

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky



Bakalářská práce

Modelování akumulátoru tepla s PCM ve válcových pouzdrech
v OpenModelice

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Belda** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **482687**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Modelování akumulátoru tepla s PCM ve válcových pouzdrech v OpenModelice

Název bakalářské práce anglicky:

Modeling of a Heat Storage with Cylindrically Encapsulated PCM using OpenModelica

Pokyny pro vypracování:

Stručně popište jazyk Modelica a vývojové prostředí OpenModelica. Popište konstrukci akumulátoru, především parametry důležité pro modelování. Sestavte model akumulátoru tepla v modelovacím jazyce Modelica. Porovnejte výsledky simulací s naměřenými daty z vybíjení laboratorního akumulátoru. Diskutujte vlastnosti sestaveného modelu.
Rozsah průvodní zprávy: cca 50 stran

Seznam doporučené literatury:

dle doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Jančík, ústav mechaniky tekutin a termodynamiky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Petr Jančík
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Michal Schmirler, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití 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 21. 7. 2021

.....

Podpis



Poděkování

Nejvíce bych chtěl poděkovat panu inženýru Petru Jančíkovi za jeho cenné rady a trpělivost při vedení mé práce. Také bych chtěl poděkovat panu docentu Tomáši Hyhlíkovi za to, že mě k tomuto tématu přivedl a poskytl mi výsledky své práce v oboru akumulátorů tepla se skupenskou přeměnou, ze kterých jsem při zpracovávání některých částí této práce vycházel.

Také bych chtěl poděkovat své rodině a kamarádům, že respektovali časovou náročnost vypracování této práce a poskytovali mi podporu.



Anotace

Autor:	Marek Belda
Název BP:	Modelování akumulátoru tepla s PCM ve válcových pouzdrech v OpenModelice
Rozsah práce:	54 str., 41 obr.
Školní rok vyhotovení:	2020/2021
Škola:	ČVUT FS
Ústav:	Ú12112 – ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Petr Jančík
Zadavatel:	ČVUT FS
Klíčová slova:	PCM, akumulátor tepla, fázová změna, prostup tepla, OpenModelica
Anotace:	<p>Tato bakalářská práce se zabývá tvorbou a validací matematického modelu zásobníku tepla v softwaru OpenModelica. Výhodou softwaru OpenModelica, postaveném na jazyce Modelica je, že využívá akauzální zápis modelů. Dále je v této práci proveden stručný přehled PCM (phase change material – materiál s fázovou změnou) a konstrukčního řešení experimentálního akumulátoru. Součástí práce je odvození vztahů použitých v modelu, přičemž výsledkem práce je validovaný spustitelný model zásobníku tepla. Bylo provedeno naladění modelu a vyhodnocení jeho přesnosti při porovnání s jinou sadou dat, než byla použita pro naladění. Model odvozený v této práci byl vyhodnocen jako poměrně přesný a způsobilý k použití při návrhu akumulátoru nebo pro návrh řízení soustavy akumulátorů.</p>



Annotation

Author:	Marek Belda
Title of bachelor thesis:	Modeling of a heat storage with cylindrically encapsulated PCM using OpenModelica
Extent:	54 p., 41 fig.
Academic year:	2020/2021
University:	CTU, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12112 – Department of thermodynamics and fluid mechanics
Supervisor:	Ing. Petr Jančík
Submitter of the Theme:	CTU, Faculty of Mechanical Engineering
Key words:	PCM, heat accumulator, phase change, heat transfer, OpenModelica
Annotation:	<p>This bachelor thesis deals with the process of creating and validating a model of heat accumulator in OpenModelica. OpenModelica, based on the Modelica simulation language, has the advantage of having an acausal writing of the models. In this thesis, there is a brief introduction into PCMs (phase change materials) and design of the experimental heat accumulator. This thesis contains derivation of the equations used in the model and the outcome of this thesis is a fully functional and validated model of heat accumulator. Comparison with set of data other than those used for calibration was carried out to see the accuracy of the model. Model created in this thesis was assessed as accurate and usable for designing an accumulator or designing the control system for controlling a system of accumulators.</p>



Seznam použitého značení, veličin a jednotek

a	[m]	vzdálenost os trubek
C	[J K ⁻¹]	tepelná kapacita
c _p	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku
D	[m]	vnější průměr trubky
D _h	[m]	hydraulický průměr
H	[J]	entalpie
h	[J kg ⁻¹]	měrná entalpie
h _t	[J kg ⁻¹]	entalpie tání
l	[m]	délka trubky
m	[kg]	hmotnost
\dot{m}	[kg s ⁻¹]	hmotnostní tok
n	[1]	počet trubek
Nu	[1]	Nusseltovo číslo
o	[m]	smočený obvod
p	[Pa]	tlak
Q	[J]	teplo
\dot{Q}	[W]	tepelný tok
R (bez indexu)	[m]	vnější poloměr trubky
R ₀	[m]	vnitřní poloměr trubky
R (s indexem)	[m]	poloměr s významem dle indexu
r	[m]	obecný poloměr
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
S	[m ²]	plocha



s	[m]	tloušťka stěny trubky
T	[K]	termodynamická teplota
t	[s]	čas
t_t	[°C]	teplota tání
ΔT	[K]	teplotní spád
\bar{u}	[m s ⁻¹]	střední objemová rychlost
V	[m ³]	objem
V_1'	[m ³]	objem kapalného PCM, který odteče do centrální dutiny
W_t	[J]	technická práce
w_1	[1]	součinitel lineární kombinace
α	[W m ⁻² K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla
β	[K]	teplotní rozsah fázové přeměny
ζ	[1]	hmotnostní podíl kapalné fáze
λ	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	tepelná vodivost
μ	[K]	střední teplota fázové přeměny
ν	[m ² s ⁻¹]	kinematická viskozita vody
ρ	[kg m ⁻³]	hustota



Seznam použitých dolních indexů veličin

C	celková hodnota veličiny
ef	efektivní hodnota veličiny
F	veličina přísluší fázovému rozhraní při tání
int	veličina přísluší fázovému rozhraní při tuhnutí
l	veličina přísluší kapalně fázi (likvidu)
lat	veličina přísluší fázové změně
PCM	veličina přísluší PCM
s	veličina přísluší pevné fázi (solidu)
tr	veličina přísluší trubce
vak	veličina přísluší dutině
voda	veličina přísluší vodě

