fyzik Eugene Wigner, vedoucí týmu navrhující reaktory pro výrobu Plutonia, se snažil vyřešit problémy, které se objevily během provozu jím navržených výrobních reaktorů, od manipulace s palivem, přes pozastavení štěpné reakce kvůli otravě Xenonem, až po bezpečnost. Zanalyzoval celý proces navrhování reaktorů a zjistil, že většina problémů tehdejších reaktorů má prvo počátek v jaderném palivu. Při analyzování základních chemických, jaderných a fyzikálních jevů, které se odehrávají v jaderném palivu, dospěl k závěru, že palivo tehdejších (a i těch našich soudobých) reaktorů je ve špatném skupenství. Žádný z chemicko-technologických procesů v průmyslu se neprovádí v pevné formě právě kvůli problémům, které nastaly u prvních reaktorů, jako byly Chicago Pile-1, X-10 a Reaktor B ve Washingtonu. Díky tekutému stavu paliva by v nich bylo přidávání nebo ubírání paliva, separace štěpných produktů a řízení množství reaktivity v systému mnohem jednodušší. Dále také problém s otravou Xenonem má řešení opět na základě prvotních zásad. Xenon jako plyn se nedokáže udržet v roztoku a jeho následná separace je velmi jednoduchá [1].

Po válce se člen Wignerova týmu z Manhattanu jménem Alvin Weinberg stal ředitelem Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Weinberg sdílel Wignerův názor na tekuté palivo a dokázal zajistit možnost relativně volného vývoje reaktorů s tekutým palivem. Výzkum začal s palivem rozpuštěným ve vodném roztoku, z čehož vznikl reaktor HRE jakožto prvotní jednoduchý návrh reaktoru s tekutým palivem. První dosažení kritičnosti tohoto reaktoru nastalo v roce 1952. Tento reaktor byl pro svou jednoduchost pojmenován „Alvin’s 3P Reactor“ – (Pot, Pipe, Pump) [2]. Do této rodiny reaktorů, kterou dnes nazýváme AHR reaktory, patří dlouho provozované výzkumné reaktory KEMA a ARGUS. HRE se ukázal jako velmi úspěšná první iterace nového designu převážně z pohledu stability reaktoru a jeho bezpečnosti, ale rychle se přešlo k dalším návrhům reaktorů s roztavenými solemi.

1.1. Vznik solných smyček

1.1.1. ARE

Po konci druhé světové války se všechny větve americké armády začaly zajímat o možnosti využití jaderných reaktorů. Letectvo chtělo reaktorem pohánět jejich strategické bombardéry a vývojem této technologie pověřili ORNL na přelomu 40. a 50. let. Weinberg byl jedním z vynálezců tlakovodního reaktoru [3], tedy stejného typu, který nakonec začalo používat námořnictvo. Znal tím pádem omezení tohoto designu a věděl, že jeho použití je neslučitelné s požadavky, které předložilo americké letectvo. Aby měl tento projekt sebemenší šanci uspět, musel

výsledný reaktor být mnohem kompaktnější, lehčí a bezpečnější než jakýkoliv do té doby navržený reaktor. Znamenalo to tedy reaktor úplně nové koncepce. Weinberg správně předpokládal, že letectvo časem tento projekt opustí, takže provedený technologický a materiálový výzkum zakončený experimentálním reaktorem ARE (Aircraft Reactor Experiment) byl považován za úspěch. ARE byl zprovozněn v roce 1954 a stal se tak prvním reaktorem na světě používající rozpuštěné palivo ve smyčce roztavené soli [4]. Po úspěšném provozu reaktoru ARE začala práce na větším testovacím reaktoru ART, ale celý projekt ANP byl opuštěn v roce 1961 kvůli pokroku ve vývoji balistických raket a tankování paliva za letu.

1.1.2. MSRE

Po relativně úspěšném projektu ARE pokračovalo ORNL ve vývoji solného reaktoru i během 60. let. Projekt MSRE (Molten Salt Reactor Experiment) byl počátek výzkumu zaměřeného na operaci a provoz solného reaktoru v komerčním použití. Tento projekt navazoval na zkušenosti získané během projektu ANP a dokonce budova původně připravovaná na umístění reaktoru ART byla přestavěna pro realizaci tohoto projektu. Vrcholem projektu byl reaktor MSRE s tepelným výkonem 7,4 MW, který úspěšně běžel na plném výkonu po dobu 6000 hodin téměř nepřetržitě a pouze s plánovanými odstávkami [5]. Reaktor fungoval mezi lety 1965 až 1969 a mnoho problémů se solnými smyčkami se na něm úspěšně vyřešilo. Reaktor MSRE prokázal proveditelnost výzkumného reaktoru s tekutým palivem a solnou smyčkou. Závěr tehdejších vědců byl, že neexistují žádné nepřekonatelné problémy, které by zabránily použití tohoto typu reaktoru jako jaderné elektrárny [1].

1.2. Ukončení vývoje a jeho důvody

Již na počátku 60. let, kdy se začaly spouštět první komerční tlakovodní a varné reaktory, se počítalo s tím, že tato technologie je pouze přechodová a skutečná budoucnost americké energetiky je v množivých reaktorech. Tento názor vznikl kvůli (chybnému) předpokladu, že existuje pouze velmi omezené množství uranu 235, které tyto reaktory používají jako palivo. Předpokládalo se, že pro dlouhodobé používání jaderné energie je zapotřebí palivo vyrábět množením. Existovaly dva typy množivých reaktorů, které byly zkoumány.

- LMFBR - množivý reaktor používající pevné palivo (uran-plutoniový cyklus), chlazený tekutým kovem, využívající rychlé neutrony
- MSR - množivý reaktor používající palivo rozpuštěné v tekuté soli (thorium-uranový cyklus), využívající tepelné neutrony

LMFBR vyvíjela ANL (Argonne National Laboratory) v Illinois a MSR vyvíjela ORNL v Tennessee. Obě technologie byly na počátku vývoje, ale relativní

zkušenost s plutoniem získaná během projektu Manhattan zajistila upřednostnění (politické a finanční) systému LMFBR. Vývoji rychlých reaktorů bylo tedy přiděleno mnohem více peněz na výzkum. V roce 1972 byl Alvin Weinberg donucen odstoupit z pozice ředitele ORNL, kvůli jeho zpochybňování bezpečnosti tlakovodních a rychlých množivých reaktorů, které prosazovala Republikánská strana a prezident Nixon [6]. V roce 1973 bylo ORNL přikázáno ukončit veškerý výzkum reaktoru na roztavené soli. V 70. letech pokračoval výzkum LMFBR i přes nehodu v Three mile Island a prezidentův zákaz komerčního přepracování jaderného paliva. V polovině 80. let prezident R. Reagan podepsal Nuclear Waste Policy Act, což oficiálně znamená přesunutí budoucnosti amerického jaderného programu z LMFBR a přepracování paliva na dlouhodobé uskladňování. Odstoupení Weinberga a ukončení výzkumu solných reaktorů bylo tedy čistě politické rozhodnutí, které nemělo s designem reaktoru a technologií solných smyček nic společného.

Výzkum solných reaktorů v ORNL byl ukončen v 70. letech, aniž by vznikl skutečný prototyp solného energetického reaktoru. MSRE byl pouze experiment, který měl za úkol ověřit základy proveditelnosti tohoto typu reaktoru. Nikdy nepostavený MSBR měl být již téměř plnohodnotný prototyp reaktoru o značném výkonu, na kterém by se odzkoušela pokročilá řešení problémů, které se identifikovaly na projektu MSRE. Závěr celého výzkumu v ORNL jsou zprávy z projektu MSRE a prvotní návrhy MSBR. Na rozdíl od veřejného mínění, kdy si dnes většina lidí myslí, že solné reaktory neuspěly kvůli korozním problémům spojených se solí, se v těchto zprávách ukazuje opak. Například již s metalurgií 70. let vědci z ORNL vytvořili slitiny niklu, které solím odolávají, a z těchto zpráv vyznívá, že problémy, které objevili, nepovažovali za neřešitelné. Celkový názor na konci projektu byl, že objevené problémy jsou technického charakteru a jsou tedy na rozdíl od fyzikálních problémů řešitelné pokračujícím výzkumem [1].

1.3. Využití solných smyček v současnosti a znovuoobnovení výzkumu

Veškerý výzkum solných smyček se pro použití v jaderných elektrárnách na 30 let zastavil. Soli postupně našly limitované využití v jiných oborech, zejména jako teplotně a akumulční médium v solárních elektrárnách a v částech chemického průmyslu. Až s přelomem tisíciletí se začalo mluvit o solných smyčkách jako o jednom z kandidátů na budoucí reaktorovou technologii v projektu reaktoru IV. generace. V současné době tedy mnohé části projektů zabývající se roztavenými solemi navazují na 50 let starý výzkum, což často vede k neférovému porovnání solných reaktorů například s rychlými množivými reaktory, které mají za sebou mnohem delší výzkum a již několik

realizací. Důkazem chybějícího výzkumu v oblasti solných reaktorů je fakt, že největší problémy identifikované v současných výzkumech, jako například spolehlivá čerpadla, jsou problémy identifikované jako krizové již v těchto letitých zprávách [7].

1.4. Specifika solných smyček pro jaderný průmysl

Solné smyčky jsou velmi odlišné a v porovnání se současně používanými technologiemi mají více společného se smyčkami tekutých kovů než s vodními smyčkami. Proto jsou zřejmě tyto dvě technologie tak často porovnávány. Prvním a také největším rozdílem je pevné skupenství solí za pokojové teploty. Protože typů solí je mnoho, neexistuje jedna teplota tání, ale nejčastěji používané soli se pohybují v nízkých stovkách stupňů, což je násobně víc než například čistý sodík (97,8 °C). Zároveň rozsah tekutosti solí je většinou velmi velký – okolo 1000 °C. Tepelná vodivost bývá větší než u vody, ale vodivost sodíku je řádově vyšší. Měrná tepelná kapacita solí i sodíku bývá přibližně poloviční oproti vodě [8]. Výhoda solí, která je společná se sodíkem, je schopnost dosažení velikých teplot bez nutnosti zvyšování tlaku. Díky tomu je celá smyčka mnohem bezpečnější a jednodušší, protože na rozdíl od tlakovodní smyčky nehrozí při jejím porušení roztržení a ztráta chladiva. Za určitých podmínek může dojít i k samovolnému zaslepení poruchy ztuhlou unikající solí. Na rozdíl od sodíku soli neprochází drastickou a explozivní reakcí při kontaktu s vodou, což značně zjednodušuje manipulaci. Kvůli korozivním vlastnostem solí obecně jsou vyšší nároky na materiály, což je v současné době více finanční než technologický problém. Prováděné experimenty v 60. letech prokázaly použitelnost niklových slitin a grafitových materiálů [9]. Roztavené soli jsou také velmi chemicky stabilní i pod vysokým neutronovým zářením. Dá se tedy říct, že soli obecně mají většinu výhod tekutých kovů bez jejich nevýhod za cenu vyšší teploty tání a jiných (i když ne menších) korozivních problémů, než mají tekuté kovy.

Existuje mnoho typů solí, ale dlouhodobým výzkumem se pro aplikaci v jaderném průmyslu ukázaly dvě soli jako obzvláště vhodné. FLiNaK neboli LiF-NaF-KF je eutektická směs tří solí v poměru 46,5-11,5-42,0 mol % a FLiBe neboli LiF-BeF₂ je eutektická směs v poměru 66-34 mol %. Jako médium pro primární okruh se preferuje FLiBe. Má z těchto solí nejnižší neutronový průřez, je nejméně korozivní, je chemicky stabilní a většina aktivace vzniká z produkovaného tritia, což má za následek nižší úroveň radiace v primární smyčce. FLiBe má některé nevýhody, mezi které patří toxicita beryllia a nutnost obohacení lithia na nejméně 99,995 % Li-7 pro zachování nízkého účinného průřezu [10]. FLiNaK neobsahuje beryllium a má tedy menší toxicitu. Zároveň

větší tepelná kapacita a nižší teplota tání z ní dělá vhodného kandidáta na použití v sekundárním okruhu [10].

Tabulka 1 Informativní hodnoty vlastností FLiBe soli

Teplota tání [$^{\circ}\text{C}$]	460
Teplota varu [$^{\circ}\text{C}$]	1430
Měrná tepelná kapacita [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]	2414
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$]	1

2. Měření průtoku v solných smyčkách

V závěrečných zprávách z výzkumu v ORNL jsou identifikovány nedostatky objevené v projektu MSRE. Jedním z těchto problémů bylo měření průtoku v primární smyčce [11]. V současných reaktorech se průtok chladiva v primárních okruzích přímo neměří a používají se nepřímé metody. Tyto nepřímé metody se také dají použít v solné smyčce, ale experimentovalo se i s přímými způsoby měření. Vzhledem k tomu, že průtok soli je přímo spojen s odvodem tepla z reaktoru, je zapotřebí přesného měření průtoku pro správný výpočet tepelné bilance. Tento úkol je značně problematický převážně kvůli vysokým teplotám a vysoké tendenci soli korodovat okolní materiály. Bylo vyvinuto mnoho průtokoměrů, kde každý má své výhody a nevýhody. Některé z nich nejsou vhodné pro použití v solných smyčkách, některé mají velký potenciál, ale potřebují dodatečný výzkum, aby je bylo možno používat mimo laboratorní smyčky. Následující výpis způsobů měření průtoku představuje ty, které byly historicky používány nebo jejichž případné použití se zkoumá, protože byly určeny jako potenciálně vhodné řešení.

2.1. Metody měření průtoku

Základním rozdělením průtokoměrů může být podle toho, zda zasahují do tekoucího proudu. Tímto pohledem můžeme rozdělit metody na invazivní a neinvazivní.

2.1.1. Invazivní metody

První skupinou jsou mechanické průtokoměry, které pro zjištění velikosti průtoku nastavují proudu nějakou překážku. Většinou se jedná o turbínu, kdy se na základě jejích otáček určuje průtok. Sem také spadají vířivé průtokoměry, které proudu vystavují těleso vytvářející pravidelné turbulence, jejichž četnost následně koreluje s rychlostí proudění. Tyto typy jsou v průmyslu široce používané, nicméně pro solné smyčky se ukázaly jako nevhodné. Obě tyto metody mají problém v tom, že do už tak velmi nepříznivého prostředí zavádějí pohyblivý mechanismus, nebo překážku. Turbínový průtokoměr byl použit v ARE, ale po krátké době došlo ke zkorodování a selhání průtokoměru [11]. Následně se od jeho používání upustilo.

Dále je možno využít Bernoulliovy rovnice a průtok měřit pomocí diferenciálních tlaků. Tyto systémy ale také vyžadují buď vkládání zařízení do proudu v případě zařízení na principu Pitotovy trubice či u kuželových průtokoměrů, nebo zúžení potrubí v případě Ventouriho trubice, což opět vede ke zvýšení koroze. Na tomto principu fungoval průtokoměr v sekundárním okruhu reaktoru MSRE. Přenašeče diferenciálního tlaku byly plněny NaK solí. Toto byl také důvod, proč tento průtokoměr nebyl použit v primárním okruhu, neboť případné vniknutí

této soli k palivu by způsobilo precipitaci uranu v soli [11]. Tento scénář by neměl mít ve větších reaktorech, jako měl být MSBR, za následek tak velké problémy jako v MSRE, ale i přesto u nich existují i jiné problémy, například tuhnutí soli v impulzních linkách [11]. Závěr z projektu MSRE byl, že jejich použití v primárním okruhu je možné, ale zdaleka ne optimální. Zároveň je logické, že relativně velká složitost tohoto systému, který „pouze“ měří průtok, není pro použití v energetickém reaktoru vhodná.

2.1.2. Neinvazivní metody

Další skupina průtokoměrů využívá neinvazivní technologie, kdy zařízení nezasahuje do vnitřní strany trubky. Tento typ je pro použití v solné smyčce z výše zmíněných důvodů nejvhodnější hlavně kvůli inherentně jednoduššímu systému a neinvazivnosti, která eliminuje problémy s korozí a zvyšuje tak bezpečnost v případě selhání některé z částí měřidla. Princip jejich funkce je založen na elektromagnetických, ultrazvukových, nebo termodynamických jevech.

2.1.2.1. Elektromagnetické průtokoměry

Elektromagnetické průtokoměry fungují na principu měření Lorentzovy síly vznikající protékáním vodivé tekutiny magnetickým polem. Tyto průtokoměry jsou již dnes používané při měření tekutých kovů, ale v porovnání s nimi mají tekuté soli příliš nízkou vodivost, takže tato technologie je v současném stavu na hraně použitelnosti. Pokud by se jejich citlivost dokázala zvýšit, jejich aplikace by byla velmi výhodná [12].

2.1.2.2. Ultrazvukové průtokoměry

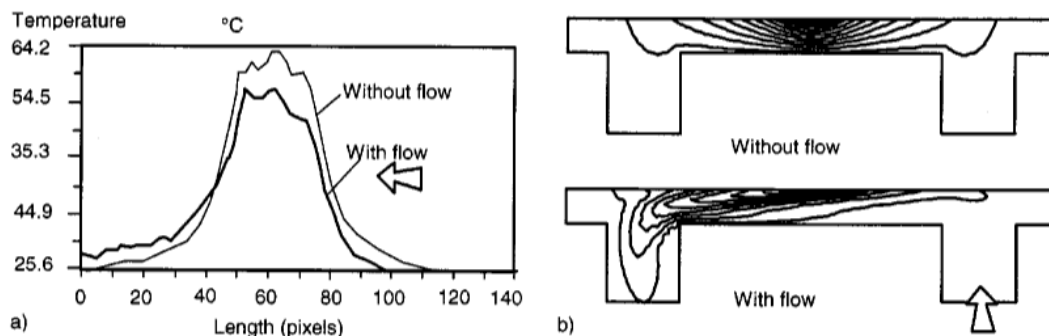
Ultrazvukové průtokoměry využívají dvou odlišných jevů pro měření. Prvním je měření za pomoci Dopplerova efektu. Tento systém vysílá ultrazvukové vlny, které po odrazu procházejí Dopplerovým posuvem a vrací se zpátky k senzoru [13]. Velký problém pro použití v solných smyčkách je nutnost zavedení stopovačů nebo bublinek plynu do proudu, aby se měly vlny od čeho odrazit. Vzhledem k tomu, že v celé smyčce se klade velký důraz na čistotu soli, tato podmínka je velmi kontraproduktivní a zavedení takového systému by zřejmě vedlo k dalším problémům.

Praktičtější způsobem měření průtoku je ultrazvukové měření na principu vyhodnocování doby průchodu signálu (Transit-time). Tento systém se instaluje na vnější stěnu trubky a nepotřebuje vnášet nečistoty do proudu soli. V současné době je největším problémem maximální provozní teplota senzorů, která je v nízkých stovkách stupňů, což je mnohem níže než provozní teplota solných reaktorů. Pro použití při vyšších teplotách je zapotřebí vlnového injektoru. Jedná se o tenký kus plechu mezi senzorem a trubkou, který zajišťuje, aby ultrazvukové pulzy mohly přejít do trubky a zároveň se senzor nepřehřál. Toto

řešení ovšem přináší nejistoty do měření. Zmíněný systém se již často používá v solárních elektrárnách, kde se teplo akumuluje do roztavené soli [14]. Pokud bude vývoj těchto senzorů pokračovat, časem se z nich stane relativně jednoduché a přesné řešení měření průtoku obzvlášť ve větších smyčkách, kde tyto senzory nenarážejí na problém s přesností při nízkých průtocích. Dále tento styl průtokoměru vyžaduje recalibraci při změně hrubosti a složení trubky, na které je tento průtokoměr nainstalován [14]. Tyto efekty způsobuje koroze, která v solných smyčkách bude nevyhnutelná.

2.1.2.3. Termické průtokoměry

Specifickým způsobem měření průtoku je měření pomocí tepla a jeho přenosu (Thermal mass flow meter - TMF), neboli také termické průtokoměry. TMF je v porovnání s ultrazvukovými průtokoměry v podstatě primitivní systém. V nejjednodušší formě se tyto průtokoměry skládají ze zdroje tepla a způsobu, jak měřit přesun tohoto tepla. Existuje několik druhů termických průtokoměrů, ale pro použití na solných smyčkách je potřeba těch druhů, které nemají zdroj tepla vnořený do proudícího média. Existují tři základní způsoby, jak měřit průtok s těmito průtokoměry. Měření efektu, který má proudící tekutina na teplotu topného tělesa, měření teplotního profilu okolo topného tělesa, nebo se může měřit zpoždění mezi zapnutím zdroje tepla a nárůstem teploty po určité vzdálenosti (Transit-time). Byť je tento systém velmi jednoduchý, existuje mnoho parametrů, které se mohou během návrhu měnit.