Seznam použitých zkratk

MKO	metoda konečných objemů
MKP	metoda konečných prvků
ODR	obyčejné diferenciální rovnice
PCM	phase change material (materiál s fázovou přeměnou)
PDR	parciální diferenciální rovnice



Obsah

Prohlášení.....	I
Poděkování.....	II
Anotace	III
Annotation	IV
Seznam použitého značení, veličin a jednotek	V
Seznam použitých dolních indexů veličin.....	VII
Seznam použitých zkratk.....	VII
1 Úvod	1
2 Simulační jazyk Modelica a prostředí OpenModelica	4
2.1 Srovnání akauzálního a kauzálního modelování	4
2.2 Historie jazyka Modelica	5
2.3 Výhody použití jazyka Modelica v průmyslových aplikacích.....	7
2.4 Software OpenModelica	8
2.4.1 OpenModelica Connection Editor (OMEdit)	8
2.4.2 OpenModelica Compiler (OMC).....	9
3 Vnitřní struktura zásobníku tepla s fázovou přeměnou.....	10
4 Tvorba simulace v softwaru OpenModelica	13
4.1 Počáteční stav	13
4.2 Popsání fázové změny látky tuhnoucí při klesající teplotě	14
4.2.1 Závislosti sdílení tepla	14
4.2.2 Termodynamické vlastnosti látky tuhnoucí při klesající teplotě.....	15
4.2.3 Popsání látky tuhnoucí při klesající teplotě v programu	18
4.3 Řešení prostupu tepla	19
4.3.1 První řešení prostupu tepla.....	19
4.3.2 Úprava a vylepšení řešení prostupu tepla	26
4.4 Úprava tvaru fázového rozhraní (pro další zpřesnění řešení prostupu tepla)	29



4.5	Posouzení vlivu sdílení tepla podstavami trubek.....	30
5	Srovnání modelu s měřením	32
5.1	Srovnání s experimentem použitým pro naladění modelu.....	32
5.1.1	Vstupní data experimentu	32
5.1.2	Srovnání a komentář	33
5.2	Porovnání s jinou sadou měřených dat.....	38
5.2.1	Vstupní data experimentu	38
5.2.2	Srovnání důležitých parametrů a komentář	38
5.3	Srovnání teplot po délce trubky v experimentu s teplotou z modelu	44
6	Obrácený chod akumulátoru	46
6.1	Odvození fázového rozhraní při tání pro zahřívání úplně ztuhlého akumulátoru	46
6.2	Srovnání výstupů modelu tání a tuhnutí.....	47
7	Závěr.....	50
	Bibliografie	52
	Seznam obrázků	53
	Seznam použitého softwaru	54
	Seznam příloh.....	54



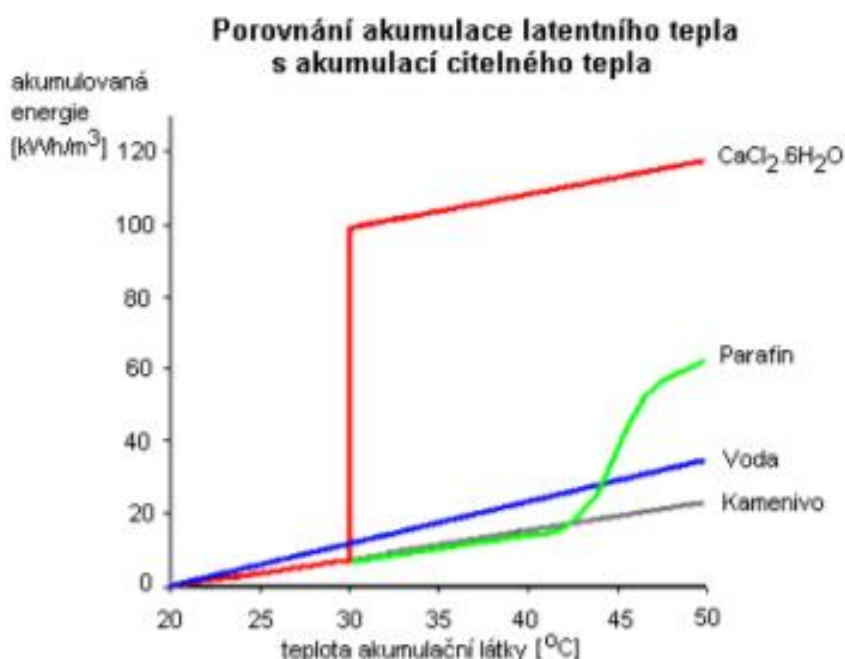
1 Úvod

Akumulace tepla na delší časový úsek bez jeho přeměny v jinou formu energie byla vždy velkou výzvou, protože při této formě akumulace nedochází ke ztrátám při přeměnách na jiné formy energie a zpět. Další výhodou přímé akumulace tepla je fakt, že k ní není potřeba žádné složité soustrojí, ale postačuje k ní pouze dostatek vhodného materiálu a izolace, která zabrání unikání tepla do okolí. Zde však nastupují první problémy, protože množství tepla, které lze do látky uložit je dáno její hmotností, měrnou tepelnou kapacitou a zvýšením její teploty. Z tohoto vyplývá, že akumulátor citelného tepla musí být dostatečně hmotný, protože zvýšení teploty během akumulace není účelné příliš zvyšovat (z hlediska ekonomiky i nároků na izolaci). Akumulátor citelného tepla je výhodný z toho důvodu, že se jeho chování dá snadno předpovídat pomocí nestacionárního vedení tepla, jehož řešení pro jednorozměrné úlohy (rozlehlá deska, dlouhý válec) je již dlouho známo a není problém přesně stanovit tepelný výkon prakticky za jakýchkoli okrajových podmínek. Pomocí jednorozměrných úloh lze získat též přibližné řešení úloh vícerozměrných, případně zde není problém, vzhledem ke konstantním fyzikálním parametrům látky, řešit model akumulátoru numericky. Nestacionární vedení tepla je obecně dobře prozkoumanou problematikou.

Mnohem lepších výsledků z hlediska objemové (popř. hmotnostní) hustoty akumulovaného tepla lze dosáhnout akumulátory latentního tepla. Tyto akumulátory využívají faktu, že pro provedení fázové změny látky je zapotřebí velkého množství tepla, a to řádově většího než pro ohřátí dané látky o 1K. Této vlastnosti látek se dá s úspěchem využít, ovšem při předpovídání chování akumulátoru právě tato fázová změna způsobuje nemalé problémy. Řešení probíhající fázové změny je vzhledem pohybujícímu se fázovému rozhraní, na kterém dochází ke skokovým změnám fyzikálních parametrů látky poměrně obtížné a může být problematické i pro některé numerické řešiče. Analytické řešení je pak u vícerozměrných úloh v zásadě nemožné. Vzhledem k potřebě předpovídat chování akumulátorů latentního tepla v krátkých simulačních časech a dostatečně jednoduše pro ladění např. řízení soustav akumulátorů je nutné mít zjednodušený model systému. Toto je tématem této práce, ve které se pokusím odvodit zjednodušený model akumulátoru s fázovou přeměnou, který popíše chování akumulátoru latentního tepla dostatečně jednoduše, ale zároveň dostatečně přesně. Abych mohl v této práci pokračovat a popsat chování akumulátoru tepla, je nejdříve nutné mít základní přehled o používaných akumulačních látkách (PCM), jejich rozdělení, vlastnostech a chování.

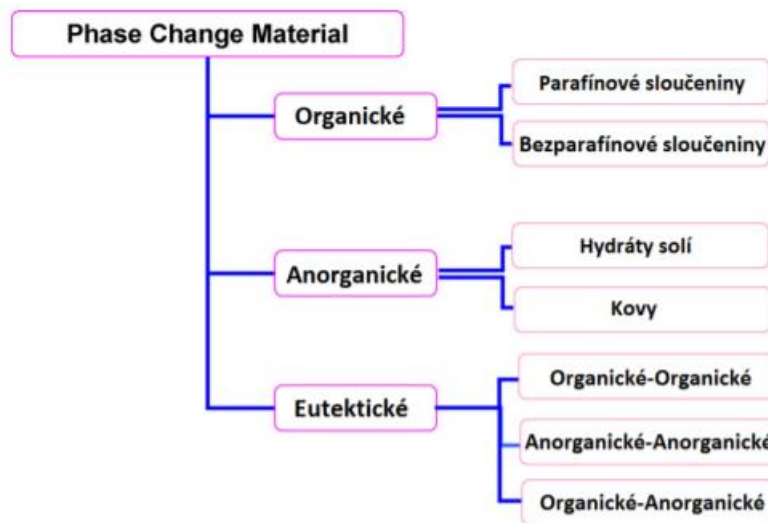
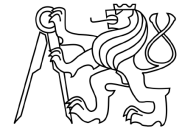


PCM (phase change material) je látka, u které změna skupenství probíhá ve využitelném rozsahu pro praktické akumulování tepla a zároveň má velké skupenské teplo tání. Výhodou akumulátorů využívajících PCM oproti jiným typům je vysoká objemová hustota energie ve formě uloženého tepla (5 – 14x větší než u akumulátorů bez skupenské změny) z důvodu využití skupenské změny a velkého tepla, které je k jejímu provedení potřebné (viz Obrázek 1). Výhodou těchto zásobníků je po ustálení stavu relativně stabilní výkon a výstupní teplota díky úzkému rozpětí teplot, při kterých probíhá fázová změna [1].



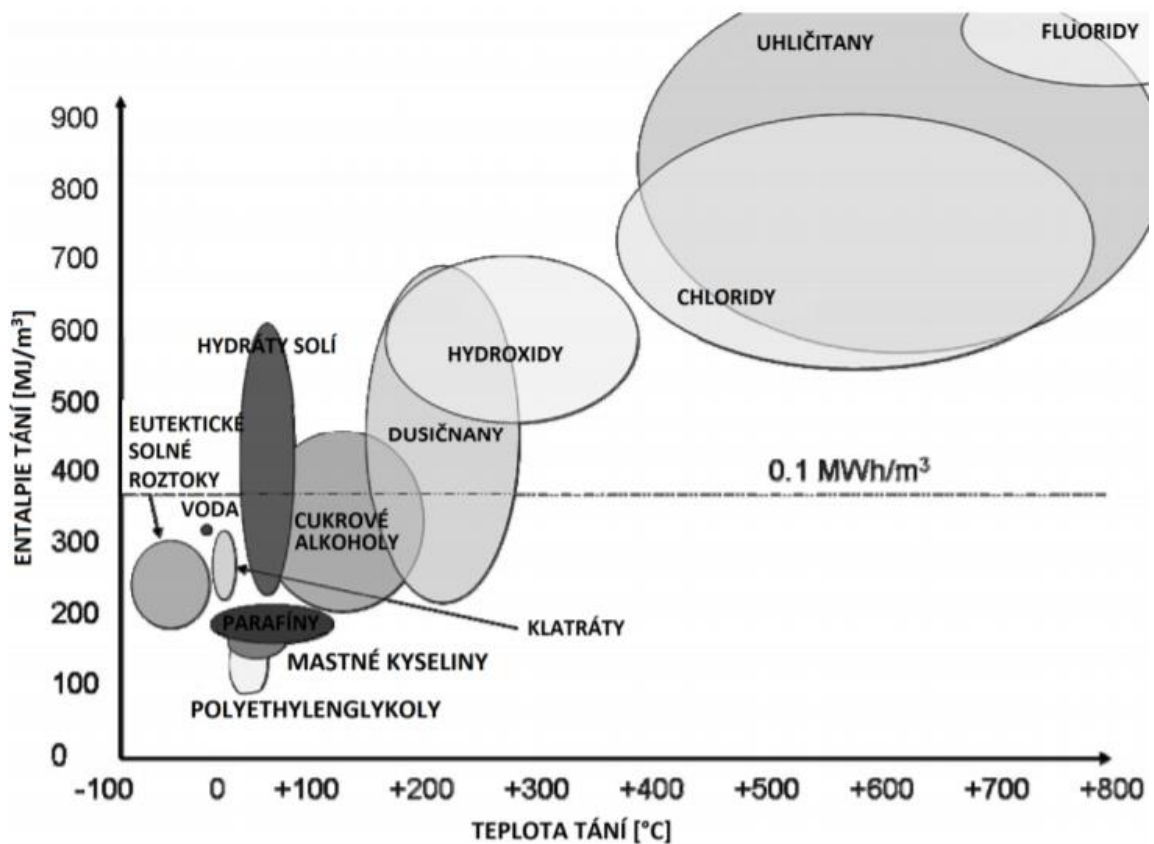
Obrázek 1 – Energie akumulovaná v různých látkách [2]

PCM lze rozdělit do několika skupin v závislosti na porovnávaném parametru. Lze je dělit podle teploty fázové změny, latentního tepla nebo podle chemického složení. Základním dělením podle chemického složení je dělení na materiály organické a anorganické. Hlavním rozdílem mezi nimi, kromě chemické podstaty, je, že anorganické PCM mají cca 2x větší objemovou hustotu latentního tepla než organické (250–400 kJ dm⁻³ u anorganických oproti 128–200 kJ dm⁻³ u organických) a mají také cca 2x lepší tepelnou vodivost [1].