Obrázek 1 Vyobrazení funkce kalorimetrického senzoru

Tento typ průtokoměru splňuje velkou část požadavků na průtokoměr pro experimentální solné smyčky a i pro budoucí energetické solné reaktory. Neinvazivnost zaručuje vysokou bezpečnost, jednoduchost celého zařízení znamená spolehlivost a nízkou cenu, Přesnost tohoto měření záleží na správné vzdálenosti měřícího čidla od zdroje tepla.

3. Výzvy s měřením na experimentálních solných smyčkách

Aby byl navržený průtokoměr aplikovatelný v praxi, bude jej potřeba ověřit ve fyzické podobě pro potvrzení simulací, které vedly k jeho návrhu. To tedy znamená vytvoření experimentální smyčky tekuté soli, na které by se tento průtokoměr otestoval. Bohužel testy s tekutou solí jsou velmi drahé a náročné. Velkým problémem při experimentálním měření solných smyček je jejich vysoký bod tání, což má za následek práci s velmi horkou solí během experimentu. To je pouze jeden faktor, který velmi komplikuje a prodražuje celý proces práce s tekutými solemi. Existuje mnoho důvodů, proč by experimenty na roztavených solích měly být eliminovány na nutné minimum, pokud nejsou naprosto nezbytné. Jde zejména o vysoké energetické nároky, přes problémy s toxicitou beryllia, až po obtížné zacházení se solemi.

3.1. Použití škálované smyčky

Řešením může být postavení škálovaného modelu. Používání těchto modelů vychází z teorie podobnosti a je to jeden ze základních inženýrských nástrojů stále využívaných v téměř všech oborech. Historicky, když problém neměl analytické řešení, bylo jedinou možností k nalezení řešení vytvořit škálovaný model. S příchodem výpočetní techniky se začala používat, nejprve sporadicky a dnes téměř primárně, numerická řešení v podobě počítačových simulací. Nicméně i tyto simulace musejí být ukotvené v realitě a porovnávání simulací s normálním nebo škálovaným experimentem je běžnou součástí procesu inženýrského návrhu [15].

Aby škálovaný model byl použitelný, musí existovat určitá paralela mezi chováním skutečného „prototypu“ a škálovaného „modelu“. Není nutné, aby tyto podobnosti napodobovaly veškeré chování a fyzikální vlastnosti prototypu, ale dle potřeby mohou tyto modely replikovat například pouze jednu vlastnost, jako je tomu třeba při testování ve větrných tunelech, kdy je pouze vyžadováno replikování charakteru proudění. Se zvyšujícími se požadavky na počet replikovaných jevů stoupají i požadavky na volené veličiny a s každou novou podobností se snižuje počet volností v systému vytvářeného škálovaného modelu. Tyto podobnosti jsou popisovány podobnostními čísly a výsledkem je omezený počet jevů, který je tento model schopen popsat. Každý z těchto jevů je reprezentován jedním podobnostním číslem. Logicky z tohoto vyplývá, že škálované modely mají své limitace a škálovaný experiment nebude nikdy naprosto odpovídat prototypu. Tyto limitace mohou být částečně odstraněny správným výběrem provozních parametrů, kdy jejich omezený rozsah zvyšuje přesnost modelu na úkor jeho univerzálnosti.

Výhod škálovaných modelů je hned několik. Jedna z často požadovaných vlastností je zmenšení rozměrů, které vede k mnohem menším nákladům na provádění experimentů. Velmi často jsou provozní parametry škálovaného modelu méně extrémní a celý provoz a operace jsou opět levnější a méně náročné. Existuje několik faktorů komplikujících případné provádění experimentů na solných smyčkách, jejichž eliminace je žádoucí. Prvním je sůl samotná, kde vysoká teplota tání značně komplikuje manipulaci se solí. Zároveň korozivita a toxicita solí zvyšuje požadavky na materiály jak pro smyčku, tak pro ochranu lidí provozující experimenty. Dále vysoká provozní teplota znamená i vysoké náklady na provoz.

3.2. Limitace škálovaných smyček

Škálovaný model přináší s sebou určité limitace, které v určitých případech omezují použitelnost modelu a nemůže tak plně nahradit prototypový experiment. Nejdříve se musí přijmout fakt, že vždy bude docházet k jistému zkreslení výsledků. Některé jevy nejdou replikovat a musí se kompenzovat korekčními faktory nebo nahradit jevem jiným.

Kvůli materiálovým rozdílům nelze simulovat u škálované smyčky jevy spojené s chemickými a jadernými reakcemi solí radioaktivního paliva rozpuštěného v soli. Mohou být simulovány termohydraulické následky těchto jevů, pokud se tento jev zjednoduší a nahradí jiným řešením, nebo se akceptuje určité množství chyby ve výsledcích.

Hlavním jevem, který nelze reprodukovat ve škálovaném modelu, je tepelné záření a efekty spojené s ním. Experimentální údaje při použití nízkoteplotních simulačních kapalin mohou být použity pouze v případě, že účinky tepelného záření jsou malé a lze je zanedbat, nebo pokud jsou tyto efekty kompenzovány korekčními faktory.

Další jev, který nelze simulovat ve škálovaném modelu je tuhnutí soli a procesy s tím spojené, tedy například proces postupného nahřívání při zkapalnění soli ve smyčkách.

4. Návrh škálované smyčky

Škálovaná smyčka by měla replikovat chování prototypové smyčky v provozních parametrech, při kterých bude provozován průtokoměr. Zároveň by měla věrně replikovat všechny jevy, které ovlivňují rychlost přenosu tepla z ohřívacího elementu k teplotnímu čidlu. Prvotně by se měla zachovat geometrie prototypové smyčky. Navrhovaný průtokoměr má tři charakteristické rozměry (průměr, délku a tloušťku stěny). Podobnost těchto geometrií se vyjádří poměry jejich specifických délek. Při změně velikosti geometrie si tyto poměry musejí pořád odpovídat. Tomuto poměru se říká geometrický simplex a v našem případě se jedná o poměr průmětu trubky k délce trubky a poměr tloušťky stěny trubky k průměru trubky. Pro plnou podobnost by se měl zavést ještě jeden geometrický simplex a tím by měla být relativní drsnost, tedy poměr průměru trubky a její drsnosti. Při této podmínce byly identifikovány tyto základní parametry, které by ovlivňovaly chování průtokoměru:

- rychlost průtoku
- charakteristický rozměr
- provozní teplota smyčky
- rozdíl teplot ve smyčce
- tepelné vodivosti jednotlivých materiálů v systému

4.1. Podobnostní čísla

Pomocí těchto základních stupňů volnosti lze synchronizovat potřebná podobnostní čísla.

4.1.1. Prandtlovo číslo

Prandtlovo číslo je podobnostní číslo, které vyjadřuje poměr mezi konduktivním a konvektivním přenosem tepla v kapalině. Prandtlovo číslo je čistě závislé na vlastnostech média a je tím pádem pouze závislé na teplotě, která tyto hodnoty mění. Tak se tedy definuje jeden ze stupňů volnosti, provozní teplota smyčky. Při vytváření škálovaného modelu začínáme tímto podobnostním číslem právě kvůli tomu, že jeho závislost je pouze na vlastnostech tekutiny a zároveň určená provozní teplota definuje hodnoty veličin ostatních materiálů, které jsou závislé na teplotě. Pokud si mají jevy popisované Prandtlovým číslem ve škálovaném a prototypovém modelu odpovídat, musí se Prandtlovo číslo pro model a prototyp rovnat.

V následujících rovnicích index p označuje prototyp a index m označuje škálovaný model.

$$Pr = Pr(T)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$$

$$Pr_m = Pr_p \rightarrow \frac{\lambda_m}{\lambda_p} = \frac{c_{p,m} \mu_m}{c_{p,p} \mu_p}$$

Kde c_p Měrná tepelná kapacita materiálu

μ Dynamická viskozita

λ tepelná vodivost

4.1.2. Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo popisuje typ proudění média ve smyčce a je tedy nutné, aby se sladilo s prototypem pro věrnou replikaci chování a přechodů proudění z laminárního na turbulentní. Zároveň svazuje další dva stupně volnosti dohromady: charakteristickou délku a střední rychlost.

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu}$$

$$Re_m = Re_p \rightarrow \frac{\mu_m \rho_p}{\mu_p \rho_m} = \frac{u_m L_m}{u_p L_p}$$

Kde ρ Hustota

L Charakteristický rozměr

u Rychlost proudění

Současně, pokud jsou sladěna obě tato čísla, Nusseltovo číslo je sladěno také, protože pro nucenou konvekci je funkcí Prandtlova a Reynoldsova čísla. Toto podobnostní číslo je z mnoha pohledů nejdůležitější z celé oblasti hydrodynamiky a dá se předpokládat, že bude hrát velkou roli v chování průtokoměru.

4.1.3. Strouhalovo číslo

Toto číslo popisuje oscilační jevy v tekutině. Pokud tyto jevy nehrají v našem experimentu velkou roli, nemusí poměr tohoto čísla odpovídat a lze z něj poté zjistit časovou akceleraci škálované smyčky.

$$Sr = \frac{f \cdot L}{u}$$

$$Sr_m = Sr_p \rightarrow \frac{f_m}{f_p} = \frac{u_p \cdot L_m}{u_m \cdot L_p}$$

Kde f Frekvence cyklických jevů

4.1.4. Grashofovo číslo

Pro přirozenou konvekci je zapotřebí sladit Grashofovo číslo, které stejně jako číslo Reynoldsovo popisuje proudění tekutiny, a společně s Pradtlovým číslem vytváří Nusseltovo číslo pro přirozenou konvekci. Grashofovo číslo lze rozdělit na dvě části, kde první přidává další vazbu na charakteristickou délku a druhá část specifikuje rozdíl teplot, tedy další stupeň volnosti. Tímto jsou nadefinovány čtyři poměry parametrů pro vytváření škálovaného modelu.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)^2} \rightarrow \frac{g \cdot L^3}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)^2} \cdot (\beta \cdot \Delta T)$$

$$(\beta \cdot \Delta T)_m = (\beta \cdot \Delta T)_p \quad \left[\frac{g \cdot L^3}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)^2} \right]_m = \left[\frac{g \cdot L^3}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)^2} \right]_p$$

$$\frac{\beta_m}{\beta_p} = \frac{\Delta T_p}{\Delta T_m} \quad \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{3/2} = \frac{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_m}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_p}$$

Kde g Gravitační zrychlení

β Teplotní součinitel objemové roztažnosti

ΔT Rozdíl teplot ve smyčce

4.1.5. Froudeho číslo

Froudeho číslo je podíl gravitační a setrvačné síly v systému. Popisuje tedy, jak moc jsou gravitační síly v systému významné. Je definováno touto rovnicí:

$$Fr = \frac{gL}{u^2}$$

Vzhledem k tomu, že Froudeho číslo dává do vazby rychlost a specifickou délku systému, toto číslo je sladěné, pokud je sladěné Reynoldsovo a Grashofovo číslo.

4.1.6. Biotovo číslo

Pro přenos tepla je potřeba při škálování také definovat optimální tepelné vlastnosti materiálu smyčky. Pro ustálený tepelný tok je určeno modifikované [16] Biotovo číslo:

$$Bi^* = \frac{\lambda \cdot L}{k \cdot l}$$

$$\frac{\lambda_m}{\lambda_p} = \frac{k_m}{k_p} \cdot \frac{l_m \cdot L_p}{l_p \cdot L_m}$$

Kde l Tloušťka stěny trubky

k Tepelná vodivost

Je tedy dán poměr tepelných vodivostí materiálů trubek smyček a poměr tloušťek stěn.

4.1.7. Fourierovo číslo

Biotovo číslo popisuje přenos tepla v ustáleném stavu. Pro přechodový tepelný tok je potřeba sladit Fourierovo číslo.

$$Fo = \frac{\alpha \cdot \tau}{l^2}$$

$$\frac{\alpha_m}{\alpha_p} = \frac{l_m^2 \cdot \tau_p}{l_p^2 \cdot \tau_m}$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

$$\tau = \frac{L}{u}$$

Kde α Tepelná difuzivita

τ Charakteristický čas

Tímto se přidává podmínka na tepelnou difuzivitu materiálu trubky, která provazuje tloušťku trubky s kumulativním efektem tepelné vodivosti a tepelné kapacity. Zároveň je tímto určen poměr rychlostí přechodových stavů v materiálu, který odpovídá výše definované časové akceleraci škálované smyčky. Postup ladění jednotlivých podobnostních čísel je následovný:

$$(Pr) c_p, \mu, \lambda \rightarrow T$$

$$(Re) \mu, \rho \rightarrow L, u$$

$$(Fr) L, u \rightarrow (Re)$$

$$(Gr) \rightarrow \Delta T$$

$$(Bi) \rightarrow k$$

$$(Fo) l \rightarrow \rho_{trubky}, c_{p_{trubky}}$$

4.2. Parametry prototypové a škálované smyčky

Hodnoty prototypové smyčky vycházejí z parametrů navrhované solné smyčky v Centru výzkumu Řež. Níže jsou vypsány parametry potřebné pro návrh průtokoměru a vytvoření škálovaného modelu.

Tabulka 2 Základní parametry prototypové smyčky

Typ soli	Provozní teplota soli	Rozdíl teplot ve smyčce	Střední rychlost	Vnitřní průměr trubky	Tloušťka stěny trubky	Materiál smyčky
FLiBe	700 [°C]	100 [°C]	0,5 [m/s]	40 [mm]	5 [mm]	Hastelloy N

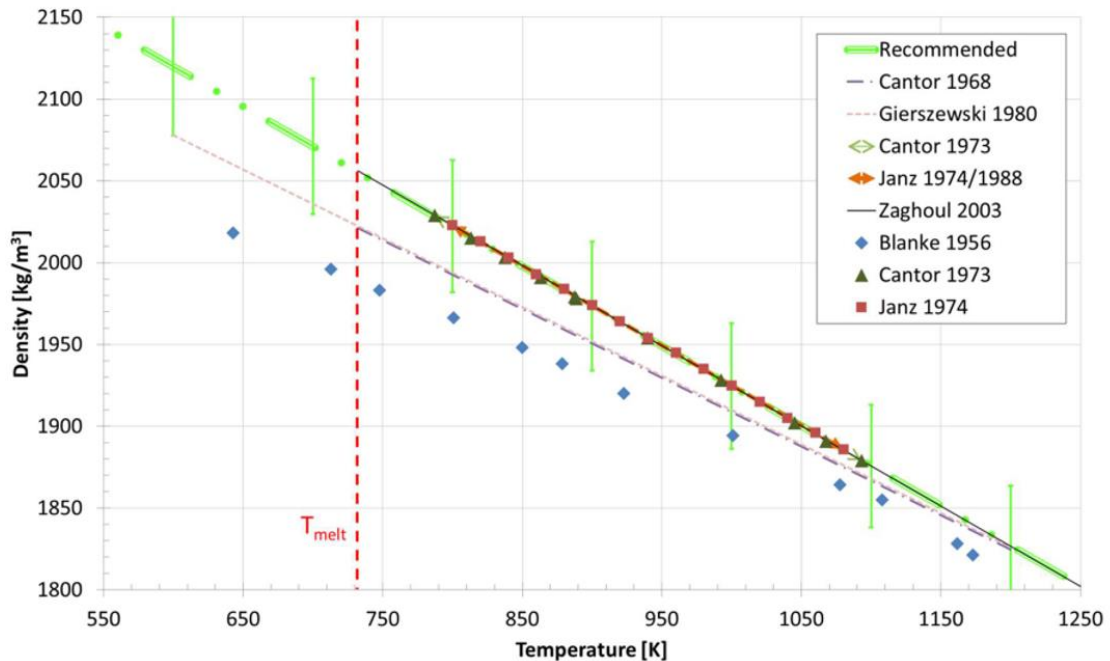
Maximální teplotní rozdíl ve smyčce zároveň představuje maximální teplotu, na kterou se může ohřát topný element průtokoměru. Zde jsou dva protichůdné požadavky. Co nejrychlejší zahřátí topného elementu na co nejvyšší teplotu. Rychlejší a větší změna teploty znamená přesnější měření průtokoměru. Proti tomuto požadavku jde omezení materiálu trubky. Při příliš vysokých teplotách a při cyklickém ohřívání, které je nutnou součástí provozu průtokoměru, může dojít k rekrystalizaci materiálu, tepelné únavě, a tím by se průtokoměr stal slabým místem smyčky.

Řešení je buď snížit maximální teplotu průtokoměru natolik, aby během jeho provozu nedošlo k degradaci materiálu trubky, anebo teplotu nechat výše a mít přesnější průtokoměr za cenu omezené životnosti. Tato práce se nezabývá vlivem tepelného namáhání na materiálové vlastnosti niklové slitiny Hastelloy N, ale poznatky z takového experimentu by měly pozitivní vliv na aplikovatelnost navrhovaného průtokoměru. Poté by se dala stanovit teplota a maximální počet cyklů pro stanovení optimální životnosti průtokoměru. Hodnota maximální teploty byla tedy stanovena konzervativně pomocí inženýrského odhadu.

Pro následující výpočty je nutno stanovit vlastnosti FLiBe soli. Bohužel vlastnosti těchto komplexních solí nejsou podloženy dostatečným množstvím naměřených dat a zatím chybí jasné závislosti těchto veličin na teplotě. Tento problém je dlouhodobý a celkově snižuje přesnost výpočtů a simulací. Vlastnosti solí se zároveň mění s teplotou natolik, že považovat je za konstantní by vedlo ke zbytečně velkému nepřesnostem.

4.2.1. Hustota soli

Dostupná data pro závislost hustoty FLiBe na teplotě jsou poměrně obsáhlá a u většiny dat jsou i relativně malé nejistoty [10]. Z naměřených dat bylo vytvořeno mnoho korelací. Tato data a korelace byly vyneseny v následujícím grafu.



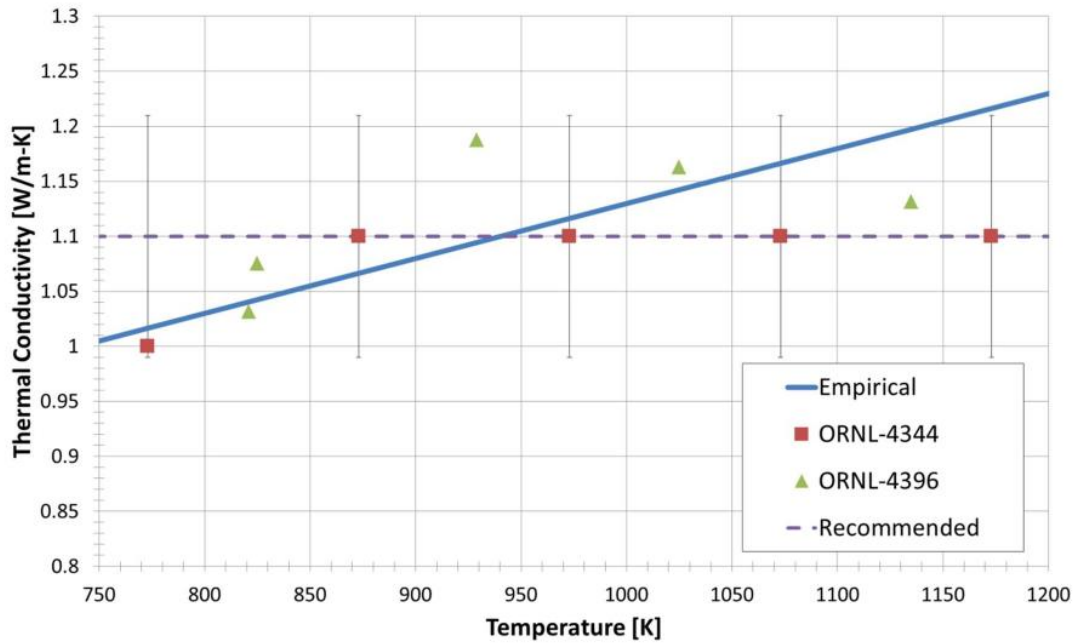
Obrázek 2 Naměřená data a korelace pro hustotu FLiBe soli [10]

4.2.2. Měrná tepelná kapacita

Pro měrnou tepelnou kapacitu existuje také několik experimentálních dat [10]. Nejistota je zde již vyšší a z naměřených dat vyplývá, že měrná tepelná kapacita FLiBe je konstantních $2386 \pm 3\%$ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ [17], což intuitivně nedává smysl.