Obrázek 2 – Rozdělení PCMs [1], [2]

Pro grafickou ilustraci rozdělení PCM materiálů je výhodné zobrazení do grafu, kdy na ose x je teplota tání a na ose y je objemová hustota entalpie tání (Obrázek 3) [2].



Obrázek 3 – PCMs podle teploty a entalpie tání [2]



2 Simulační jazyk Modelica a prostředí OpenModelica

V této kapitole probereme, proč je Modelica tak úspěšným modelovacím jazykem a proč si rychle získala takovou oblibu a používanost při simulacích průmyslových systémů a proč o ní poměrně rychle projeví výrazný zájem významní hráči průmyslového sektoru. Dále bude v této kapitole stručně pojednáno o programu OpenModelica, založeném na jazyce Modelica, který byl v této práci použit.

2.1 Srovnání akauzálního a kauzálního modelování

V simulačních prostředcích, jako je např. OpenModelica nebo Matlab Simulink, existují dva základní přístupy ke tvorbě modelů. Kauzální přístup, který je starší a používá ho např. zmiňovaný Simulink a akauzální přístup používaný např. v softwaru OpenModelica. Každý z těchto přístupů má své charakteristické rysy a své výhody a nevýhody.

Modely vytvářené v programu Matlab Simulink přehledně graficky vyjadřují jednotlivé matematické vztahy. V propojkách mezi jednotlivými bloky tečou signály, které přenášejí hodnoty jednotlivých proměnných z výstupu jednoho bloku na vstupy do dalších bloků. V blocích dochází ke zpracování vstupních informací na výstupní. Simulink nabízí velkou sadu elementárních bloků (násobičky, děličky, integrátory atd.), realizujících přímo nějakou matematickou operaci, případně nějaký test, na jehož výsledku závisí řízení dalšího postupu výpočetního toku. Zapojení bloků v Simulinku tedy více, než vlastní modelovanou realitu odráží postup výpočtu. V případě Simulinku tedy hovoříme o tzv. kauzálním modelování. Tento přístup má však některé výrazné nevýhody, přičemž jednou z těch zásadních je právě kauzalita. Model důsledně rozlišuje vstup (příčinu) a výstup (důsledek) na jednotlivých blocích. Toto je pro uživatele velmi svazující, protože musí dopředu promyslet a znát postup výpočtu jednotlivých proměnných a vědět, která je příčinou a která důsledkem na jednotlivých blocích. Kauzalita modelu je výrazným omezením způsobujícím, že i drobné úpravy modelu či jeho rozšíření mohou být časově velmi náročným úkolem náchylným k chybám. Další velkou nevýhodou je, že zapojení a obsah bloků často ani náznakem nepřipomíná fyzikální rovnice, které popisují řešený problém [3], [4].

Při vytváření, prezentování a popisu modelu je nejdůležitější, aby struktura modelu vystihovala fyzikální podstatu modelované reality. Postup a algoritmus výpočtu je v takovém případě spíše vedlejší. Proto se v moderních simulačních prostředcích stále více uplatňuje akauzální (deklarativní) modelování, kdy v jednotlivých komponentách modelu píšeme přímo



rovnice, které je popisují, a nikoli algoritmus jejich řešení. Velkou výhodou tohoto přístupu je, že se uživatel může plně soustředit na fyzikální rovnice popisující děj a nemusí řešit, která proměnná vystupuje jako příčina a která jako důsledek v jednotlivých blocích. Toto zjednodušuje a zpřehledňuje tvorbu modelu a velmi usnadňuje úpravy a rozšiřování modelu (místo předělávání celého modelu pouze nahradíme nebo doplníme rovnice, které považujeme za podstatné). Propojením jednotlivých komponent dochází k propojení soustav rovnic mezi sebou. Pospojování komponent v tomto případě neodráží postup výpočtu, ale přímo modelovanou fyzikální realitu. Způsob řešení rovnic je pak záležitostí počítače (příslušného překladače) a uživatel se o něj nemusí starat. Tento způsob modelování se díky své jednoduchosti a přehlednosti stává čím dál používanějším. Moderním simulačním jazykem, který je přímo postaven na akauzálním zápisu modelů je Modelica [3], [4].

2.2 Historie jazyka Modelica

Modelica není firemní komerční produkt jako např. Simulink, vyvíjený společností Mathworks. Modelica je standardizovaný objektově orientovaný, deklarativní modelovací jazyk pro komponentové modelování složitých a komplexních systémů obsahujících komponenty z různých oborů (např. elektřina a magnetismus, termodynamika, elektronika, mechanika, ...). Jazyk využívá akauzální popis modelované reality pomocí rovnic v jednotlivých modelicových třídách. Iniciátorem vzniku jazyka byl Hilding Elmqvist z univerzity v Lundu, který v roce 1978 vytvořil v rámci své disertační práce objektově orientovaný, na rovnicích založený jazyk Dymola, který implementoval v programovacím jazyce Simula 68. Později svůj jazyk Dymola reimplementoval v programovacím jazyce C++. V roce 1991 založil firmu Dynasim AB, kde pokračoval ve vývoji jazyka Dymola. Roku 1996 inicioval úsilí pro vytvoření standardizovaného objektově orientovaného na rovnicích založeného modelovacího jazyka pro modelování technických systémů, který by umožňoval snadnou výměnu jednotlivých komponent dynamických modelů ve standardizovaném formátu. První specifikace jazyka byla zveřejněna v září 1997. Vycházela ze zkušeností nejen s jazykem Dymola, ale i s dalšími modelovacími jazyky (např. Allan, Omola, Smile, aj.). V roce 2000 bylo založeno nekomerční sdružení Modelica Association pro standardizaci a další rozvoj jazyka Modelica a pro vývoj standardizované volně dostupné knihovny (Standard Modelica Library) [4].