4.2.3. Tepelná vodivost

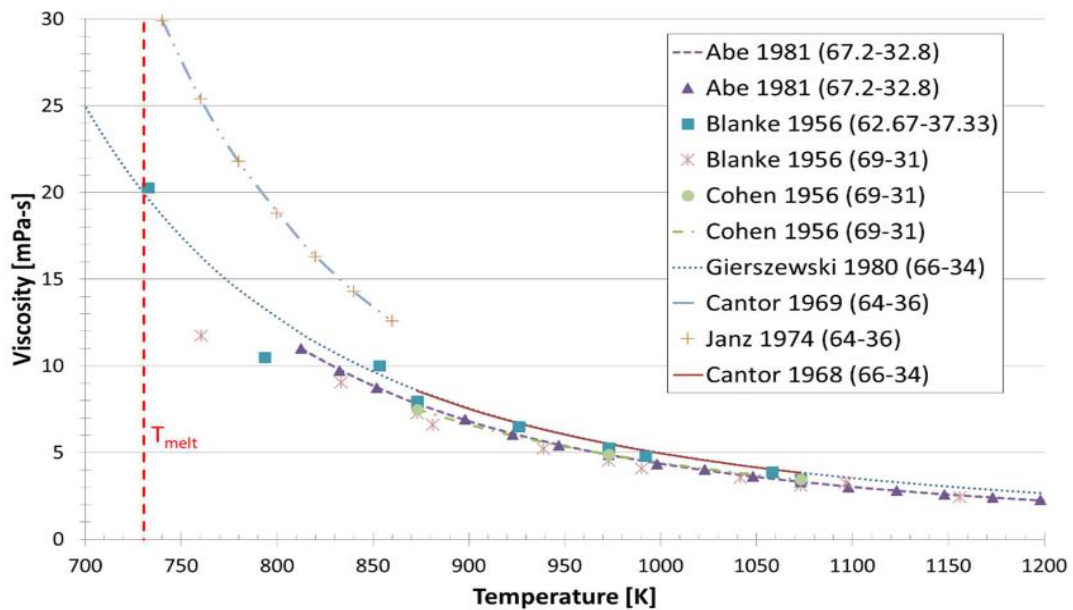
Data pro tepelnou vodivost jsou na tom o poznání hůře. Nejistoty u naměřených dat bývají velké kvůli obtížnosti měření této veličiny v experimentech. Naměřená data opět směřují ke konstantní hodnotě okolo $1,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$, ale s nejistotami až 50 % je obtížné těmito závěrům věřit. Byly vytvořeny empirické i analytické korelace, které už na teplotě závislé jsou [10]. Většina naměřených experimentálních dat mimochodem opět pochází z 60. let z ORNL.



Obrázek 3 Naměřená data a korelace pro tepelnou vodivost FLiBe soli [10]

4.2.4. Dynamická viskozita

FLiBe má exponenciální závislost dynamické viskozity na teplotě. V porovnání s ostatními vlastnostmi se viskozita s teplotou mění nejvíce. Zároveň každá část soli má jinou viskozitu. BeF_2 má oproti LiF viskozitu asi o 8 řádů vyšší. Proto také závisí u měření viskozity na poměru směsi. Většinou se jedná o eutektickou směs v poměru 66-34 [18].



Obrázek 4 Naměřená data a korelace pro dynamickou viskozitu FLiBe soli [10]

Korelace vycházející z těchto naměřených dat mají opět relativně velkou nejistotu 15-20 %. Zvolené korelace, rozsahy jejich platnosti a velikost jejich nejistoty jsou shrnuty v následující tabulce

Tabulka 3 Vybrané korelace materiálových vlastností FLiBe soli

Veličina	Korelace	Oblast platnosti	Nejistota
Hustota	$2415,6 - 0,49072 \cdot T [K]$ [19]	732,2-4498,8 [K]	2 %
Tepelná vodivost	$0,629697 + 0,0005 \cdot T [K]$ [10]	-	-
Měrná tepelná kapacita	2386 [19]	Tekuté skupenství	3 %
Dynamická viskozita	$0,000116 \cdot e^{\left(\frac{3755}{T[K]}\right)}$ [10]	873-1073 [K]	15–20 %

4.2.5. Vlastnosti dalších materiálů

Materiálové vlastnosti trubky jsou v porovnání mnohem jasnější a vycházejí z materiálových listů firmy Haynes International [20]. Nicméně tyto hodnoty jsou v materiálových listech měřeny od 100 °C do 700 °C, tedy končí přesně na výše definované provozní teplotě smyčky. Proto jsou tyto hodnoty brány jako konstantní.

Dalším materiálem je izolace, která obklopuje celou smyčku. Byla zvolena izolace z keramických vláken Kaowool S firmy Morgan Thermal Ceramics [21]. Izolace je vyrobena z kaolinitu a byla zvolena pro kombinaci dobrých izolačních vlastností, chemické stability a vysoké maximální provozní teplotě, která je 1200 °C, což je vysoko nad teplotou smyčky. Existuje několik verzí této izolace. Byla zvolena ta s nejmenší tepelnou vodivostí. Zároveň má tato verze, největší hustotu. V materiálových listech jsou hodnoty tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity uvedeny pouze v určitých teplotách. Pro následující výpočty byla tedy měrná tepelná kapacita brána jako konstantní a tepelná vodivost jako po částech lineární, vycházející z hodnot v materiálovém listu.

Jak bylo zmíněno v rešeršní části, navrhovaný průtokoměr je teplotního typu. Tyto průtokoměry se ve své nejjednodušší variantě skládají ze dvou elementů: zdroje tepla a měřicího senzoru. Maximální teplota ohřívacího elementu byla již definována, takže je potřeba stanovit formu ohřívacího elementu. Vzhledem k tomu, že škálovaný model smyčky, na kterém by se tento průtokoměr případně testoval, je z plastu, ohřev elektromagnetickou indukcí nemůže být použit. Pro ohřívací element byl tedy zvolen odporový drát. Byl zvolen drát z materiálu Resistohm 135 od firmy Aperam [22]. Jedná se o feritickou slitinu železa, chromu

a hliníku často používanou v topných elementech elektrických pecí a podobných zařízeních. Hodnoty opět vycházejí z materiálových listů. Byla zvolena varianta o průměru 0,5 mm.

Tabulka 4 Materiály ostatních částí smyčky

Materiál	Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$]	Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Měrná tepelná kapacita [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
Hatelloy N	23,6	8860	586
Kaowool S	17,5	128	1130
Rezistohm 135	16,5	725	460

4.3. Výběr simulačního média

Použitím korelací pro vlastnosti soli FLiBe definovaných v předchozí kapitole a vlastností ostatních materiálů byly stanoveny hodnoty podobnostních čísel pro prototypovou soustavu.

Tabulka 5 Podobnostní čísla prototypové smyčky

Pr	Re	Fr	Gr	Sr	Bi	Fo
11,75	$7,05 \cdot 10^3$	0,25	$2,03 \cdot 10^6$	0,08	169,13	$1,45 \cdot 10^{-2}$

Z předchozího výzkumu byly identifikovány teplotnosné oleje jako slibný kandidát na simulační médium pro škálované experimenty roztavených solí [16]. Bylo vybíráno z devatenácti teplotnosných olejů od firmy Eastman Chemical Company. Šlo o oleje z dvou produktových řad:

Tabulka 6 Oleje řady Therminol

VLT	D-12	LT	ADX-10
54	55	SP	XP
59	62	66	68
72	75	VP-3	VP-1

Tabulka 7 Oleje řady Marlotherm

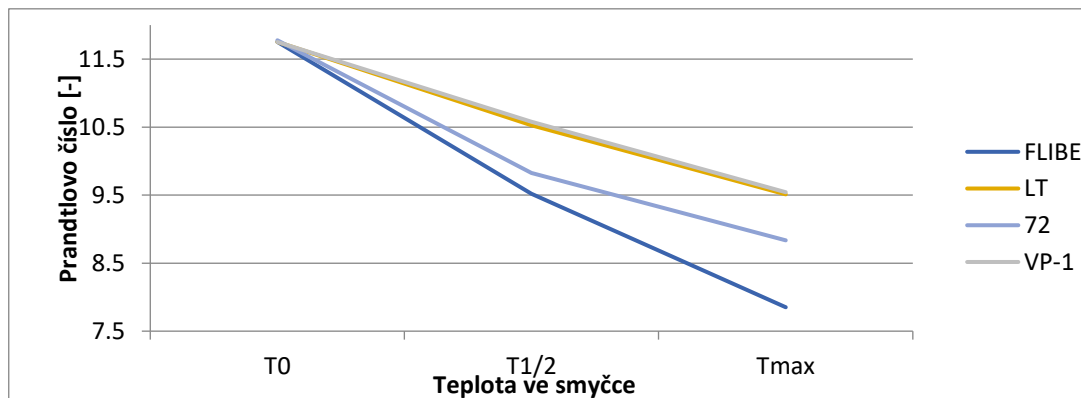
CX	LH	SH
----	----	----

Pro každý z těchto olejů byly získány hodnoty jejich vlastností z materiálové databáze firmy Eastman [23]. Tyto hodnoty byly následně

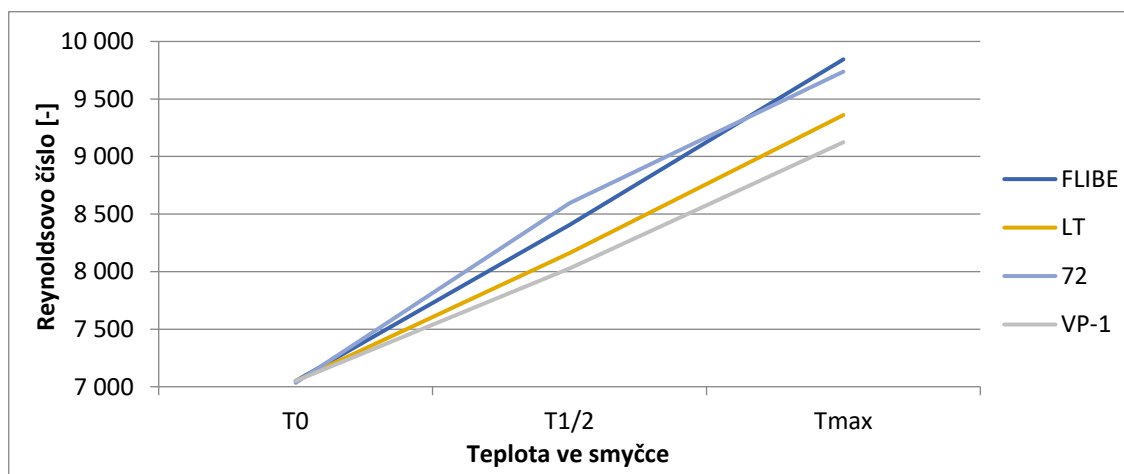
převedeny metodou nejmenších čtverců na polynomy za účelem jednoduššího zpracování dat.

Kvůli praktičnosti byla omezena střední teplota škálovaného modelu na rozsah 25-200 °C. Tím se model vyhne případnému nutnému chlazení na jedné straně a přílišnému ohřívání na straně druhé. Zároveň při provozu smyčky nenastanou problémy s degradací teplotního oleje, která nastává při vyšších teplotách [24]. Pokud při postupném ladění podobnostních čísel některý z olejů vyžadoval nepraktické hodnoty (převážně se jednalo o střední teplotu a geometrický rozměr), byl tento olej eliminován.

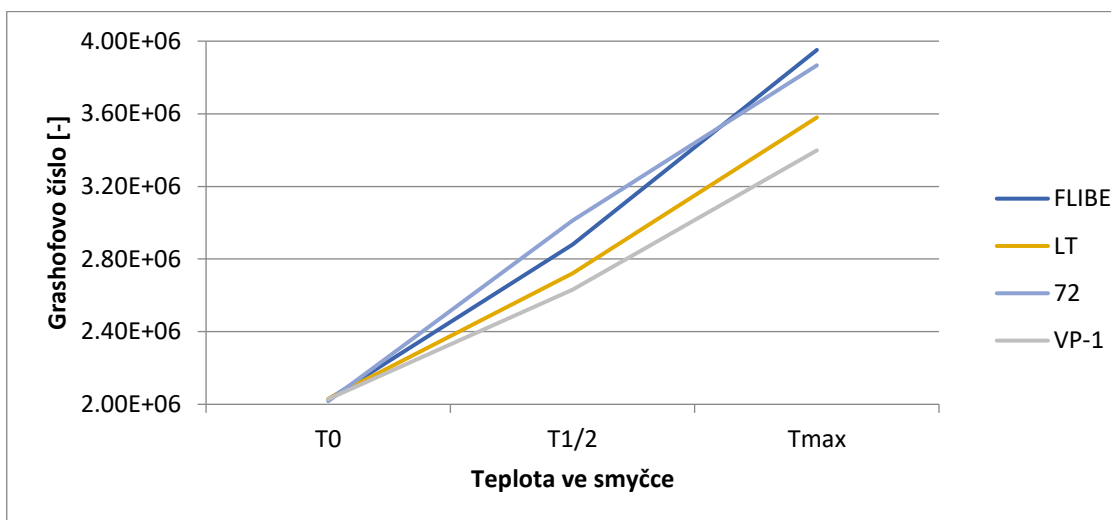
Z osmi olejů, které po sladění podobnostních čísel dávaly praktické hodnoty, pouze tři oleje měly akceptovatelnou odchylku podobnostních čísel, které jsou závislé na teplotě. Vzhledem k principu fungování navrhovaného průtokoměru je důležité, aby simulační olej co nejlépe replikoval chování soli i při ohřívání topným tělesem. Těmito třemi oleji jsou Therminol LT, 72 a VP-1. Velikosti odchylek podobnostních čísel na teplotě ve smyčce jsou vyneseny v následujících grafech.



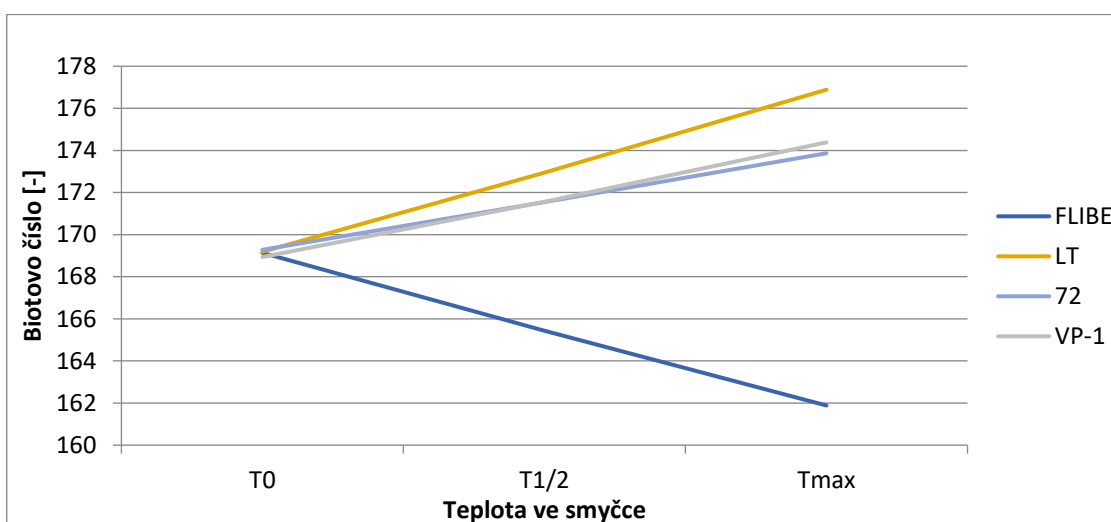
Obrázek 5 Závislost Prandtlova čísla na teplotě ve smyčce



Obrázek 6 Závislost Reynoldsova čísla na teplotě ve smyčce



Obrázek 7 Závislost Grashofova čísla na teplotě ve smyčce



Obrázek 8 Závislost Biotova čísla na teplotě ve smyčce

Na těchto grafech lze pozorovat, že všechny tři oleje se chovají velmi obdobně, ale nejmenší odchylku od chování FLiBe soli má olej Therminol 72. Tento olej velmi dobře replikuje Reynoldsovo a Grashofovo číslo. U Prandtlova a Biotova čísla je jeho odchylka o něco menší než u ostatních dvou. Celkově jsou podobnostní čísla replikována velmi dobře až na Biotovo číslo. To má u FLiBe se zvyšující se teplotou opačný trend oproti olejům. To je způsobeno tepelnou vodivostí, která se zvyšující se teplotou u FLiBe stoupá, a naopak u olejů klesá. Dá se předpokládat, že tyto oleje budou dobrým základem pro funkční škálovaný model prototypové solné smyčky. Pro olej Therminol 72 jsou odchylky těchto teplotně závislých podobnostních čísel maximálně 12 % v případě Prandtlova

čísla při maximálním rozdílu teplot, což je teplota, které olej v praxi nikdy nedosáhne.

4.4. Výběr materiálu škálované smyčky

Stejně jako má každý olej lehce jiné hodnoty nutné pro replikaci prototypové smyčky, vlastnosti materiálu trubky pro škálovaný model jsou pro každý olej také odlišné. Předchozí výzkum opět identifikoval materiály, které mají potenciál být vhodnou náhradou prototypového materiálu. Převážně se jedná o termoplasty a křemenné sklo [16]. Výhoda křemenného skla je zřejmá. Sklo je velmi inertní a teplotně odolný materiál. Navíc průhlednost materiálu umožňuje využití spektrometrů a usnadňuje s vizualizací proudění. Velkou nevýhodou je obtížnost výroby a tím pádem i vysoká cena materiálu. Praktičtější alternativou jsou termoplasty. Hlavními limitacemi termoplastů je jejich maximální provozní teplota, která je mnohem nižší než u skla. Při jejich výběru bude nutné tuto hodnotu brát v potaz, aby se trubka modelu nezačala při provozu tavit. Velikou výhodou termoplastů je jejich velká modifikovatelnost. Přidáváním aditiv a úpravou výrobního procesu lze jednoduše měnit tepelnou vodivost a měrnou tepelnou kapacitu materiálu. Zároveň jsou plasty mnohem jednodušší na výrobu komplikovanějších geometrií.

4.5. Parametry možných smyček

V následující tabulce jsou pro vybrané tři oleje vypsány všechny parametry škálovaného modelu smyčky a vlastnosti materiálu trubky modelu.

Tabulka 8 Srovnání vlastností perspektivních olejů pro návrh smyčky

Typ média	FLiBe	Therminol 72	Therminol LT	Therminol VP-1
Provozní teplota smyčky – T [°C]	700	158,5	28,60	117,5
Teplotní rozdíl ve smyčce – ΔT [°C]	100	26,7	27,4	29,5
Faktor teplotního škálování – $\Delta T_m / \Delta T_p$	-	0,2670	0,2735	0,2950
Průměr trubky – d [mm]	40	16,982	18,846	17,51
Tloušťka stěny – l [mm]	5	2,123	2,356	2,189
Faktor geometrického škálování – L_m / L_p	-	0,42454	0,47115	0,43772
Střední rychlost proudění – u [m/s]	0,5	0,3258	0,3432	0,3308
Faktor škálování rychlosti – u_m / u_p	-	0,65157	0,68640	0,66160
Tepelná vodivost trubky – k [W · m ⁻¹ K ⁻¹]	23,6	2,57	2,6	2,65
Hustota materiálu trubky – ρ [kg/m ³]	8860	1450	1360	1460
Měrná tepelná kapacita trubky – C_p [J · kg ⁻¹ K ⁻¹]	586	1430	1300	1380

Dále jsou vypsány poměry škálovaných podobnostních čísel k prototypovým, velikosti odchylek od perfektního škálování a poměry čerpacích a topných výkonů škálovaného modelu k prototypu. Tento poměr určuje, o kolik jsou ve škálované smyčce nižší nároky na výkon čerpadla a na zdroje tepla ve smyčce. Čerpací výkon je počítán jako,

$$Q_p = \Delta P \cdot \dot{V} = \rho u^3 L^2$$

Kde ΔP Tlakový spád ve smyčce

\dot{V} Objemový průtok smyčkou

Topný výkon je počítán jako,

$$Q_h = \rho C_p \Delta T \cdot \dot{V} = \rho C_p \Delta T u L^2$$

Tabulka 9 Porovnání přesnosti škálování perspektivních olejů

Typ oleje	Therminol 72	Therminol LT	Therminol VP-1
Pr_m/Pr_p	1,002	1,0	1,0
Re_m/Re_p	0,998	1,0	1,0
Fr_m/Fr_p	1,0	1,0	1,0
Gr_m/Gr_p	0,995	1,002	1,001
Fo_m/Fo_p	1,007	1,0	1,0
Bi_m/Bi_p	1,001	1,0	0,999
Sr_m/Sr_p	0,6515	0,6864	0,662
$\Delta Pr_{max} [\%]$	11,1	17,5	17,7
$\Delta Re_{max} [\%]$	1,1	4,9	7,3
$\Delta Gr_{max} [\%]$	2,1	9,4	14,0
$\Delta Bi_{max} [\%]$	6,9	8,5	7,2
Q_{Pm}/Q_{Pp}	0,0245	0,0318	0,0282
Q_{hm}/Q_{hp}	0,0125	0,0142	0,0145

Při výběru jakéhokoliv oleje bude mít škálovaná smyčka přibližně poloviční velikost, rychlosti proudění budou o trochu více než poloviční oproti prototypu a změny teploty ve smyčce budou přibližně čtvrtinové. Zároveň z poměru Strouhalových čísel vyplývá, že transientní jevy budou v modelové smyčce o trochu méně než polovinu rychlejší a také u všech olejů jsou nároky na výkon čerpadel a tepelných zdrojů jen v řádu nízkých jednotek procent prototypové smyčky. Největší rozdíly mezi oleji jsou v jejich provozní teplotě. Therminol 72 představuje nejpřesnější variantu kvůli nejnižším odchylkám podobnostních čísel závislých na teplotě, ale vyžaduje nejvyšší provozní teplotu. Opakem je olej Therminol LT, který má provozní teplotu pouhých 28,5 °C, ale má mnohem vyšší odchylky podobnostních čísel. Olej Therminol VP-1 vyžaduje již relativně velkou teplotu 117,5 °C a oproti oleji LT má nižší odchylky jen u Biotova čísla. Kvůli těmto důvodům se pokračovalo s variantou oleje Therminol 72 kvůli teoreticky nejvyšší přesnosti škálované smyčky, která by poté umožnila přesné experimentální měření navrhovaného průtokoměru. Therminol 72 je teplonosný olej jantarové barvy, který se skládá z difenyl éteru, bifenyly a difenyl benzenu v poměru 45-16-39 %. Jeho teplota tuhnutí je -18 °C, teplota samovznícení je 585 °C a normální bod varu je 271 °C.

4.6. Alternativní zjednodušení škálované smyčky

Značný počet specifických hodnot může být velmi omezující hlavně při výběru správného materiálu pro trubky škálované smyčky. Důvodem je nutnost replikovat dynamiku vedení tepla materiálem trubky, aby byl navrhovaný

průtokoměr funkční. Pokud se od smyčky nevyžaduje replikace přechodových teplotních dějů, zůstane v požadavcích na materiál pouze jeho tepelná vodivost a smyčka se může vyrobit z jiného materiálu, který je lépe dostupný, jednodušší na výrobu anebo levnější. Pouze části, kde jsou přechodové děje důležité je pak zapotřebí výše specifikovaný materiál. Pokud v některých částech smyčky není přenos tepla vůbec důležitý, může být materiál smyčky libovolný a můžeme ho optimalizovat jak z pohledu jednoduchosti výroby, tak i ceny.

5. Rámcový návrh průtokoměru

Průtokoměr se bude skládat z jednoho topného tělesa, jehož délka bude optimalizována, a zatím ještě nezjištěného počtu teplotních čidel umístěných na specifických místech pro co největší přesnost průtokoměru. Navíc byla přidána podmínka maximální délky měření, protože průtokoměr pracuje v některých typech měření s přechodovými stavy, které mohou trvat příliš dlouho, a průtokoměr s příliš dlouhou odezvou má omezenou použitelnost. Tato maximální délka měření byla stanovena jako 30 sekund.

5.1. Způsoby měření průtoku

Existuje mnoho metod, jak pomocí teplotních čidel měřit efekt proudění na rozložení tepla vytvářeného v topném tělese. Všechny jdou ale rozdělit do dvou hlavních skupin: měření teploty a měření transportního času. Ohřívací element může fungovat ve dvou režimech: konstantně zapnutý, nebo zapínání v pulzech. Během jednoho měření průtoku může být použito více měřících metod a jejich kombinací můžeme docílit větší přesnosti. V ideálním případě by navrhovaný průtokoměr měl pro jednoduchost používání fungovat pouze v jednom z režimů topného tělesa a neměl by mezi nimi přepínat. Dále co nejmenší počet teplotních čidel by velmi zjednodušil návrh, a proto by měly být nalezeny pozice čidel, které vyhovují co nejvíce měřícím metodám. Přesnost jednotlivých měřících metod nebude konstantní v průběhu celého spektra průtoků, a proto bude potřeba několika různých měřících metod, které se budou navzájem doplňovat, aby měl průtokoměr co největší rozsah.

5.1.1. Ustálená teplota

Tento způsob měření je nejjednodušší. Topné těleso je zapnuté a v určité vzdálenosti po proudu se měří teplota na povrchu trubky. Předpokládané chování je, že se zvyšujícím se průtokem bude stoupat i teplota po proudu topného tělesa.

5.1.2. Rozdíl ustálených teplot

Toto měření vychází z předchozího způsobu, ale navíc je proti proudu ve stejné vzdálenosti instalováno další teplotní čidlo a porovnávají se rozdíly mezi těmito čidly. Při nulovém průtoku by měly být teploty stejné a se zvyšujícím se průtokem by měla teplota proti proudu klesat a teplota po proudu by se měla zvyšovat.

5.1.3. Transit-time

Při tomto měření topné těleso pracuje v režimu pulzů. V určité vzdálenosti po proudu je teplotní čidlo. Těleso se na krátkou dobu zapne a vytvoří tak teplotní pulz. Měří se čas, který uplyne mezi vypnutím tělesa a detekováním vrcholu

pulzu na pozici čidla. Tento způsob měření má tedy tři proměnné: velikost topného tělesa, délku pulzu a vzdálenost teplotního čidla.

5.1.4. Teplota po fixním čase

Tato metoda vychází z metody ustálené teploty a kombinuje ji s prvky metody Transit-time. Topné těleso je na počátku vypnuté a po proudu je instalováno teplotní čidlo. Těleso se zapne a se zapnutím se začne počítat čas. Po uplynutí předem definovaného času se změří teplota a tato teplota se vyhodnocuje. Tento způsob jde obdobně aplikovat i na metodu rozdílu teplot před a za topným tělesem.

5.1.5. Čas poklesu teploty

Tato metoda měření navazuje na předchozí metodu a je to obdoba metody Transit-time. Poté, co v předchozí metodě uběhne definovaný čas a provede se měření, topné těleso se vypne. Tato metoda měří dobu od vypnutí po první pokles teploty na čidle.

5.1.6. Měření inflexního bodu

Tato metoda opět využívá předchozího režimu topného tělesa, kdy je těleso nejdříve vypnuté a pak se najednou zapne. Po proudu je opět teplotní čidlo. Těleso se zapne a čidlo začne kontinuálně měřit. Protože jde o přechodový jev, průběh teploty na čidle bude mít tvar S-křivky a tím pádem bude mít jeden inflexní bod. Vzhledem k tomu, že tvar přechodové S-křivky bude záviset na průtoku, inflexní bod se s průtokem bude také měnit. U inflexního bodu se dají měřit tři parametry: čas kdy inflexní bod nastal, teplota měřená čidlem v tomto čase a gradient v tomto bodě.

6.CFD simulace

Návrh průtokoměru bude prováděn pomocí CFD simulace v programu Ansys Fluent 2021 R2 vyvinutý společností Ansys Inc. Metoda konečných objemů (CFD – Computational Fluid Dynamics) je způsob numerického modelování proudění tekutin. Během výpočtu je celý řešený příklad nejdříve diskretizován na jednotlivé konečné objemy, ve kterých se následně řeší parciální diferenciální rovnice pomocí numerických metod. Základní fyzikální zákony popisující proudění jsou zákony o zachování hybnosti, hmotnosti a energie. Ty jsou vyjádřeny Navier-Stokesovými rovnicemi.

Návrh průtokoměru bude probíhat ve dvou fázích:

- Zjednodušený axisymetrický 2D model
- 3D model v poloviční symetrii

Ve zjednodušeném 2D modelu proběhne optimalizace velikosti topného tělesa a určení lokace teplotních čidel pro jednotlivé metody měření. Po definování těchto hodnot se vytvoří detailnější 3D model. Na tomto modelu se poté provedou finální simulace, ze kterých se vypočítají finální korelace pro jednotlivé měřicí metody. Výpočty budou prováděny pro vstupní střední rychlosti od 0,02 m/s až po 1,1 m/s. To odpovídá průtokům ve smyčce od 0,0487 kg/s až po 2,679 kg/s. Simulovaných délek topného tělesa bylo 5. Délky tělesa byly v rozmezí od 6 cm do 14 cm s krokem 2 cm.

Tabulka 10 Převod mezi střední rychlostí proudění a průtokem ve smyčce

Rychlost [m/s]	Průtok [kg/s]	Rychlost [m/s]	Průtok [kg/s]	Rychlost [m/s]	Průtok [kg/s]	Rychlost [m/s]	Průtok [kg/s]
0,02	0,0487	0,07	0,170	0,2	0,487	0,7	1,705
0,03	0,0731	0,08	0,195	0,3	0,731	0,8	1,948
0,04	0,0974	0,09	0,219	0,4	0,974	0,9	2,192
0,05	0,122	0,1	0,244	0,5	1,218	1	2,435
0,06	0,146	0,15	0,365	0,6	1,461	1,1	2,679

6.1. 2D simulace

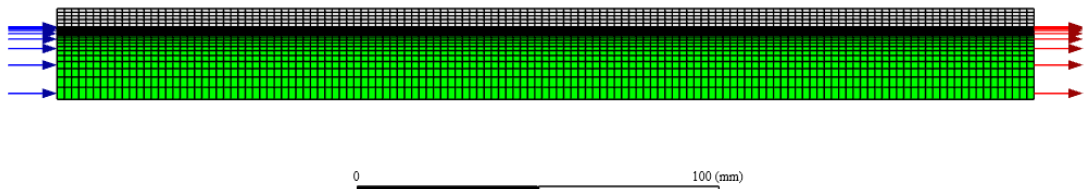
6.1.1. 2D modely průtokoměru

Z 2D modelu bylo eliminováno několik částí. Především se jedná o izolaci okolo trubky, takže 2D model nezohledňuje odvod tepla skrze izolaci do okolí. Vnější stěna trubky je nastavena jako adiabatická stěna. Tímto model méně odpovídá realitě, ale představuje ideální případ, kdy je všechno teplo vytvořené topným tělesem přeneseno do trubky smyčky. Topné těleso také není fyzicky modelováno. Jeho efekt zastává úsek vnější stěny trubky. Efekt ohřevu byl také

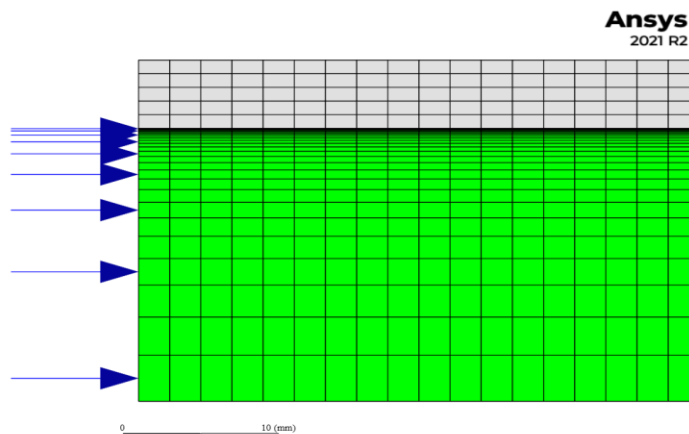
zjednodušen. Místo generace tepla je úsek trubky reprezentující topné těleso nastaven na konstantní teplotu. Tím pádem tento model nesimuluje ani postupný ohřev tělesa při jeho zapnutí a instantně přechází z jeho ustálené teploty na maximální teplotu tělesa, tedy 800 °C. Průtokoměr je axiálně symetrický, takže 2D model této symetrie využívá.

Důležitým jevem, který ovlivňuje chování průtokoměru, je rychlostní profil v měřené tekutině. Je tedy potřeba tento rychlostní profil vytvořit pro každou velikost střední rychlosti. Aby se urychlily výpočetní operace, jsou vytvořeny 2 modely. Prvním modelem je pouze vnitřní část trubky, kde protéká sůl. Délka tohoto modelu jsou 2 metry, což je dostatečná délka, aby se ustálil rychlostní profil na výstupu z tohoto modelu. Takto vytvořený rychlostní profil je následně použit jako vstup pro model průtokoměru, který je v porovnání výrazně menší. Tímto se značně zrychlí výpočty a urychlí se proces návrhu.

Geometrie modelu byla vytvořena podle zadání popsaného v rešeršní části v programu Ansys SpaceClaim 2021 R2. Následně byly tyto geometrie diskretizovány v programu Ansys Meshing 2021 R2. Obě sítě byly vytvořeny jako konformní strukturované sítě. V oblasti trubky je vytvořena uniformní síť o 5 vrstvách. V oblasti tekutiny se tloušťka buněk postupně zmenšuje, aby byly ve výpočtu zachyceny termohydraulické jevy v mezní vrstvě a obzvláště ve vazké podvrstvě přímo u stěny. Velikost y^+ buňky u stěny je 0,4. Síť modelu pro vytvoření rychlostního profilu je stejná jako síť tekutiny v modelu průtokoměru s tím rozdílem, že je delší v ose x a neobsahuje síť trubky.



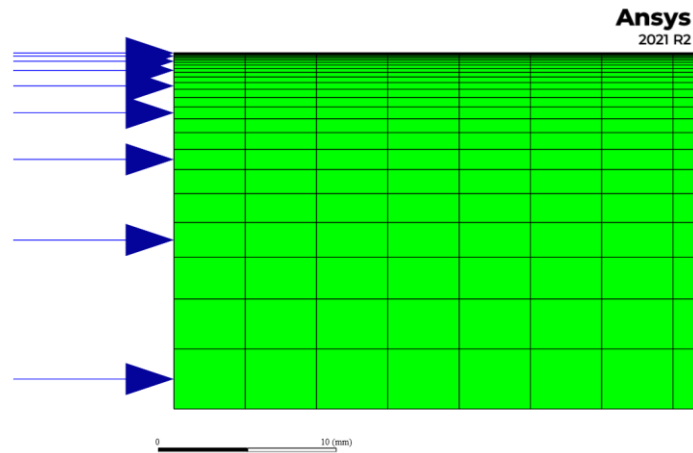
Obrázek 9 Síť prototypového 2D modelu průtokoměru



Obrázek 10 Detail sítě prototypového 2D modelu průtokoměru



Obrázek 11 2D prototypový model pro vytvoření rychlostního profilu



Obrázek 12 Detail sítě prototypového 2D modelu pro vytvoření rychlostního profilu

K těmto modelům byly vytvořeny ekvivalentní modely podle výše popsaných škálovacích parametrů. Výsledky z těchto škálovaných modelů budou srovnány s výsledky z prototypových modelů, a pokud si budou odpovídat, potvrdí se funkčnost škálování minimálně v tomto zjednodušeném systému.

Tabulka 11 Parametry sítě jednotlivých modelů

Verze modelu	Prototypový průtokoměr	Prototypový rozběh	Škálovaný průtokoměr	Škálovaný rozběh
Délka modelu [mm]	270	2 000	114,63	849,08
Počet buněk	4 050	12 500	4 050	12 500
Délka buněk ve směru x [mm]	2	4	0,845	1,7
Počet vrstev buněk v oblasti soli ve směru y	25	25	25	25
Velikost 1. řady buněk [mm]	0,04462	0,04462	0,01894	0,01894
Rychlost růstu (Growth rate)	1,2	1,2	1,2	1,2
Počet vrstev buněk v oblasti trubky ve směru y	5	-	5	-

6.1.2. Okrajové podmínky

Jednou z okrajových podmínek modelu průtokoměru je rychlostní profil na jeho vstupu. Tento profil je potřeba vytvořit pomocí separátního modelu. Tento model má na vstupu definovanou požadovanou vstupní rychlost a po provedení výpočtu se z výstupu vybere profil několika veličin, které poslouží jako vstup u modelu průtokoměru. Tyto veličiny jsou:

- Velikost rychlosti
- Turbulentní kinetická energie k
- Specifická rychlost disipace energie Ω
- Teplota

Tabulka 12 Okrajové podmínky modelu pro tvorbu profilu

Okrajová podmínka	Typ podmínky	Parametr	Hodnota	
Vstup	Velocity inlet	Teplota [°C]	700	
		Rychlost [m/s]	0,02 – 1,1	
		Hydraulický průměr [mm]	40	
		Intenzita turbulence [%]	5	
Výstup	Pressure outlet	Tlak [Pa]	0	
Vnější stěna	Wall	Teplotní podmínka	Heat Flux [W/m ²]	0
Osa	Axis	-	-	

Nastavení okrajových podmínek pro model průtokoměru je obdobné, ale má navíc stěnu mezi solí a vnitřní stěnou trubky.

Tabulka 13 Okrajové podmínky modelu průtokoměru

Okrajová podmínka	Typ podmínky	Parametr	Hodnota	
Vstup	Velocity inlet	Teplota [°C]	Profil	
		Rychlost [m/s]	Profil	
		K [m ² /s ²]	Profil	
		Ω [s ⁻¹]	Profil	
Výstup	Pressure outlet	Tlak [Pa]	0	
Vnější stěna trubky	Wall	Teplotní podmínka	Heat Flux [W/m ²]	0
Vnitřní stěna trubky	Wall	Teplotní podmínka	Coupled	
Topné těleso	Wall	Teplotní podmínka	Temperature [°C]	800
Osa	Axis	-	-	

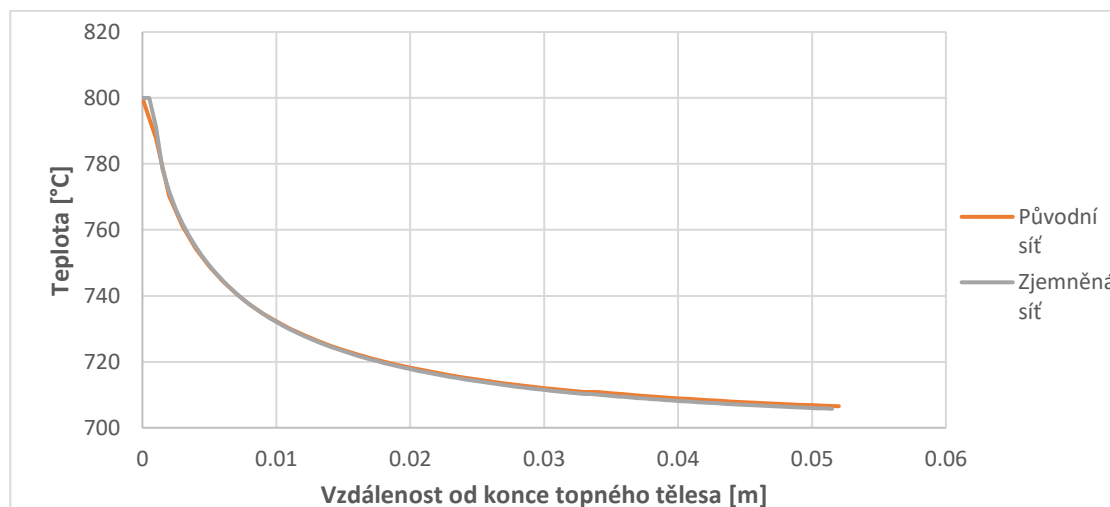
6.1.3. Nastavení parametrů řešiče

Podrelaxační faktory zůstaly nezměněny z výchozího nastavení programu, protože nenastaly problémy s dosažením konvergence. Podmínky konvergence také zůstaly na výchozí hodnotě 0,001 a 1E-6, protože při zpřísnění podmínek nebyly pozorovány výrazné změny. Parametry řešiče jsou vypsané v následující tabulce.