Jazyk Modelica je příkladem úspěšné spolupráce akademického a komerčního sektoru. Firma Dynasim, spolupracující s Lundskou univerzitou vytvořila první komerční implementaci



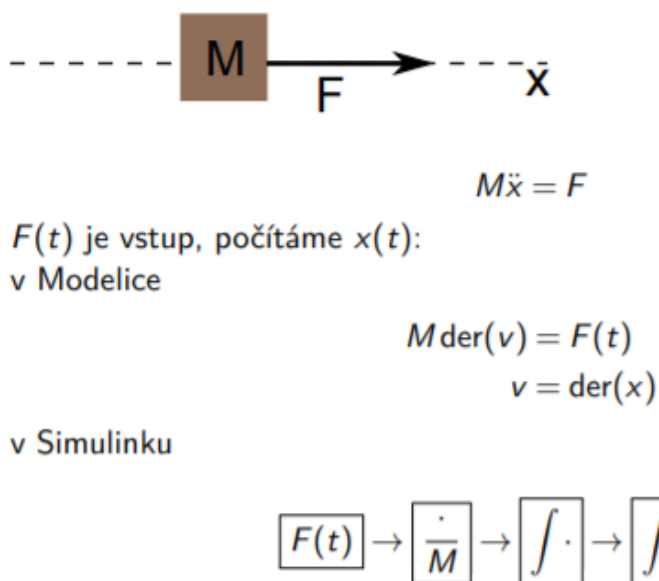
jazyka Modelica pod staronovým názvem Dymola (tentokrát se již nejedná o modelovací jazyk, ale o simulační prostředí ve standardizovaném jazyce Modelica). Záhy vznikla další komerční implementace jazyka ve firmě Mathcore, která v úzké spolupráci s univerzitou v Linköpingu vyvinula implementaci Modelicy s názvem MathModelica. Modelica, která původně vznikala jako akademický projekt ve spolupráci s malými vývojovými firmami při univerzitách v Lundu a v Linköpingu, se záhy ukázala jako velmi efektivní nástroj pro vytváření složitých modelů uplatnitelných zejména ve strojírenství, automobilovém a leteckém průmyslu. Vývoj jazyka Modelica proto postupně získal podporu komerčního sektoru. Rozšiřovaly se standardizované knihovny a jazyk se vyvíjel. Modelica nyní existuje ve standardizované verzi 3.5 zveřejněné 18.2.2021 [5]. Z původně spíše akademického a vědeckého modelovacího prostředí se Modelica stala efektivním průmyslovým nástrojem, jehož okruh uživatelů se s každou aktualizací zvětšuje. Rychlost, s jakou si nový simulační jazyk Modelica osvojila nejrůznější komerční vývojová prostředí je ohromující. Jestliže ještě před nedávnem existovaly pouze dvě komerční implementace tohoto jazyka (Dymola od švédské firmy Dynasim a MathModelica od další švédské společnosti Mathcore), dnes již jazyk Modelica využívají také simulační prostředí LMS Imagine.Lab Amesim od firmy LMS, MapleSim od Maplesoftu, Mosilab od firmy Fraunhofer a mnohé další. Původně malou vývojovou firmu Dynasim, která při univerzitě v Lundu vyvinula první implementaci Modelicy s názvem Dymola dnes vlastní významná společnost Dassault Systemes, která Dymolu použila do svých komplexních softwarových nástrojů pro inženýrské konstruování. Společnost Wolfram, produkující proslulý nástroj pro vědecké a inženýrské výpočty s názvem Mathematica, koupila firmu Mathcore. Její MathModelicu pod novým názvem System Modeler integrovala do svého nástroje Mathematica [4].

Existují i volně dostupné nekomerční implementace Modelicy, z nichž nejrozšířenější je OpenModelica vyvíjená jako Open Source konsorciem 14 firem a 11 univerzit. Modelica nachází stále větší uplatnění v průmyslových aplikacích a je využívána prakticky všemi významnými hráči průmyslového sektoru (Siemens, ABB a EDF, AUDI, BMW, Daimler, Ford, Toyota, VW, atd.). V automobilkách se Modelica používá pro návrh energeticky úsporných automobilů a pro návrh klimatizačních jednotek. Rozvoj vývojových prostředí a technologií využívajících jazyk Modelica i vývoj příslušných aplikačních knihoven je součástí celoevropských výzkumných projektů EUROSYSLIB, MODELISAR, OPENPROD a MODRIO financovaných v letech 2007 – 2015 celkovou částkou 75 milionů Euro [4].



2.3 Výhody použití jazyka Modelica v průmyslových aplikacích

Průmyslové technologie bývají zpravidla složité a komplexní. Proto je důležité udržet v modelu přehlednost a neztratit se v množství propojovaných bloků v simulačních nástrojích. Zde je Modelica vhodným nástrojem, protože umožňuje vizuální hierarchické komponentové zobrazení složitých modelů, jejichž struktura vyjadřuje strukturu modelované reality (na rozdíl od blokově orientovaných nástrojů). Velkou výhodou Modelicy pro její využití v průmyslu jsou standardizované knihovny pro různé fyzikální domény postupně vyvíjené v široké mezinárodní komunitě a prověřované dennodenním praktickým využíváním. Tyto knihovny modelicových komponent umožňují jejich propojováním sestavovat složité, ale přehledné modely, které navenek vypadají jako schematické obrázky specifické pro každou část hierarchicky uspořádaného technologického celku (jinou pro mechanické části, a jinou pro elektrické či řídicí komponenty apod.). Tyto obrázky ovšem představují funkční spustitelný simulační model. Výhody použití simulačního jazyka Modelica jsou nejlépe vidět na jednoduchém příkladu úlohy dynamiky uvedeném níže [4].



Obrázek 4 – Popis úlohy v Modelice a v Simulinku [6]

Pokud bychom měli inverzní úlohu dynamiky, tzn. předepsáno $x(t)$ a na základě toho určit $F(t)$, byl by popis v Modelice úplně stejný, jako na obrázku (Obrázek 4). Kdybychom ovšem chtěli tuto inverzní úlohu popsat v Simulinku, museli bychom obrátit směr a všechny operace nahradit inverzními [6].