Přesnost	Double precision	
Výpočetní numerické schéma	Pressure-based	
Čas	Steady/Transient	
2D prostor	Axisymmetric	
Model energie	Ano (Rovnice zachování energie)	
Model proudění	k- Ω SST	
Vazba tlak-rychlost	Model Coupled	
Diskretizace	Interpolační schéma gradientu	Metoda nejmenších čtverců
	Interpolační schéma tlaku	2. řádu
	Formulace přechodových stavů	Implicitní 1. řádu

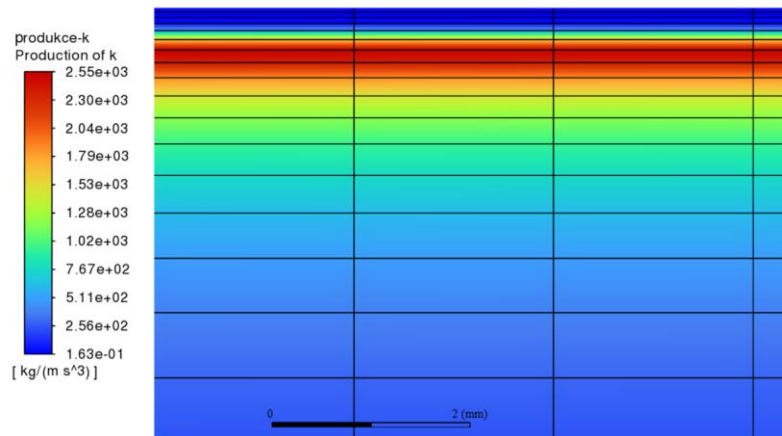
6.1.4. Citlivostní analýza výpočtové sítě

Po vytvoření těchto sítí je potřeba na nich provést citlivostní analýzu pro ověření funkčnosti simulace. Za tímto účelem byla celá síť zjemněna, takže nová síť měla čtyřikrát více buněk.

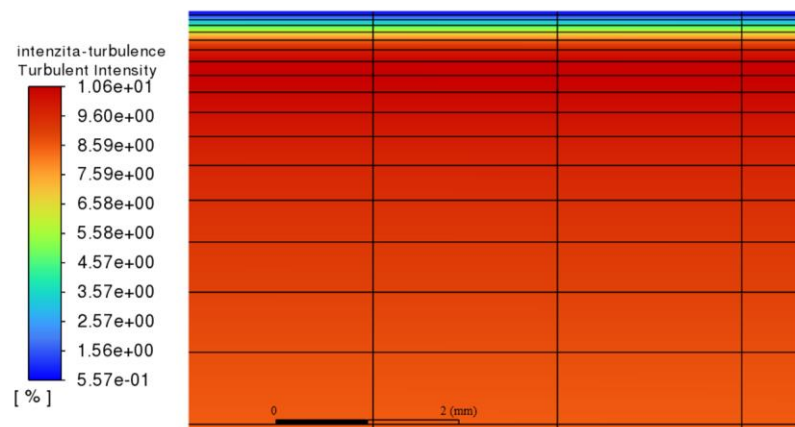


Obrázek 13 Porovnání teplotních profilů původní a zjemněné sítě

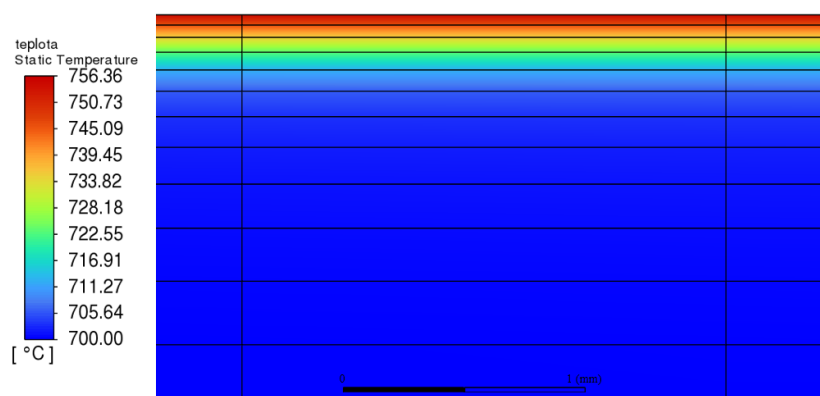
Z grafu je vidět, že se zjemněním sítě nedochází k výrazné změně. Rozdíl teplot 5 cm za koncem topného tělesa je pouhých 0,4 °C. Dále je potřeba ověřit, zda síť dokáže pokrýt termohydraulické jevy u stěny.



Obrázek 14 Produkce turbulentní kinetické energie u stěny při rychlosti 1,1 m/s



Obrázek 15 Intenzita turbulence u stěny při rychlosti 1,1 m/s

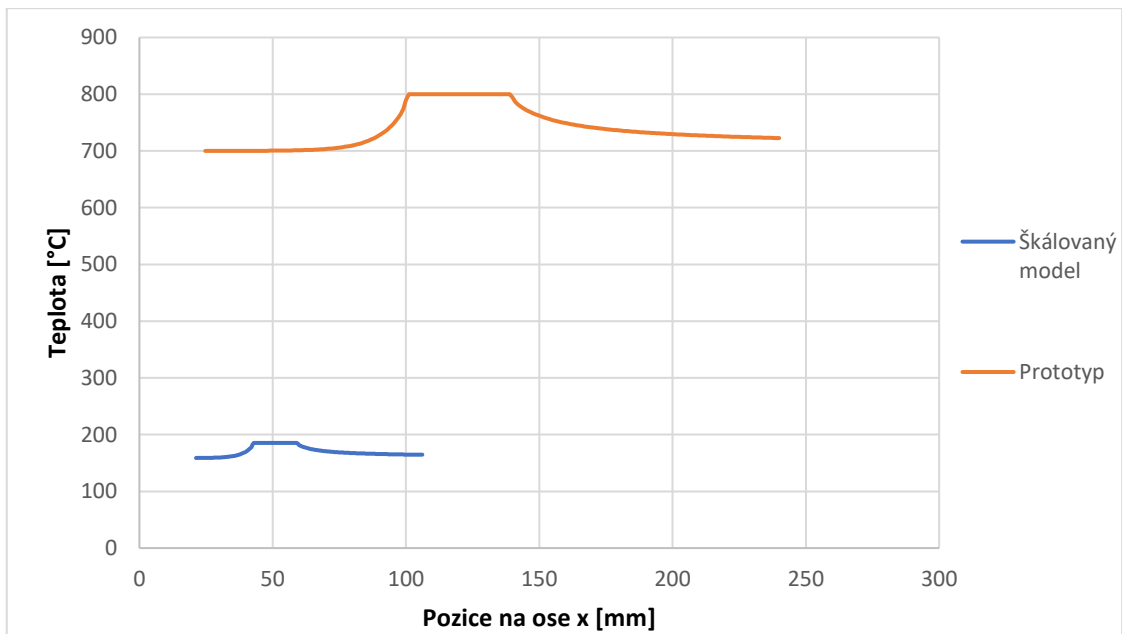


Obrázek 16 Teplota soli u stěny trubky pod topným tělesem při rychlosti 1,1 m/s

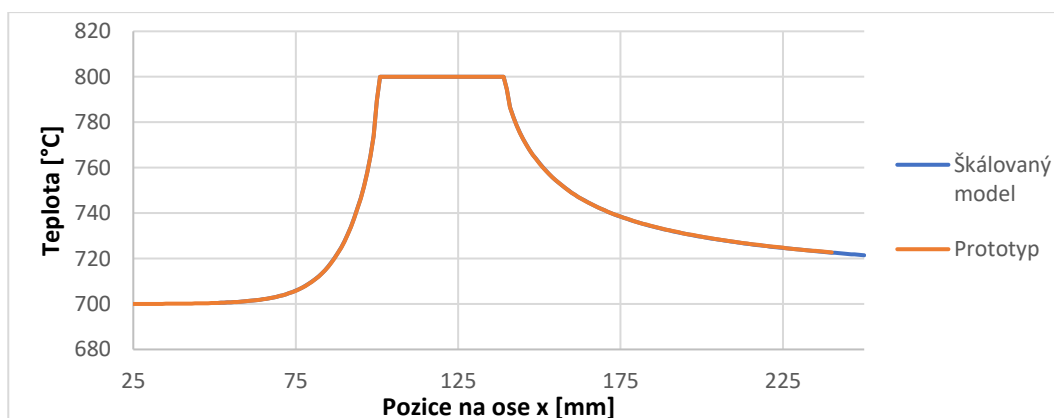
Jak je z obrázků vidět, jemnost originální sítě u stěny je dostatečně vysoká, aby byly gradienty veličin, jako například produkce turbulentní energie popsány přes několik vrstev buněk. Tato síť tedy může být použita pro výpočty. Zjemněná síť, nezpřesňuje výsledky simulace natolik, aby se vyplatil delší výpočetní čas, který je přibližně o polovinu delší než u originální sítě.

6.1.5. Ověření funkčnosti škálovaného modelu

Pro ověření fungování škálovaného modelu byly provedeny výpočty pro případ se střední rychlostí proudění 0,9 m/s. První výpočet byl pro ustálený stav zapnutého topného tělesa. Druhý výpočet simuluje prvních 20 sekund přechodového stavu zapnutí topného tělesa.

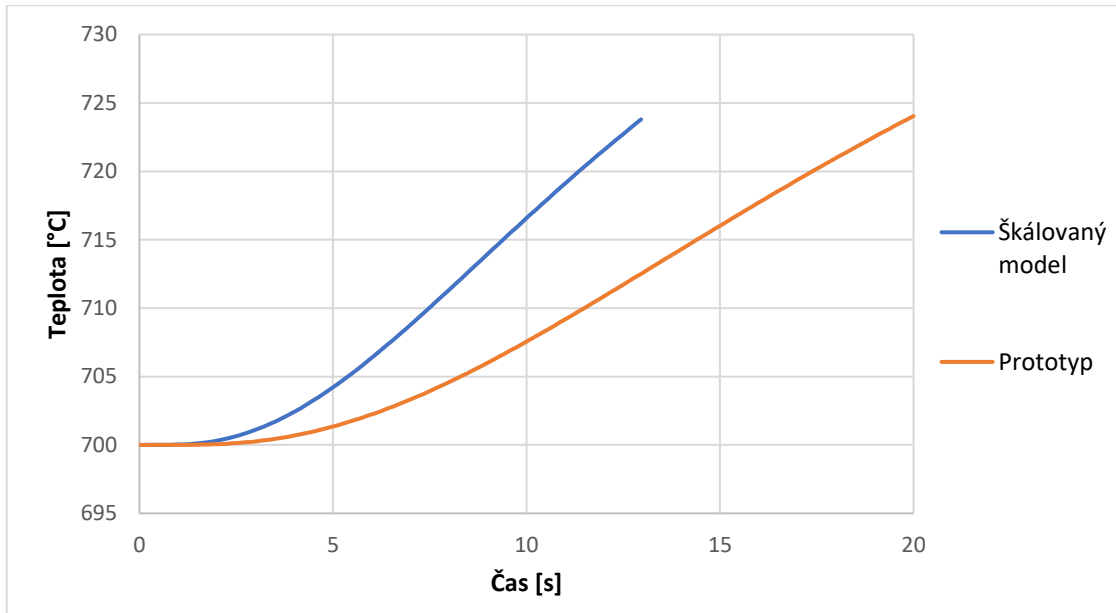


Obrázek 17 Teplotní rozdělení v okolí topného tělesa pro rychlost 0,9 m/s

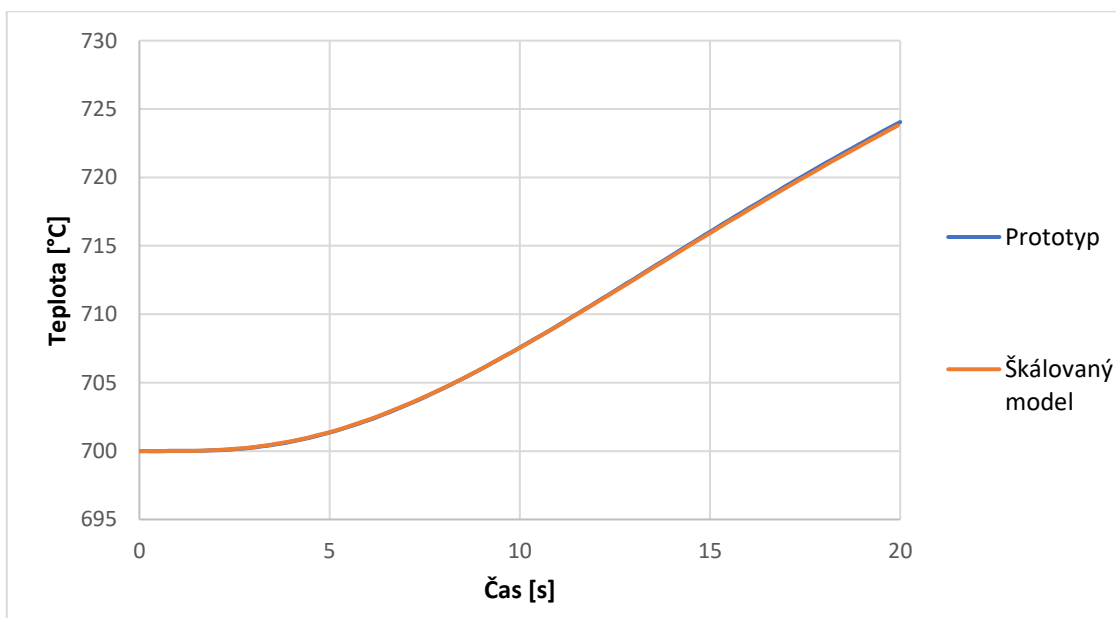


Obrázek 18 Teplotní rozdělení v okolí topného tělesa pro rychlost 0,9 m/s po korekcích

Obrázek 18 ukazuje původní teplotní rozdělení v okolí topného tělesa u prototypu a u škálovaného modelu. Po provedení korekcí křivka modelu téměř přesně kopíruje prototyp, jak je vidět na Obrázek 18. Tímto se potvrzuje funkčnost škálovaného modelu v ustálených stavech. Maximální odchylka teplot byla 0,15 °C. Její průměrná hodnota byla 0,043 °C.



Obrázek 19 Průběh teploty po zapnutí topného tělesa při rychlosti 0,9 m/s



Obrázek 20 Průběh teploty po zapnutí topného tělesa při rychlosti 0,9 m/s po započítání časové akcelerace modelu

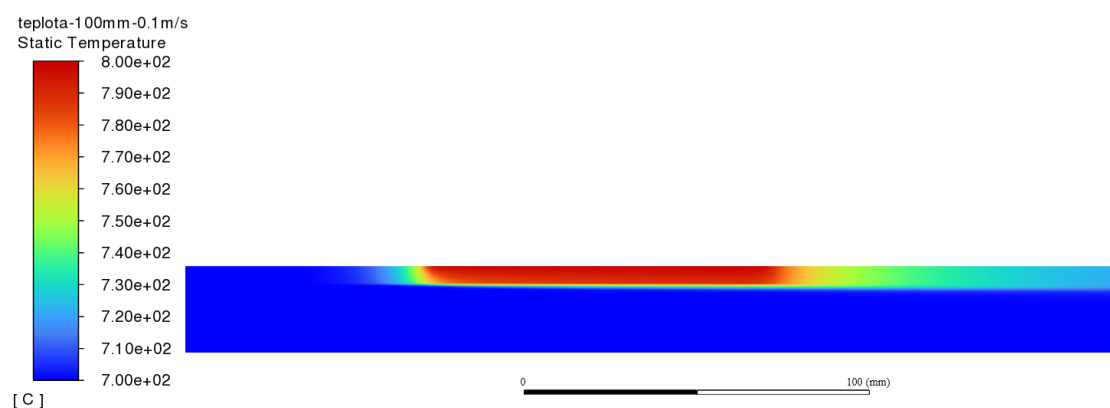
Obrázek 19 ukazuje časový průběh teploty v bodě 2 cm po proudu od konce topného tělesa pro prototyp a škálovaný model po provedení korekcí. Po započítání korekce časové akcelerace ve škálovaném modelu je vidět, že křivka modelu téměř přesně kopíruje prototyp. Je tedy potvrzena funkčnost škálovaného modelu v přechodových stavech a tím pádem je potvrzena funkčnost navrženého škálovaného modelu. Odchyšky teplot škálovaného a prototypového modelu v přechodovém stavu byly téměř stejně velké jako ve stacionárním výpočtu.

Škálovaný model v obou případech téměř přesně kopíruje chování prototypu. Nicméně těchto „ideálních“ výsledků bylo dosaženo v systému značně zjednodušeného 2D modelu. Dá se očekávat, že takto přesnou korelaci po přechodu na podrobnější 3D model nezískáme. Tyto výsledky ovšem naznačují, že by škálovaný model mohl uspokojivě fungovat i při podrobnější simulaci.

6.1.6. Výsledky 2D simulace

Výpočty byly prováděny na výpočetní stanici vybavené 16 jádrovým procesorem AMD Ryzen 5950X s frekvencí jádra 3,4 – 4,9 GHz a operační pamětí 64 GB.

Pro každou měřicí metodu byla provedena série výpočtů kombinující všechny střední rychlosti proudění a délky topného tělesa. Celkově šlo o 150 výpočtů, z nichž 50 bylo v ustáleném stavu a zbylých 100 bylo v přechodovém stavu. Po provedení všech výpočtů byla výsledná data extrahována a zpracována v programu Python a Excel. Typický výsledek výpočtu je ukázán na následujícím obrázku.

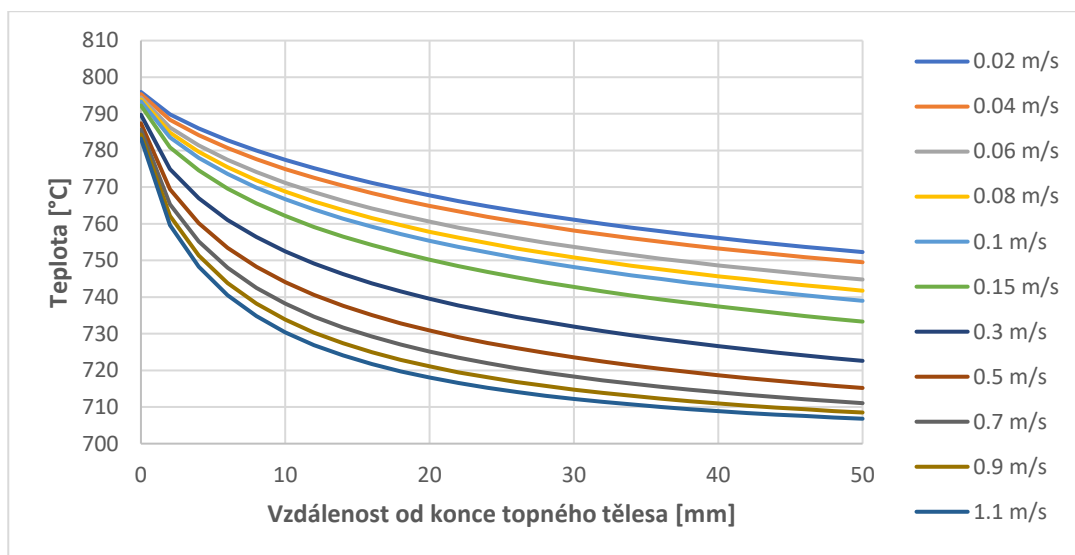


Obrázek 21 Výsledek výpočtu pro ustálený stav s délkou topného tělesa 100 mm a střední rychlostí proudění 0,1 m/s

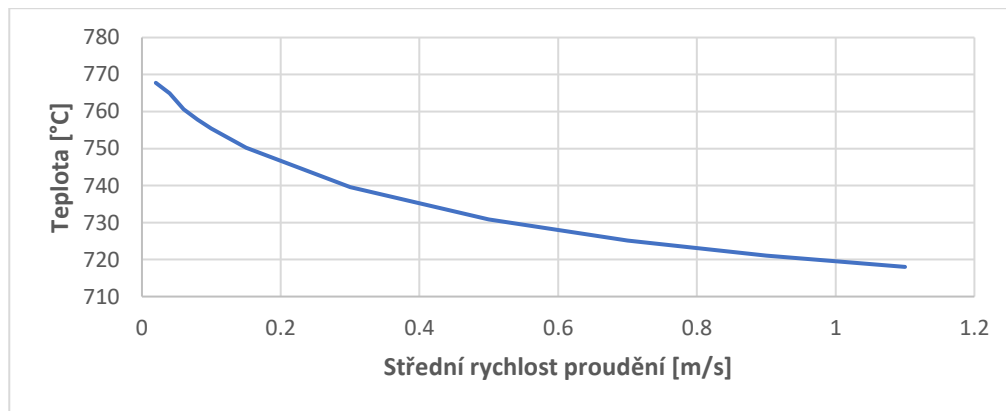
Metodika optimalizace je vysvětlena v následující kapitole a další kapitoly popisují specifika, která nastala při hledání optimálního řešení u určitých měřících metod.

6.1.6.1. Ustálená teplota

Pro metodu měření ustálené teploty byla identifikována jedna oblast trendu závislosti pro celý rozsah počítaných středních rychlostí. Optimální vzdálenost teplotního čidla byla určena jako místo s největším rozdílem teplot mezi největší a nejmenší rychlostí.

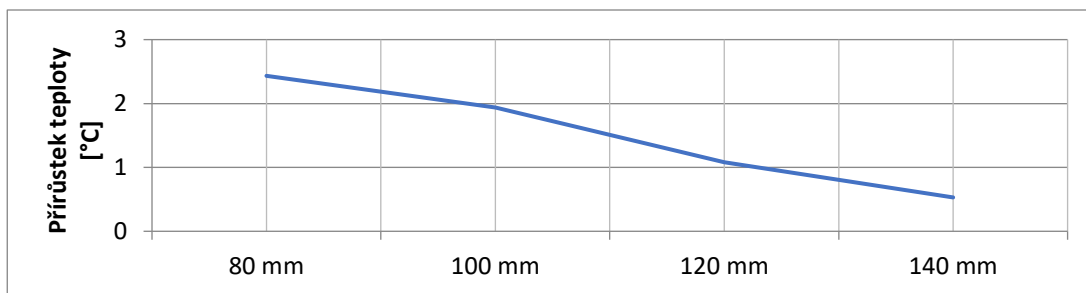


Obrázek 22 Teplota za topným tělesem v ustáleném stavu



Obrázek 23 Závislost teploty v bodě na rychlosti

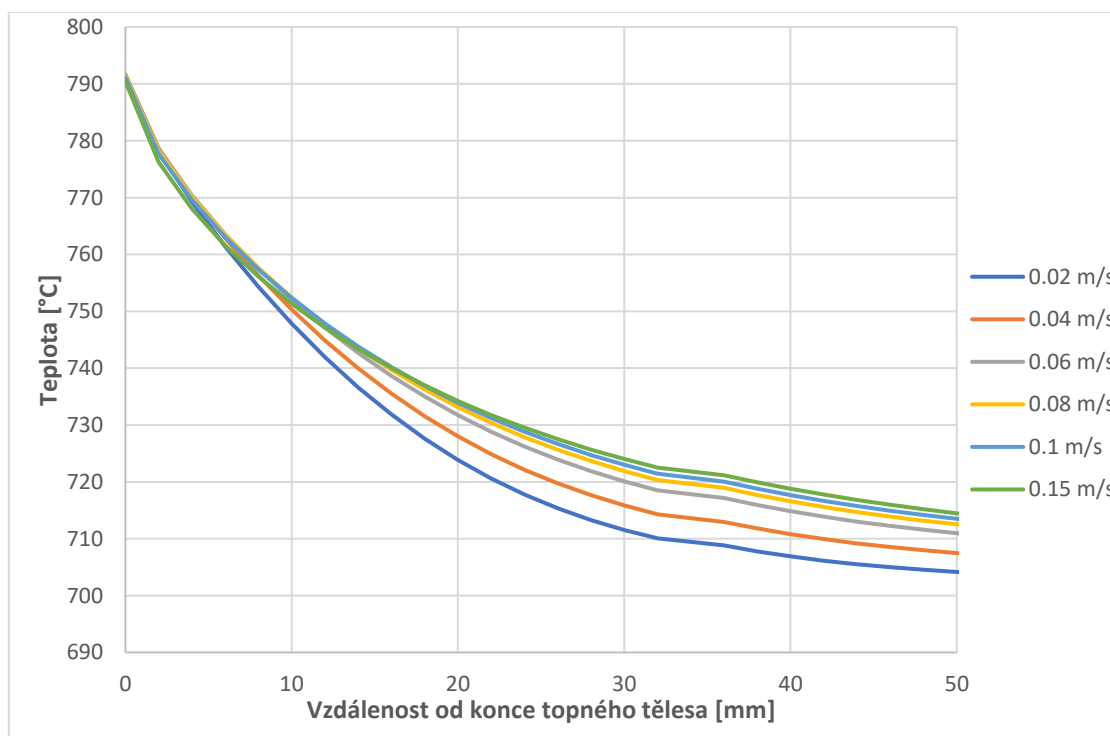
Optimální délku topného tělesa nejde určit jako specifickou hodnotou. Se zvětšující se délkou tělesa se také zvětšuje maximální rozdíl teplot v měřeném rozsahu. Tento nárůst rozdílu se limitně snižuje. Musí se tedy určit hranice přírůstku teploty, která je považována za dostatečně nízkou. Tato hranice byla stanovena jako +1 °C v rozsahu teplot při prodloužení o 20 mm.



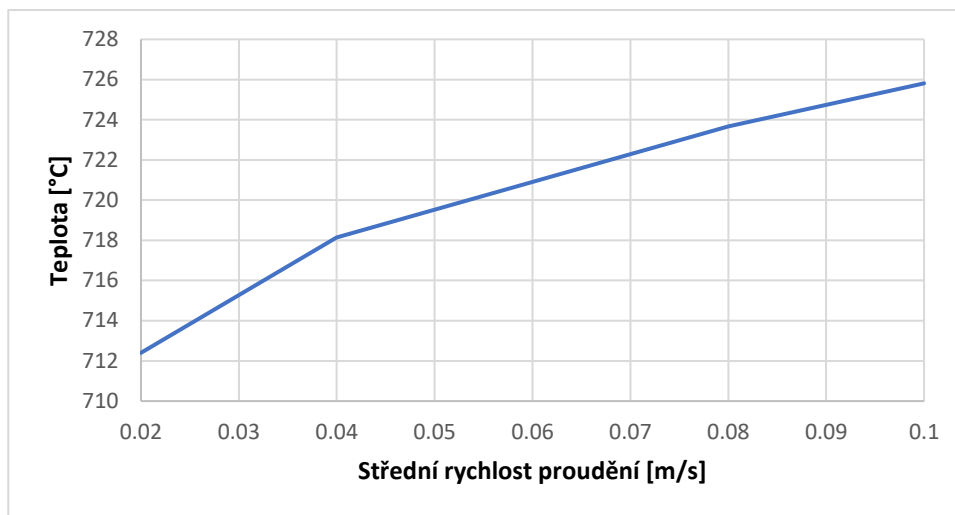
Obrázek 24 Přírůstek teploty se zvětšujícím se topným tělesem

6.1.6.2. Teplota po fixním čase

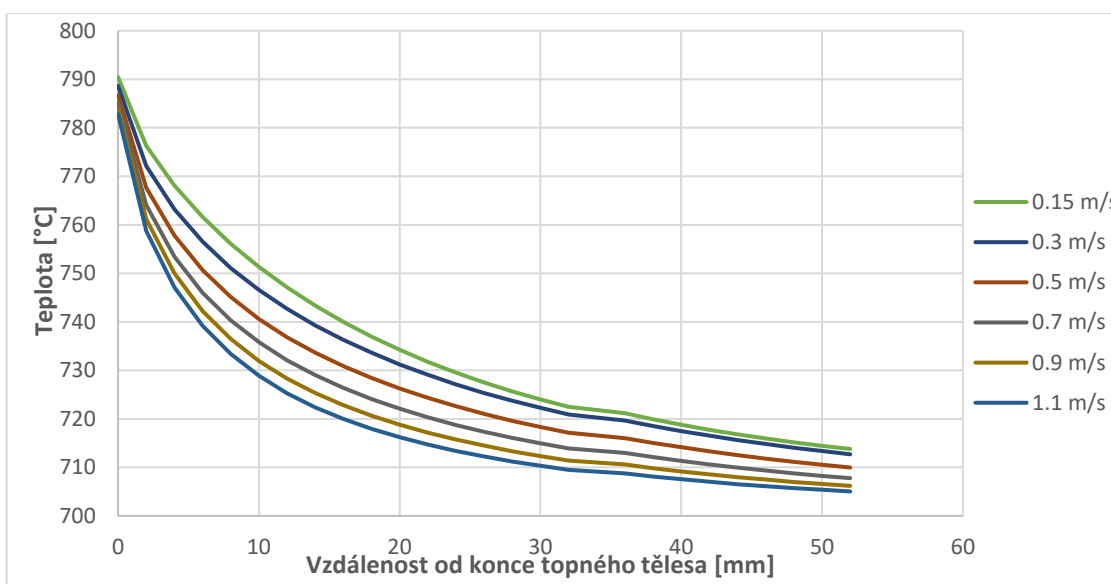
Pro tento způsob měření bylo nejdříve potřeba určit optimální fixní časový úsek, po kterém se má teplota změřit. Z dat vyplynulo, že tato doba je příliš dlouhá, a proto byl tento čas stanoven jako výše definované maximum 30 sekund. Byly identifikovány 2 oblasti trendu závislosti teploty na rychlosti proudění. Tyto oblasti korelují s oblastmi laminárního a turbulentního proudění uvnitř trubky. Pro každou oblast byla zvlášť určena optimální vzdálenost teplotního čidla.



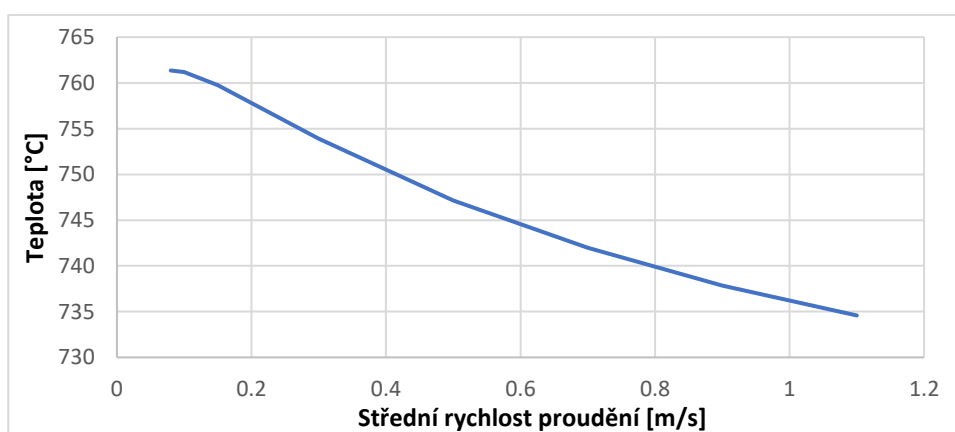
Obrázek 25 Teplota za topným tělesem po fixním čase pro nižší rychlosti



Obrázek 26 První závislost teploty na střední rychlosti



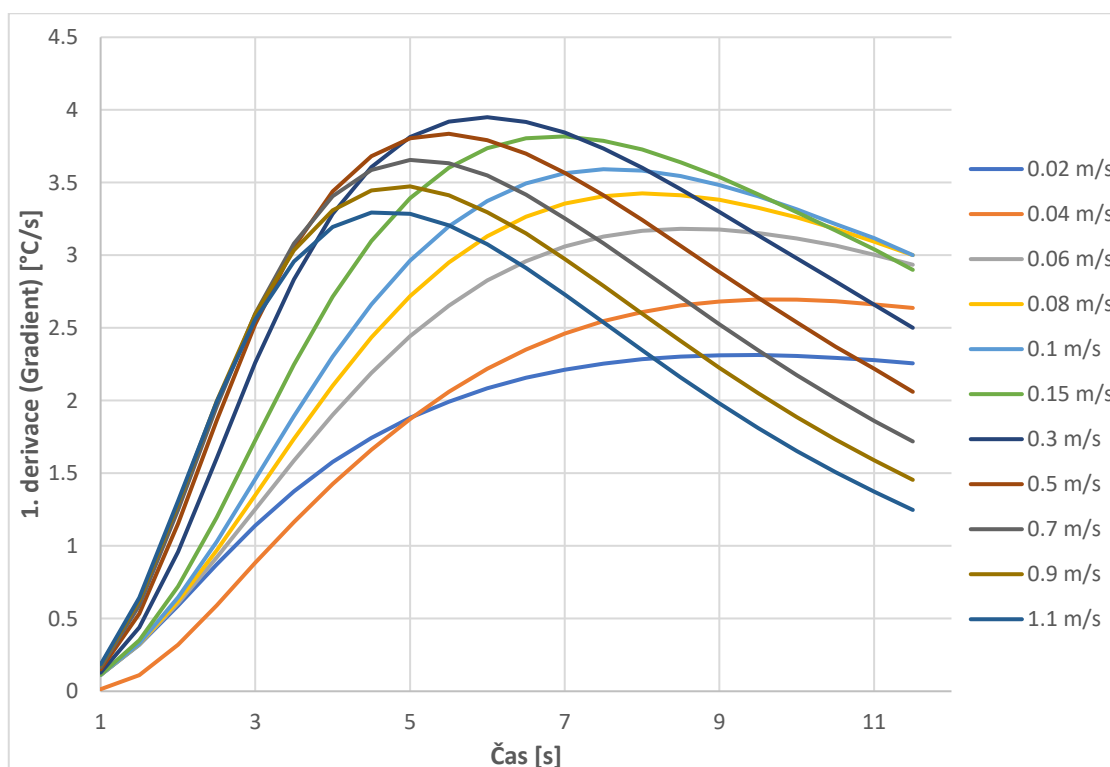
Obrázek 27 Teplota za topným tělesem po fixním čase pro vyšší rychlosti



Obrázek 28 Druhá závislost teploty na střední rychlosti

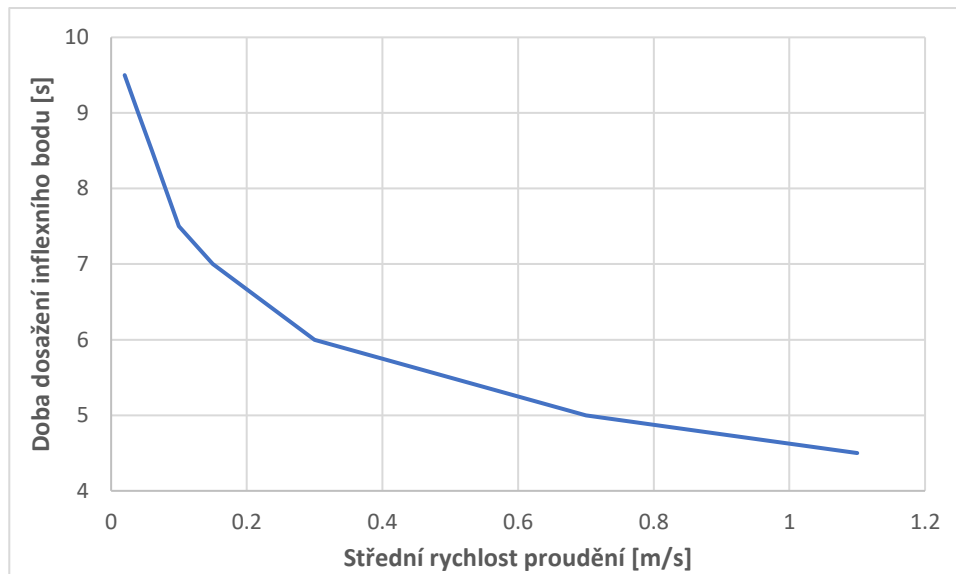
6.1.6.3. Měření času k dosažení inflexního bodu

Pro následující tři metody měření se po zapnutí topného tělesa průběžně měří teplota. Z tohoto průběhu se následně časovou derivací určí velikost gradientu. Všechny tři způsoby vycházejí z jednoho měřeného bodu. Je zapotřebí co nejpřesněji určit dobu, kdy nastal inflexní bod. Délka tělesa v tomto nehrála zásadní roli. Jako nejdůležitější se ukázala pozice teplotního čidla a byla identifikována oblast, kde maximum gradientu je co nejjasněji definovatelné. S klesající rychlostí proudění je maximum gradientu méně výrazné, takže se může stát, že při reálném měření se toto maximum ztratí v nepřesnosti měření. Z praktického hlediska jsou pravděpodobně tyto tři metody vhodnější pro vyšší průtoky.



Obrázek 29 Hodnota první derivace teploty v čase po zapnutí topného tělesa

Metoda identifikování času inflexního bodu má jeden trend postupně se snižujícího času pro zvětšující se průtoky.



Obrázek 30 Závislost času do dosažení inflexního bodu na střední rychlosti

6.1.7. Výsledky optimalizace

Níže přiložená tabulka popisuje optimální délky a vzdálenosti teplotních čidel od okraje topného tělesa pro jednotlivé metody měření.

Tabulka 14 Výpis optimálních hodnot pro jednotlivé měřící metody

Měřící metoda	Optimální délka topného tělesa [mm]	Optimální vzdálenost teplotního čidla [mm]
Ustálená teplota	120+	20
Ustálený rozdíl teplot	120+	32
Transit-time	60+	Podle přesnosti čidla
Teplota po fixním čase	100+	8+/30+
Rozdíl teplot po fixním čase	80+	18+
Čas prvního poklesu teploty	60+	10-15
Čas inflexního bodu	-	10-20
Teplota inflexního bodu	100+	10-20
Gradient inflexního bodu	-	10-20

Výsledná délka topného tělesa, která splňuje stanovený požadavek u každé měřící metody je 120 mm. Měřící čidla, která byla blízko u sebe, byla sjednocena tak, aby vyhovovala co nejlépe měřícím metodám, které je budou používat. Počet teplotních čidel je 5. Dvě z nich byla umístěna před topným tělesem pro metody měření rozdílů teplot. Finální návrh je popsán v následující tabulce.

Tabulka 15 Finální rozměry průtokoměru

Délka topného tělesa	Pozice 1. Teplotního čidla	Pozice 2. Teplotního čidla	Pozice 3. Teplotního čidla	Pozice 4. Teplotního čidla	Pozice 5. Teplotního čidla
120 [mm]	+10 [mm]	+20 [mm]	+35 [mm]	-20 [mm]	-35 [mm]

6.2. 3D simulace

Když je nyní určena velikost topného tělesa a pozice teplotních čidel, může se pokračovat s vytvářením finálního 3D modelu průtokoměru. Tento model je oproti 2D modelu přesnější a jeho výpočty by měly lépe reprezentovat reálné termohydraulické chování soustavy. Topné těleso na rozdíl od 2D modelu již není zastoupeno jen okrajovou podmínkou, ale je modelováno jako samostatná část. Model také počítá s vnějším silovým polem gravitace. Směr působení gravitace je v ose $-Y$ a je o velikosti $9,81 \text{ m/s}^2$. Protože je průtokoměr symetrický, je modelována pouze polovina průtokoměru symetrická k rovině XY . Dále je modelována vnější izolace, kterou jsou trubky solných smyček obaleny. Izolace plně překrývá jak trubku smyčky, tak topné těleso samotné.

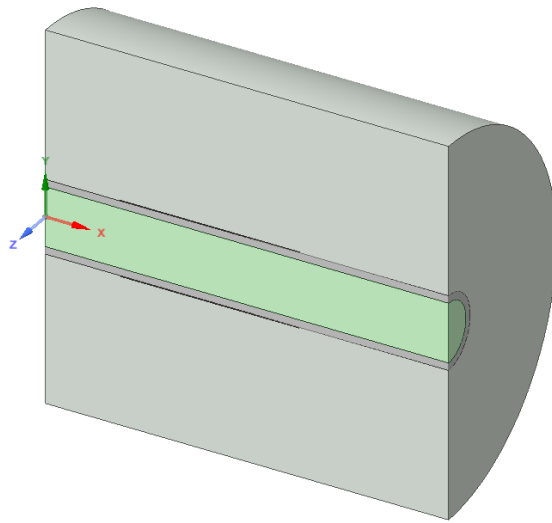
6.2.1. Limitace 3D modelů

Vytvořené 3D modely jsou mnohem detailnější než předchozí 2D modely, ale oproti reálnému experimentu bylo použito několika zjednodušení pro usnadnění simulace. Prvním zjednodušením je nepočítání přenosu tepla zářením. Přenos tepla zářením hraje uvnitř soli, trubky a izolace jen malou roli. Záření se nejvíce projevuje na vnější straně izolace směřující do okolí, kde zahřátá izolace vyzařuje teplo ven do okolního prostoru. Tento chybějící efekt byl kompenzován navýšením hodnotou konvektivní ztráty tepla do okolí zvětšením součinitele přestupu tepla při nastavování okrajové podmínky na vnější stěně izolace. Jednotlivá teplotní čidla nebyla fyzicky modelována, ale byla nahrazena měřícími body. Topné těleso sice již fyzicky modelováno je, ale je zjednodušené na tvar trubky o tloušťce odporového drátu (0,5mm) umístěné na vnější stěně trubky. Ohřev topného tělesa byl také zjednodušen. Podobně jako ve 2D modelu, vnější plochy topného tělesa byly nastaveny jako stěna o konstantní teplotě. Tento model tedy počítá se situací, kdy je odporový drát držen na konstantní teplotě. Zároveň je jeho zapnutí skokové.