Další ukázkou výhod Modelicy je řešení ohřívání a ochlazování místnosti v [3]. V tomto článku je řečeno, že úprava modelu v Simulinku (spojení 2 modelů pokoje s jedním oknem do



modelu dvoupokojového domu) byla natolik náročná (bez kompletního předělání modelu dokonce nemožná), že celou simulaci raději reimplementovali v programu Dymola [3].

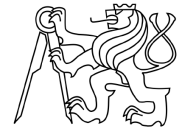
2.4 Software OpenModelica

OpenModelica je open-source modelovací a simulační prostředí pro komerční i akademické využití založené na modelovacím jazyce Modelica [7]. Tento software je možno použít pro simulaci a optimalizaci složitých problémů např. pro optimalizaci elektráren, v letectví, v automotive nebo pro zpracování signálu. Modely vytvořené v softwaru OpenModelica jsou při spuštění simulace automaticky zkontrolovány, zjednodušeny a zkompileovány do jazyka C nebo C++, ve kterém probíhá samotné řešení. Řešení je zobrazeno ve formě okamžitých hodnot proměnných a grafů, zobrazujících jejich vývoj v čase. OpenModelica umožňuje řešení systémů popsaných algebraickými a obyčejnými diferenciálními rovnicemi s časovou derivací. Řešení parciálních diferenciálních rovnic nebylo implementováno a jazyk Modelica ani není přizpůsoben pro řešení problémů popsaných PDR numericky (MKP, MKO, ...). K tomuto účelu jsou vyvinuté jiné programy speciálně k tomu určené (Ansys, Abaqus, ...).

Software OpenModelica jsem pro svoji práci zvolil, protože se jedná o volně dostupný program využívající jazyka Modelica, v němž již byla s úspěchem modelována problematika týkající se tepelných výměníků a problematika sdílení tepla obecně [3]. Tento software je také vhodný pro modelování složitých struktur obsahujících řídicí prvky (např. PID regulátory), což se může hodit při praktických aplikacích v této práci vyvinutého modelu, protože účelem práce je poskytnout model s vyhovující přesností, který bude výpočetně dostatečně jednoduchý pro použití v simulaci většího celku. Velkou výhodou je také fakt, že se jedná o open-source program. OpenModelica má několik klíčových součástí, ze kterých by bylo vhodné alespoň ty nejdůležitější zmínit.

2.4.1 OpenModelica Connection Editor (OMEdit)

Jedná se o pokročilý editor se snadno pochopitelným a uživatelsky příjemným grafickým rozhraním. V tomto editoru se tvoří všechny součásti modelu, spojují se v něm jednotlivé komponenty, spouští se prostřednictvím něj simulace a zobrazují se v něm výsledky. Modely v tomto editoru jsou jak grafické, tak i textové a dají se upravovat prostřednictvím obou rozhraní (grafického i textového). Veškeré úpravy modelu se provádí v tomto editoru. Prostřednictvím tohoto editoru lze také načíst předprogramované knihovny s velkým množstvím různých prvků, které lze použít v modelech. Prostřednictvím OMEdit se také dají



tvořit vlastní třídy, popsané příslušnými rovnicemi, které se pak použijí v modelech. Tento editor komunikuje s OMC (odesílá model ke kompilaci a přijímá a interpretuje výsledky) [8].

2.4.2 OpenModelica Compiler (OMC)

Tento compiler slouží k převodu modelu vytvořeného v OMEdit do programovacího jazyka C. Součástí kompilace v OMC je tabulka symbolů obsahující definice tříd, funkcí a proměnných a také propojení kódu s vybranými řešiči ODR a algebrodiferenciálních soustav rovnic. Tento compiler má také své rozhraní, ve kterém se zobrazují hlášení ohledně kompilace modelu a případné chyby. OMC je psán v jazyce MetaModelica, což je standardizovaný, na rovnicích založený jazyk [9].

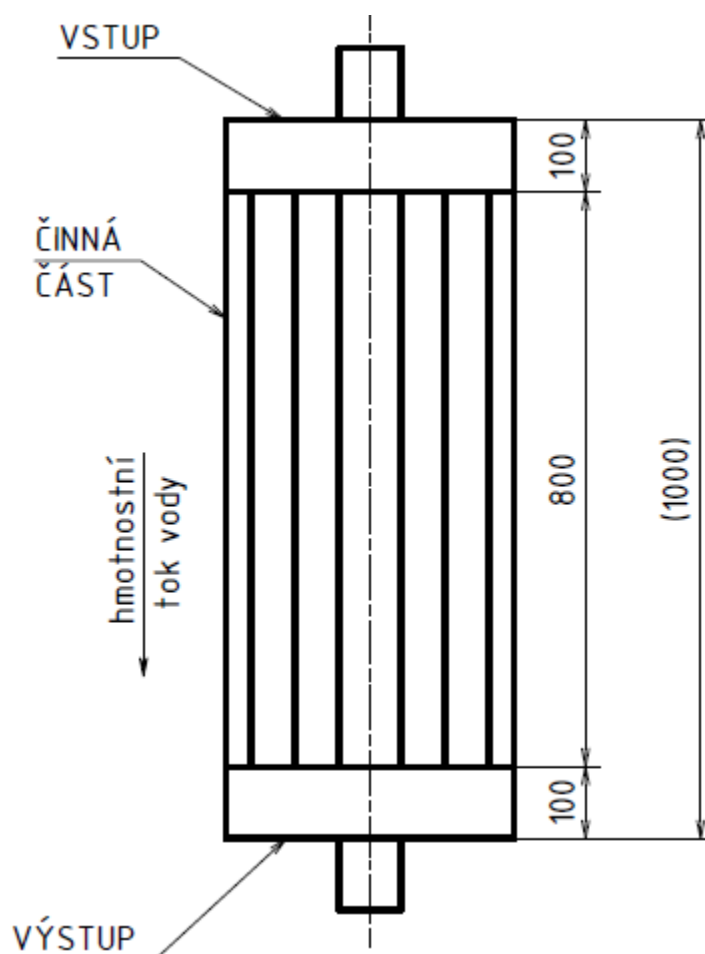
Součástí OpenModelicy jsou také rozhraní pro komunikaci s jinými programovacími a modelovacími jazyky (Python, Matlab). OMPython je rozhraní, které umožňuje přístup k modelovacím a simulačním schopnostem OpenModelicy z prostředí jazyka Python. OMMatlab slouží ke stejnému účelu, pouze z prostředí Matlab. Tyto nástroje slouží pro zvýšení flexibility řešení různých problémů, protože některé části řešeného problému mohou být lépe řešitelné např. v Matlabu a jiné naopak v OpenModelice.