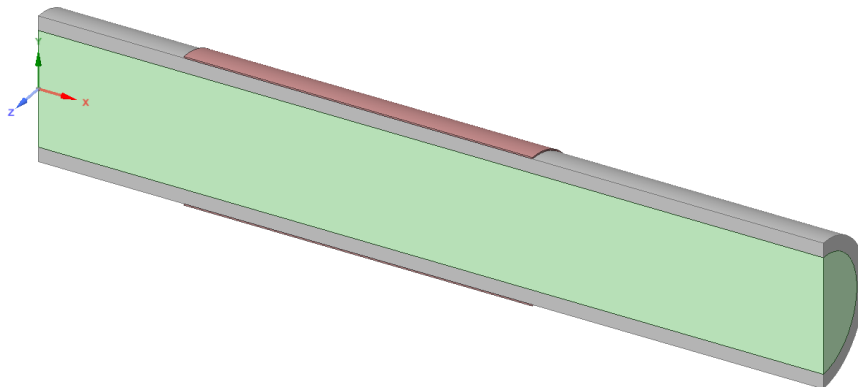
6.2.2. 3D modely průtokoměru

Stejně jako v případě 2D modelů, i u 3D modelů byly vytvořeny čtyři modely: prototypový model průtokoměru, prototypový model pro vytváření rychlostního profilu, škálovaný model průtokoměru a škálovaný model pro vytvoření rychlostního profilu. Geometrie byla vytvořena v programu Ansys SpaceClaim

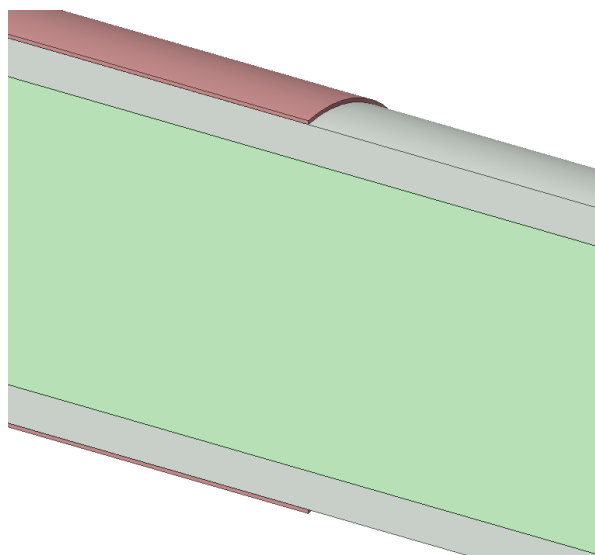
2021 R2. Modelovaná trubka, na které je průtokoměr umístěn, je dlouhá 270 mm. Tloušťka izolace je 100 mm. Níže přiložené obrázky ukazují vytvořený model průtokoměru i s detailem na vymodelované topné těleso.



Obrázek 31 Geometrie modelu průtokoměru



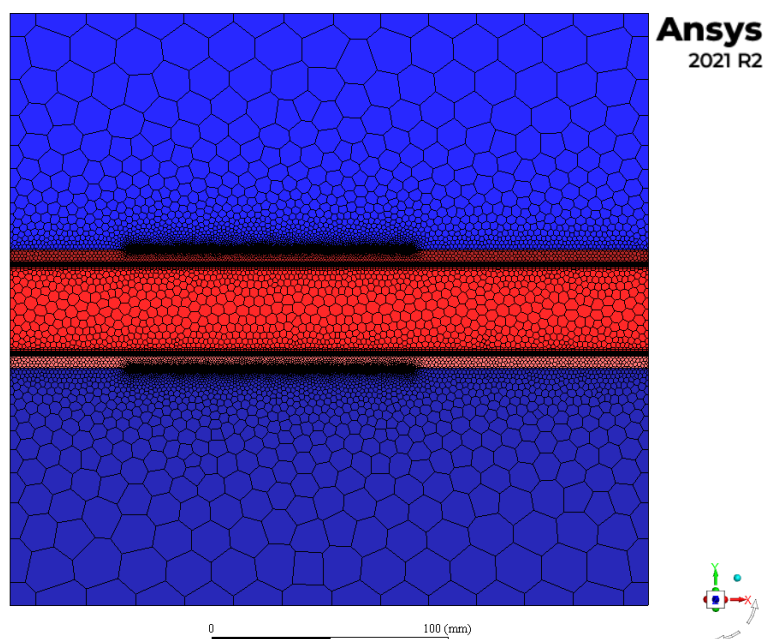
Obrázek 32 Geometrie průtokoměru bez izolace



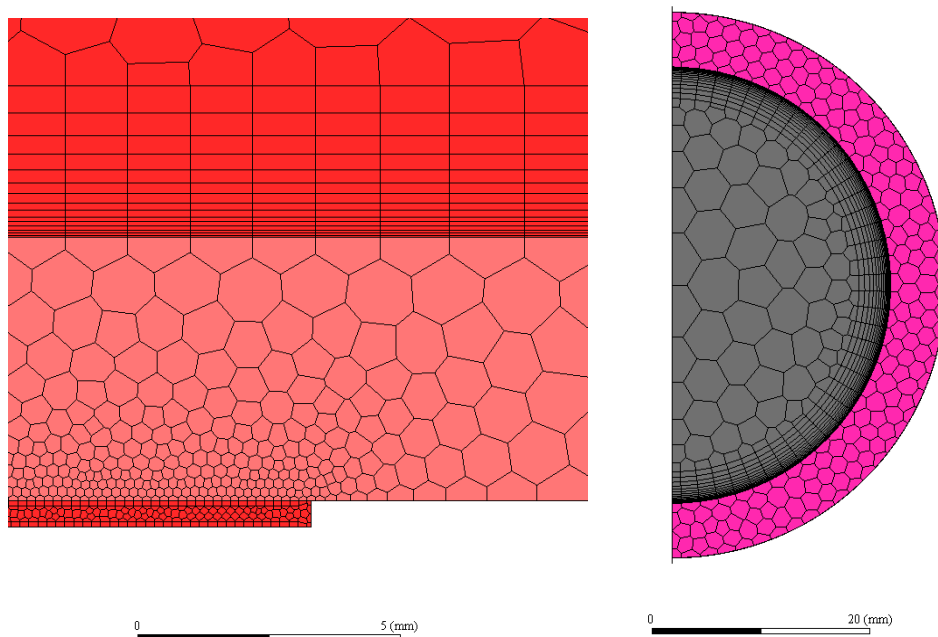
Obrázek 33 Detail realizace modelu topného tělesa

6.2.3. CFD sítě a jejich parametry

Vytvořená geometrie byla diskretizována pomocí programu Ansys Fluent Meshing 2021 R2. Hodnoty použité při vytváření sítě jsou vypsány v příložené tabulce. Pro zajištění podmínky minimálně 3 buněk mezi stěnami byla na stěny topného tělesa přidána 1 prismatická vrstva buněk o tloušťce 0,15 mm. Síť pro vytvoření rychlostního profilu má stejné parametry jako vnitřek trubky průtokoměru, ale je 2 000 mm dlouhá.



Obrázek 34 Celá síť průtokoměru včetně izolace



Obrázek 35 Detail sítě na okraji topného tělesa a u stěny

Tabulka 16 Parametry objemové sítě průtokoměru

Počet buněk	513 574
Minimální ortogonální kvalita	0,1103
Maximální Aspect ratio	67,1
Hodnota Y^+	0,73
Maximální velikost buněk [mm]	20
Minimální velikost buněk [mm]	0,15
Growth rate	1,2
Velikost první vrstvy	0,0545
Počet vrstev	15

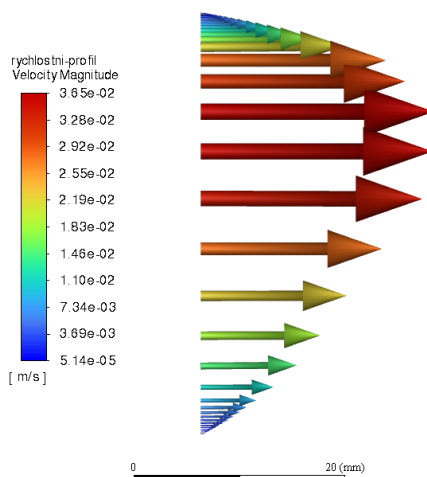
6.2.4. Okrajové podmínky

Stejně jako u 2D modelu, na vstupu do modelu průtokoměru je již vytvořený rychlostní profil získaný ze separátního modelu. Na výstupu z rozběhového modelu jsou zaznamenávány profily těchto veličin:

- Velikost rychlosti
- Turbulentní kinetická energie k
- Specifická rychlost disipace energie Ω
- Teplota

Protože tento 3D model již počítá se ztrátou tepla do okolí, je potřeba tento fakt zohlednit už při vytváření rychlostních profilů pro vstup do průtokoměru. Během

proudění ve smyčce se sůl nacházející se u stěny postupně ochlazuje. Tím se mění její hustota, a to má poté za následek klesání této studenější soli ke spodní části trubky. Dochází tak ke zdeformování originálního rychlostního profilu. Tento efekt je nejznatelnější u velmi nízkých průtoků. Vytvořený rychlostní profil pak vypadá například takto:



Obrázek 36 Zdeformovaný rychlostní profil následkem nehomogenní hustoty soli v trubce

Model pro vytváření rychlostního profilu má na vnější stěně nastavenou podmínku tepelného toku o hodnotě $2\,000\text{ W/m}^2$ za účelem vytvoření rychlostních profilů zdeformovaných nehomogenitou hustoty.

Tabulka 17 Okrajové podmínky modelu pro tvorbu profilu

Okrajová podmínka	Typ podmínky	Parametr	Hodnota	
Vstup	Velocity inlet	Teplota [°C]	700	
		Rychlost [m/s]	0,02 – 1,1	
		Hydraulický průměr [mm]	40	
		Intenzita turbulence [%]	5	
Výstup	Pressure outlet	Tlak [Pa]	0	
Vnější stěna	Wall	Teplotní podmínka	Heat Flux [W/m ²]	2 000
Symetrie	Symmetry	-	-	

Nastavení okrajových podmínek pro model průtokoměru je obdobné, ale má navíc vnitřní stěny a stěny topného tělesa

Tabulka 18 Okrajové podmínky modelu průtokoměru

Okrajová podmínka	Typ podmínky	Parametr	Hodnota		
Vstup	Velocity inlet	Teplota [°C]	Profil		
		Rychlost [m/s]	Profil		
		K [m ² /s ²]	Profil		
		Ω [s ⁻¹]	Profil		
Výstup	Pressure outlet	Tlak [Pa]	0		
Vnější stěna izolace	Wall	Teplotní podmínka	Convection	Koeficient přestupu tepla [W/m ² K]	10
				Teplota neovlivněného proudu [°C]	20
Topné těleso	Wall	Teplotní podmínka	Temperature [°C]	800	
Vnitřní stěny	Wall	Teplotní podmínka	Coupled		
Symetrie	Symmetry	-	-		

6.2.5. Nastavení parametrů řešiče

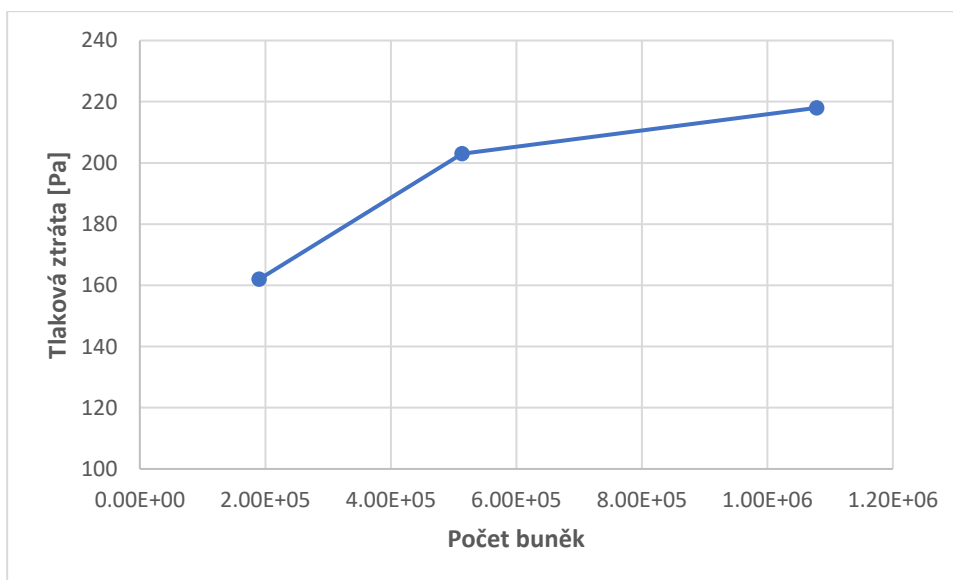
Podrelaxační faktory zůstaly nezměněny z výchozího nastavení programu, protože nenastaly problémy s dosažením konvergence. Podmínky konvergence také zůstaly na výchozí hodnotě 0,001 a 1E-6, protože při zpřísnění podmínek nebyly pozorovány výrazné změny. Parametry řešiče jsou vypsány v následující tabulce.

Tabulka 19 Výpis použitých metod a modelů v řešiči

Přesnost	Single precision	
Výpočetní numerické schéma	Pressure-based	
Čas	Steady/Transient	
Gravitace	Y [m/s ²]	-9,81
Model energie	Ano (Rovnice zachování energie)	
Model proudění	k-Ω SST	
Vazba tlak-rychlost	Model SIMPLE	
Diskretizace	Interpolační schéma gradientu	Metoda nejmenších čtverců
	Interpolační schéma tlaku	2. řádu
	Formulace přechodových stavů	Implicitní 1. řádu

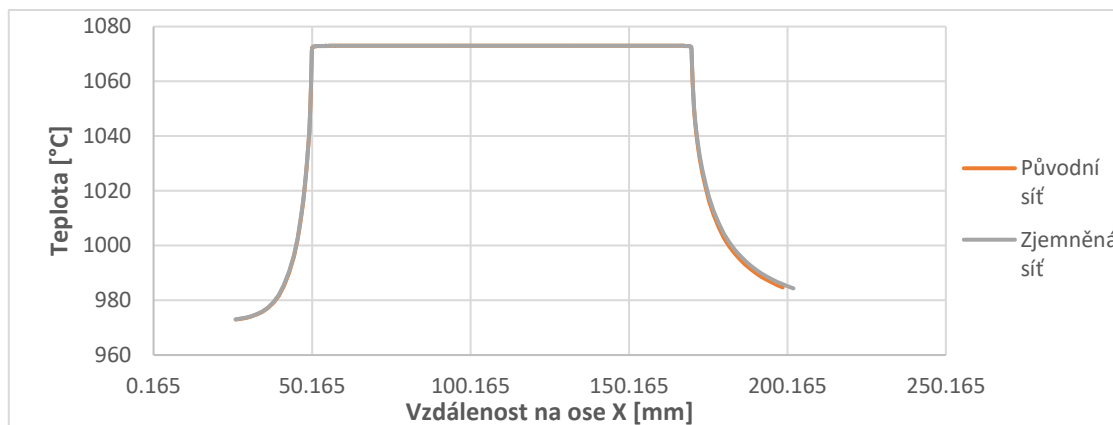
6.2.6. Citlivostní analýza výpočtové sítě

Po vytvoření těchto sítě je potřeba provést citlivostní analýzu pro ověření funkčnosti simulace. Za tímto účelem byly vytvořeny další dvě sítě. V grafu je vidět velikost jejich tlakové ztráty v porovnání s počtem buněk.



Obrázek 37 Porovnání tlakové ztráty sítě

Zjemněná síť má tlakovou ztrátu pouze o 10 % vyšší za cenu více jak dvojnásobku buněk. Originální síť tedy postačuje. Dále je potřeba ověřit vliv zjemnění na teplotu na povrchu trubky, a zda jsou buňky u okraje dostatečně malé, aby dobře popisovaly gradienty veličin v mezní vrstvě.

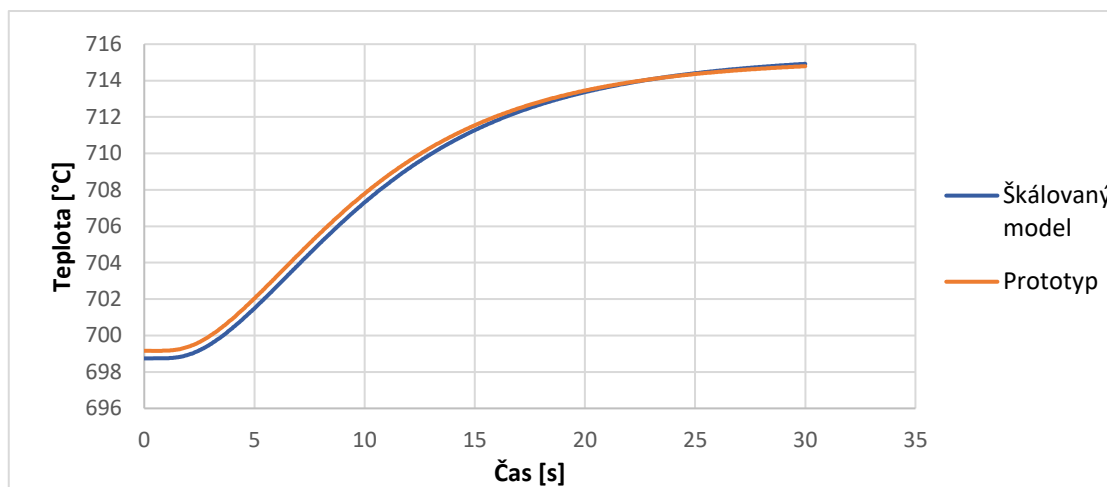


Obrázek 38 Teplota na povrchu trubky originální a zjemněné sítě

Zjemnění sítě nemělo na teplotu na povrchu trubky zásadní vliv. Průměrný pokles teploty byl 0,4 °C. Zároveň byla provedena táž kontrola jemnosti sítě u stěny jako v případě 2D modelu. Bylo kontrolováno, zda jsou gradienty v mezní vrstvě zachyceny s dostatečnou přesností.

6.2.7. Ověření funkčnosti škálovaného modelu

I pro 3D model byl vytvořen ekvivalentní škálovaný model za účelem ověření funkčnosti navrženého škálovaného modelu.



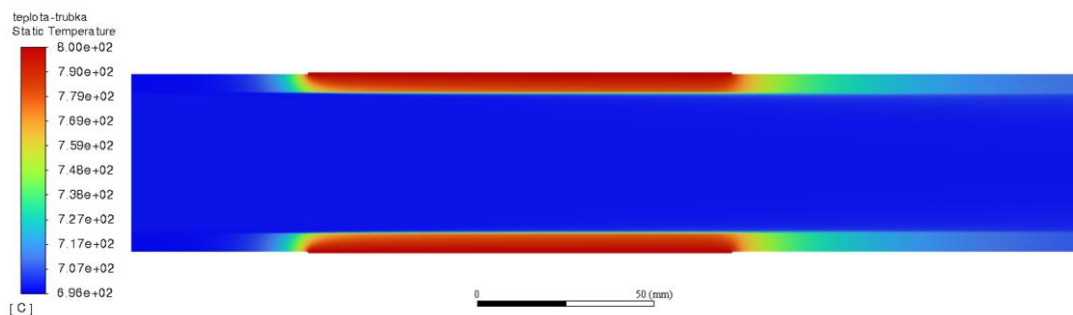
Obrázek 39 Porovnání modelů pro přechodový jev při rychlosti proudění 1,1 m/s

Na rozdíl od 2D simulace, chování prototypu a modelu již není téměř identické. Prototyp začíná na vyšší teplotě, ale má pomalejší přechodový jev. Jedním z možných důvodů může být rozdílná velikost konvektivního přestupu tepla do okolí. Teplota okolí, do kterého oba modely odvádí teplo, je stejná, což ale znamená jiný teplotní rozdíl pro obě smyčky. Nicméně i přes to je chování škálované smyčky velmi podobné prototypu, a pokud by se realizovala, dala by se považovat za věrohodnou reprezentaci reálné solné smyčky.

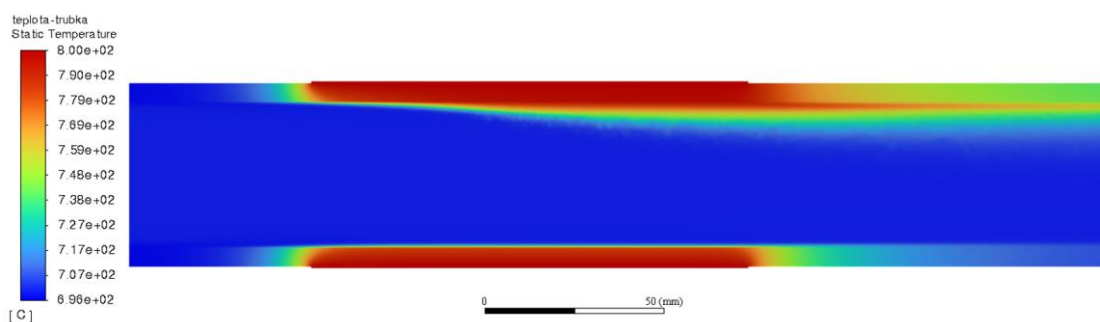
6.2.8. Výsledky 3D simulace

Celkem bylo provedeno 63 výpočtů, z nichž 21 bylo stacionárních a zbylých 42 bylo nestacionárních. Výpočty proběhly úspěšně a během vypočítávání simulací bylo pozorováno pár nepředpokládaných jevů. První byl fakt, že v téměř celém rozsahu měření se efekt ohřevu stěny trubky téměř vůbec neprojeví ve středu toku. Víceméně až při přechodu do laminárního proudění se tepelně ovlivněná část toku začala rozšiřovat.

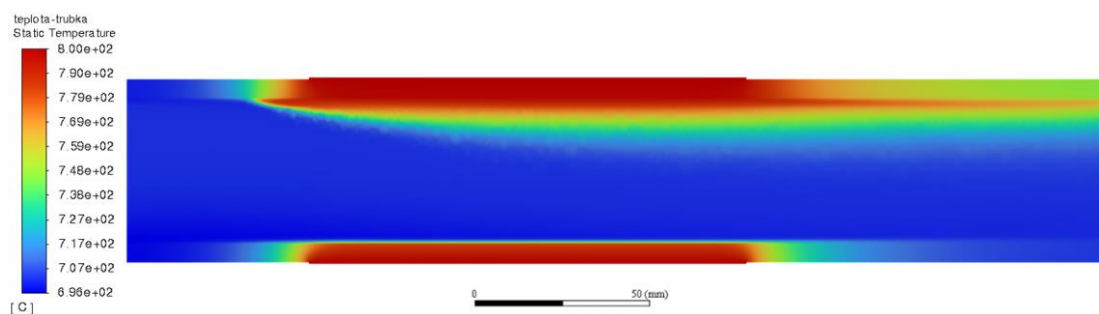
Se snižujícím se průtokem se začala sůl postupně přesouvat podél stěny směrem nahoru, kde se poté při velmi nízkých průtocích začala akumulovat a začala vytvářet „polštář“ ohřáté soli pod horní částí topného tělesa. Od střední rychlosti proudění 0,04 m/s se začal tento „polštář“ dokonce šířit proti směru proudu. Tento efekt byl zaznamenán teplotními čidly umístěnými před tělesem tak, že se najednou začala rychle zvedat teplota. V níže přiložených obrázcích je tento efekt vidět.



Obrázek 40 Teplotní profil v průtokoměru při rychlosti proudění 0,4 m/s



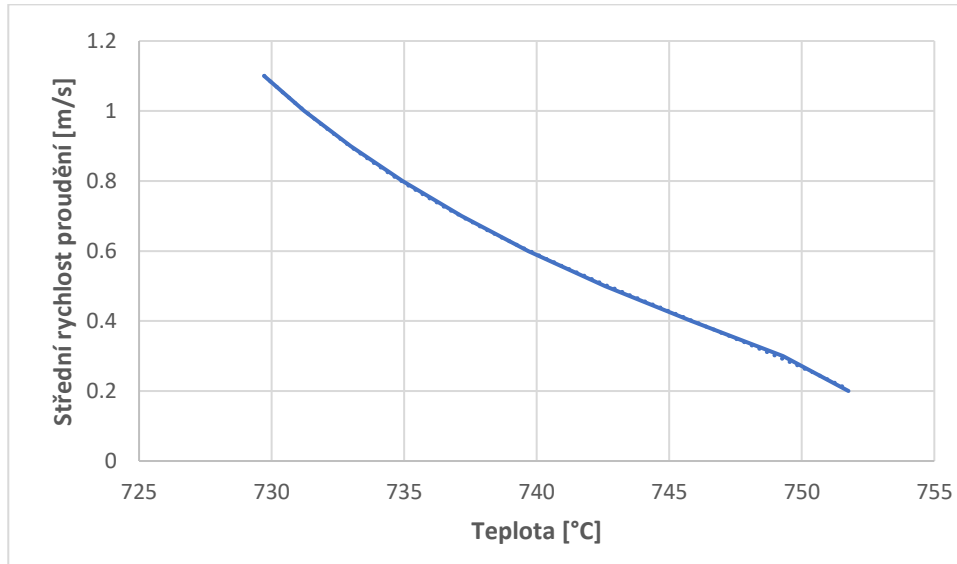
Obrázek 41 Teplotní profil v průtokoměru při rychlosti proudění 0,1 m/s



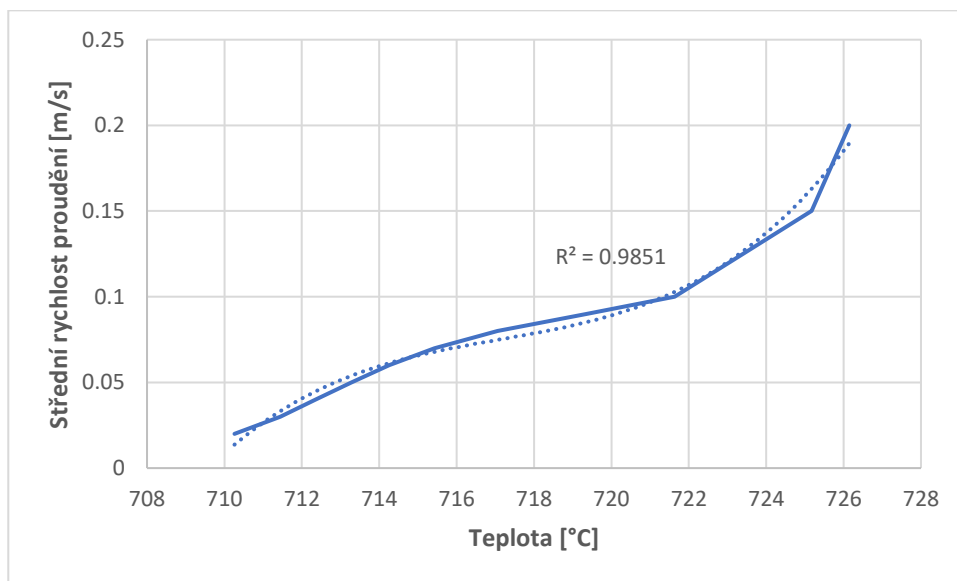
Obrázek 42 Vznik „polštáře“ teplé soli držící se okolo topného tělesa při 0,04 m/s

Extrapolace závislostí na rychlosti proudění

Pro jednotlivé metody byly analyzovány vypočítaná data a nalezeny trendy. Každý z těchto trendů byl následně převeden na korelaci se střední rychlostí proudění, která má svůj vlastní koeficient determinance R^2 .



Obrázek 43 Ukázka korelace pro vyšší rychlosti s vysokou hodnotou R^2

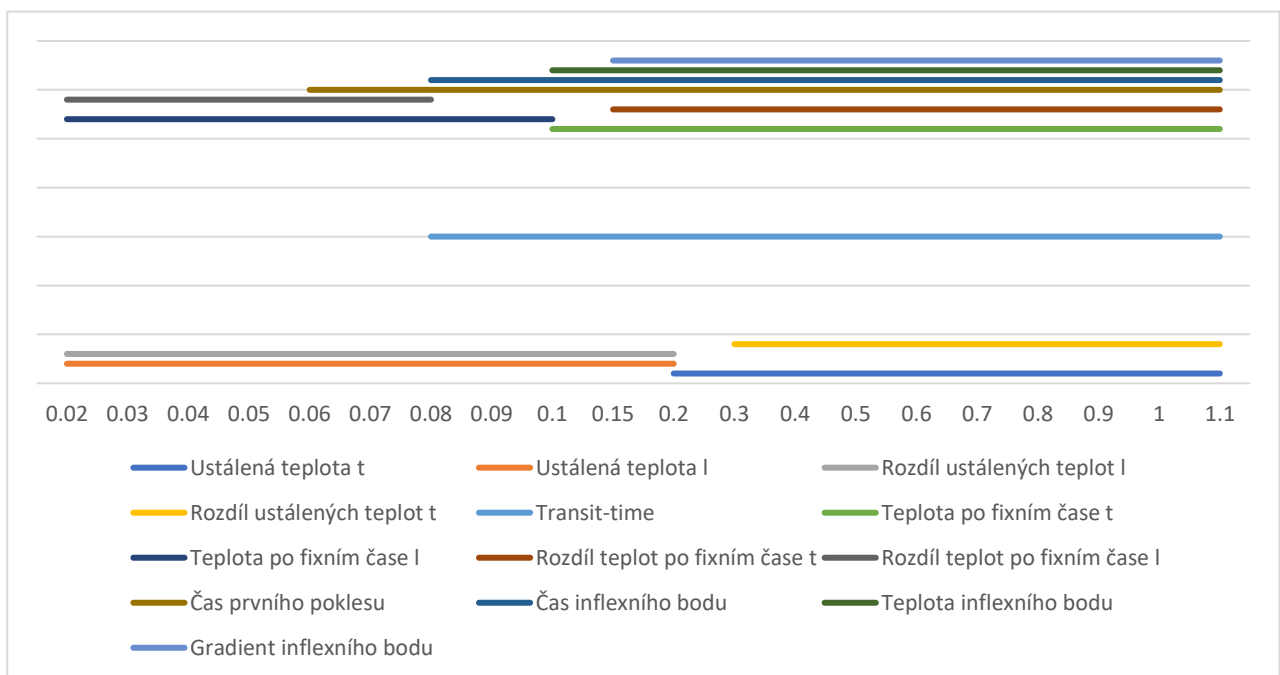


Obrázek 44 Ukázka korelace pro nižší rychlosti s horší hodnotou R^2

Některé z metod měření průtoku vykazují velmi malý rozdíl naměřených hodnot. U těchto metod může nastat, že kvůli omezené citlivosti teplotních čidel a chybám při měření nepůjde hodnoty změřit s dostatečnou přesností. U většiny metod měření bylo potřeba omezit rozsah aplikovatelnosti jednotlivých korelací, aby hodnota R^2 zůstala v akceptovatelné míře. Výsledkem je, že většina korelací

funguje pouze v jednom z typů proudění. Převážně u velmi nízkých rychlostí a v oblasti přechodu z laminárního do turbulentního proudění přestávají naměřená data korelovat. Je ovšem možné, že korelace na sebe navazují, ale jen korelace nebyla zachycena kvůli moc velkým krokům v rychlostech. Přechod mezi korelacemi je často mezi počítanými rychlostmi 0,15 a 0,2 m/s. Případná nová série simulací se zaměřením na tento rozsah rychlosti by mohla vytvořit přesnější korelaci v oblasti přechodu stavu proudění.

Může se tedy stát, že ne vždy bude jednou měřicí metodou postížen celý rozsah průtokoměru. Pro co nejlepší výsledky se doporučuje kombinovat všechny metody dostupné v jednom režimu topného tělesa. Oblasti aplikovatelnosti jednotlivých korelací jsou vyobrazeny v následujícím grafu.



Obrázek 45 Oblasti aplikovatelnosti měřících metod seskupené podle režimu topného tělesa

V následující tabulce je výpis předpokladů, požadavků, korelací, hodnoty koeficientu determinance a oblasti platnosti pro každou měřicí metodu.

Tabulka 20 Výpis korelací a ostatních parametrů pro jednotlivé měřicí metody

Měřicí metoda	Režim topného tělesa	Číslo použitých teplotních čidel	Oblast proudění	Použitelné pro naměřené hodnoty v rozsahu [°C, s, °C/s]	Korelace rychlosti u=	R ²
Ustálená teplota	Zapnutý	1	Turbulentní	729,7-751,7	$-5,28033E-05T^3 + 1,18066E-01T^2 - 8,80282E+01T + 2,18856E+04$	0,99985
		3	Laminární	723,8-730,6	$1,06415E-04T^3 - 2,28934E-01T^2 + 1,64174E+02T - 3,92452E+04$	0,98511
Rozdíl ustálených teplot	Zapnutý	2, 4	Turbulentní	16,25-33,1	$1,34444E-03T^2 - 1,12377E-01T + 2,55763$	0,99871
			Laminární	16,15-34,5	$6,39163E-05T^3 - 4,56399E-03T^2 + 1,12449E-01T - 8,79090E-01$	0,98911
Transit-time	Pulz	1	Turbulentní	9,7-26,6	$9,59658t^{-4.23817E-01}$	0,09850
Teplota po fixním čase	Přechodový	1	Turbulentní	730,7-763,9	$-2,01449E-05T^3 + 4,59688E-02T^2 - 3,49788E+01T + 8,87555E+03$	0,99926
		3	Laminární	739,6-744,4	$9,81687E-04T^3 - 2,18374E+00T^2 + 1,61923E+03T - 4,00220E+05$	0,99479
Rozdíl teplot po fixním čase	Přechodový	2, 4	Turbulentní	16,18-41,76	$1,33270E-03T^2 - 1,12838E-01T + 2,55608$	0,99835
			Laminární	36,64-41,37	$1,58935E-03T^2 - 1,15648E-01T + 2,14417$	0,98844
Čas prvního poklesu teploty	Přechodový	1	Laminární, turbulentní	0,85-9,75	$7,93418E-01t^{-1,11854}$	0,98568
Čas inflexního bodu	Přechodový	2	Turbulentní	6,5-13,1	$9,77889E+02t^{-3,69128}$	0,99370
Teplota inflexního bodu	Přechodový	2	Turbulentní	704,25-710,95	$-4,52353E-03T^3 + 9,62246T^2 - 6,82303E+03T + 1,61269E+06$	0,99156
Gradient inflexního bodu	Přechodový	2	Turbulentní	1,356-2,619	$5,21017E-01dT^2 - 2,84084dT + 3,98844$	0,99862

7. Závěr

S výše popsanými korelacemi už může být provedeno měření. Pro nejlepší výsledky je potřeba měřit co nejvíce metodami. Měřící proces pro ustálený režim a režim pulzů je intuitivní. Pro přechodový režim je proces následovný:

- Zapnout topné těleso a udržovat ho na konstantní teplotě
- Symetrickými čidly určit směr proudění
- Kontinuálně měřit teplotu po dobu 30 sekund
 - Kontinuálně přepočítávat naměřené hodnoty pomocí lineární regrese formy polynomu. Ten následně derivovat a zjistit lokaci inflexního bodu pro měřící metody založené na ní.
- Vypnout topné těleso
- Počkat na vychladnutí systému
- Opakovat

Tímto způsobem je postupně získáno 6 hodnot střední rychlosti proudění. Přepočtem se dá získat hmotnostní tok. Zároveň se tyto metody dají kombinovat a tím získat přesnější měření.

8. Literatura

- [1] N. HAUBENREICH, PAUL a J. R. ENGEL. EXPERIENCE WITH THE MOLTEN-SALT REACTOR EXPERIMENT. In: *NUCLEAR APPLICATIONS & TECHNOLOGY*. 8. 1970, s. 18. Dostupné také z: http://moltensalt.org/references/static/downloads/pdf/NAT_MSREexperience.pdf
- [2] WEINBERG, Alvin M., 1994. The first nuclear era: The life and times of nuclear fission. 1994th ed. New York, NY: American Institute of Physics. ISBN 9781563963582.
- [3] Patent US2736696A Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US2736696A/en>
- [4] *REACTOR PROGRAM of the AIRCRAFT NUCLEAR PROPULSION PROJECT*. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 1952. Dostupné také z: <https://media.githubusercontent.com/media/openmsr/msr-archive/master/docs/ORNL-1234.pdf>
- [5] *The Development Status of MOLTEN-SALT BREEDER REACTORS*. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 1972. Dostupné také z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/04/064/4064384.pdf
- [6] G. Seaborg a B. Loeb. *The Atomic Energy Commission Under Nixon: Adjusting to Troubled Times*. 1. New York: Palgrave Macmillan New York, 1993. ISBN 978-0-312-07899-7.
- [7] A. LANE, James. *Fluid Fuel Reactors, Chapter 15*. 1958. Michigan University: Addison-Wesley Publishing Company. Dostupné také z: http://moltensalt.org/references/static/downloads/pdf/FFR_chap15.pdf
- [8] S. SOHAL, Manohar a Matthias A. EBNER. *Engineering Database of Liquid Salt Thermophysical and Thermochemical Properties*. Idaho national laboratory, 2013. Dostupné také z: <https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/STI/STI/5698704.pdf>
- [9] H. E. McCoy. The INOR-8 Story. In: *THE PHYSICISTS' NOTEBOOK*. 1969. Dostupné také z: <https://energyfromthorium.com/pdf/inor-8-story.pdf>
- [10] , R.R. Romatoski a L.W. Hu. *Fluoride salt coolant properties for nuclear reactor applications: A review*. MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2017, 24. Dostupné také z: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/123988/Romatoski_SaltPropertyReview02.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [11] J. R., Tallackson, R. L. Moore a S. J. D i t t o. *INSTRUMENTATION AND CONTROLS DEVELOPMENT FOR MOLTEN-SALT BREEDER REACTORS*. OAK

- RIDGE NATIONAL LABORATORY, 1967. Dostupné také z:
<http://moltensalt.org/references/static/downloads/pdf/ORNL-TM-1856.pdf>
- [12] NILSSON, Sebastian. *Feasibility study of Magnetic Flow Meters for Molten Salt Reactors*. Luleå, 2020. Dostupné také z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1438663/FULLTEXT02>. Masters. Luleå University of Technology.
- [13] PANTANO, Michael. *Investigation of Performance of an Ultrasonic Flow Meter for Potential Molten Salt Reactor Applications*. Massachusetts Institute of Technology, 2016. Dostupné také z:
<https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/111291/1002855727-MIT.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Master of Science. Massachusetts Institute of Technology.
- [14] MOAZZEN, Taleb. *Flow rate measurement in a high temperature, radioactive, and corrosive environment*. University of Nevada Las Vegas, 2010. Dostupné také z:
<https://digitalscholarship.unlv.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1397&context=thesesdissertations>. University of Nevada Las Vegas.
- [15] P.COUTINHO, Cristiano a António J.BAPTISTA. *Reduced scale models based on similitude theory: A review up to 2015*. 119. Engineering Structures, 2016. Dostupné také z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029616301274#f0015>
- [16] PHILIPPE M. BARDET & PER F. PETERSON. *Options for Scaled Experiments for High Temperature Liquid Salt and Helium Fluid Mechanics and Convective Heat Transfer*. 2017. ISSN ISSN: 0029-5450. Dostupné z:
[doi:https://doi.org/10.13182/NT163-344](https://doi.org/10.13182/NT163-344)
- [17] Davis C. *Implementation of Molten Salt properties into RELAP5-D/ATHENA*. 2005, Idaho National Laboratory. Report No.: INEEL/EXT-05-02658. Dostupné z: <https://www.osti.gov/scitech/biblio/910991>
- [18] ZWEIBAUM, Nicolas, Edward BLANDFORD a Per PETERSON. *Scaling Methodology for Integral Effects Tests in Support of Fluoride Salt-Cooled High-Temperature Reactor Technology*. 2020, 20. Dostupné také z:
<https://doi.org/10.1080/00295639.2019.1710976>
- [19] CANTOR, S. *PHYSICAL PROPERTIES OF MOLTEN-SALT REACTOR FUEL, COOLANT, AND FLUSH SALTS*. Oak Ridge National Lab., Tenn., 1968. Dostupné také z: <https://www.osti.gov/biblio/4492893>
- [20] *HASTELLOY® N alloy*. Haynes International, 2020. Dostupné také z:
<https://haynesintl.com/docs/default-source/pdfs/new-alloy-brochures/corrosion-resistant-alloys/brochures/n-brochure.pdf?sfvrsn=18>
- [21] *Kaowool™ Blanket S/Kaowool™ Blanket SZr Material Datasheet*. 2022. Dostupné také z:

<https://www.morganadvancedmaterials.com/media/2910/kaowoolblankets-kaowoolblanketszrenglish-new.pdf>

[22] *Resistohm 135 Material Datasheet*. Aperam Alloys Rescal. 2022. Dostupné také z:

https://www.aperam.com/sites/default/files/documents/datasheet_RESISTOHM_135.pdf

[23] *Eastman Database*. Dostupné také z:

https://info.therminol.com/WF_2019_HTF_Calculator_Download-2.html

[24] G. ANDERSON, William, Richard W. BONNER III a John HARTENSTINE. *Intermediate Temperature Fluids Life Tests - Experiments*. 2007. Dostupné z: doi:DOI:10.2514/6.2007-4808