Součástí OpenModelicy jsou i další moduly (např. příkazový řádek OMSHELL), jejichž znalost však není pro základní užívání programu nezbytná a ani v této práci nejsou použity.

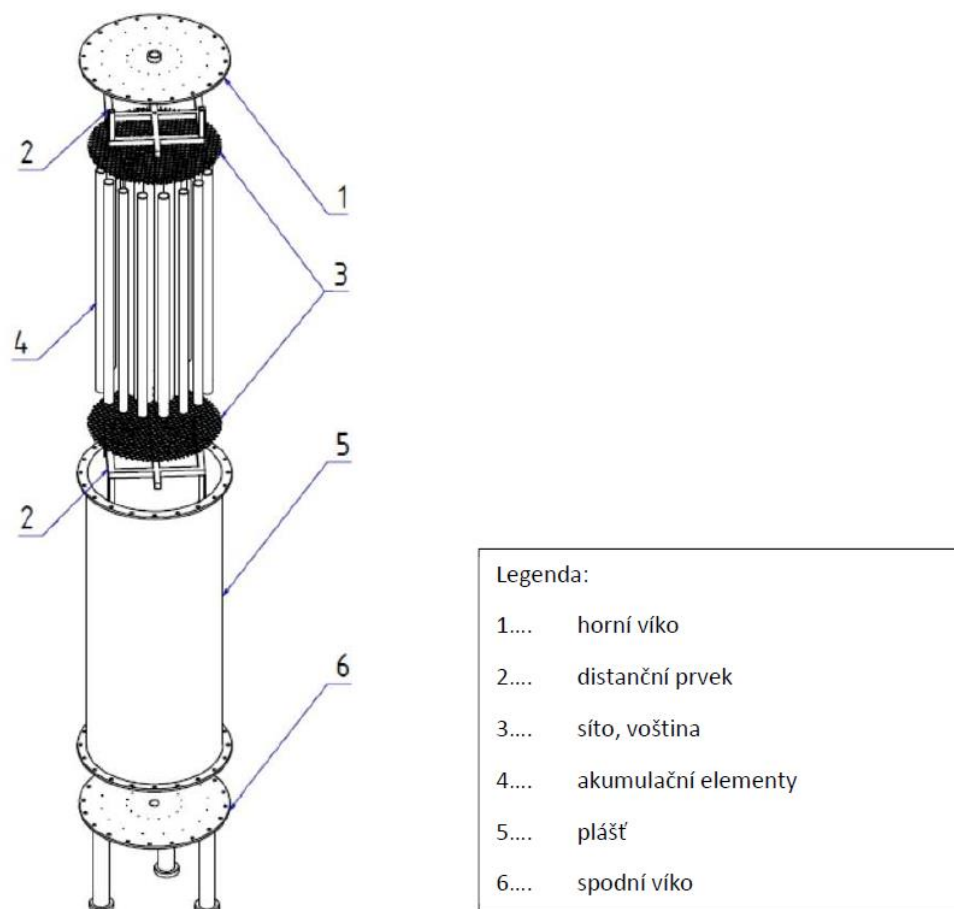


3 Vnitřní struktura zásobníku tepla s fázovou přeměnou

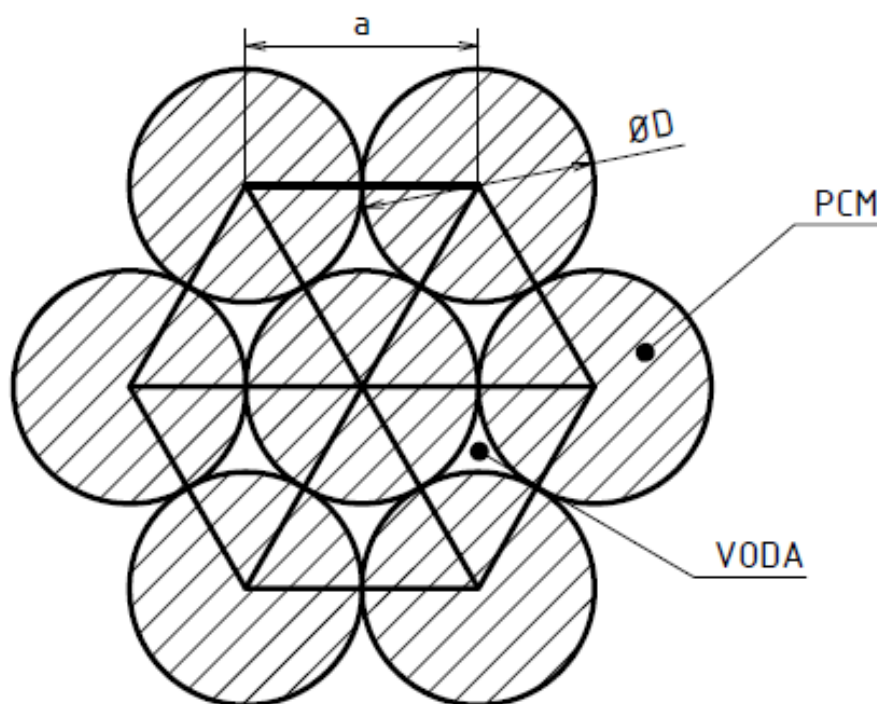
Experimentální zásobník tepla s fázovou přeměnou, jehož matematický model se snažím vytvořit, má podobu válcové nádrže o průměru 400 mm a délce 1000 mm, ve které jsou usazeny trubky o vnějším průměru 30 mm, tloušťce stěny 1 mm a délce 800 mm. Tyto trubky jsou naplněny PCM a jsou poskládány tak, že se teoreticky každá trubka dotýká všech šesti sousedních trubek. V praxi se samozřejmě kontaktu trubky se všemi jejími sousedy nedá docílit. V experimentálním akumulátoru se tomu však snažíme maximálně přiblížit, protože tím dosáhneme maximální hmotnosti PCM v akumulátoru při minimálním zastavěném objemu. Nádrž je ustavena vertikálně (osy trubek a nádrže jsou svislé) s přívodem studené vody v horní části a odvodem teplé vody ve spodní části. Volné prostory nad a pod trubkami jsou nechány záměrně, kvůli zajištění proudění vody kolem všech trubek a jejich, pokud možno rovnoměrného, ochlazování. Pro lepší ilustraci poslouží následující obrázky (Obrázek 5 – Obrázek 8).



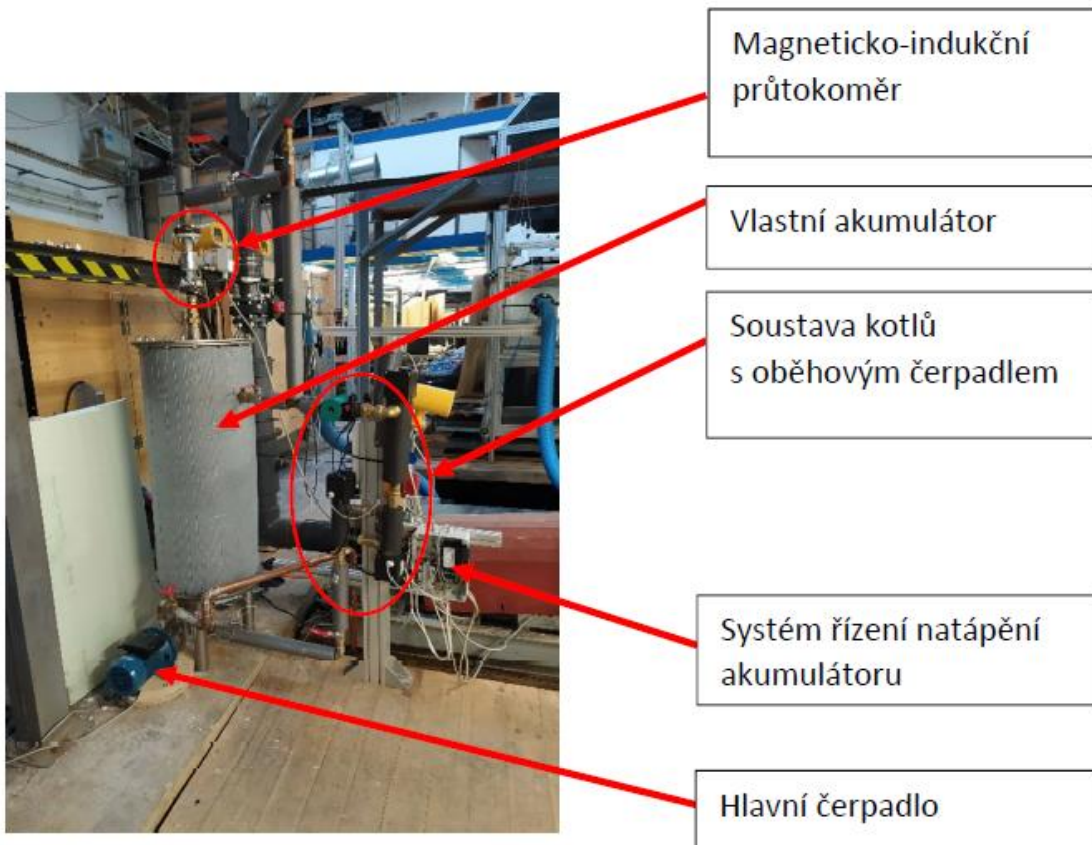
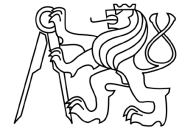
Obrázek 5 – Schéma akumulátoru v osovém řezu



Obrázek 6 – Expanzní výkres akumulátoru [10]



Obrázek 7 – Schéma části akumulátoru v příčném řezu



Obrázek 8 – Foto měřicí stanice s popisky [10]

Na obrázku (Obrázek 7) má a význam vzdálenosti os trubek a D má význam vnějšího průměru použité trubky. V případě tohoto experimentálního akumulátoru platí $a = D$, ale obecně tomu tak být nemusí.

V experimentálním akumulátoru tepla bylo použito PCM RT35HC od firmy Rubitherm. Jedná se o organickou látku ze skupiny parafínů se jmenovitou teplotou fázové přeměny 35°C. Níže je uveden výčet parametrů této látky, které jsou pro tvorbu modelu podstatné [11].

$$t_t = 35 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$c_{ps} = c_{pl} = 2000 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$h_t = 206580 \text{ J kg}^{-1}$$

$$\rho_l = 770 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\rho_s = 880 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\lambda_s = \lambda_l = 0,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$



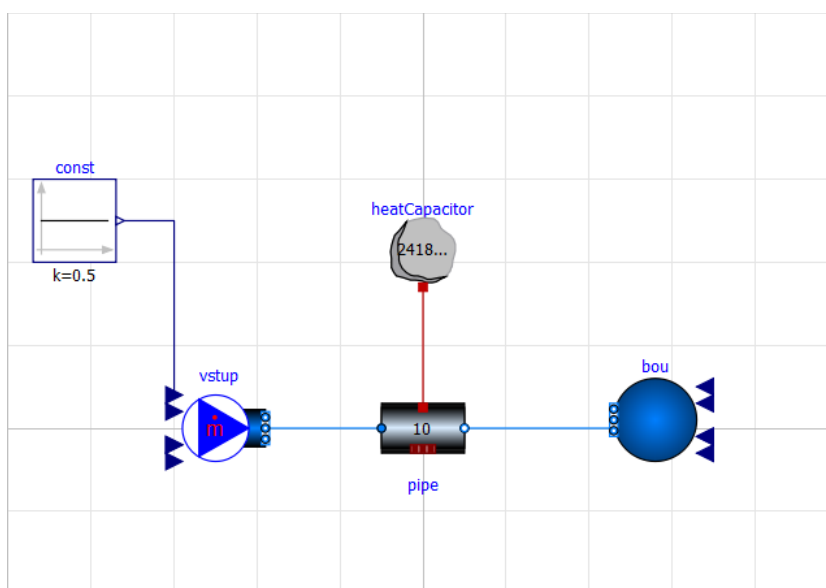
4 Tvorba simulace v softwaru OpenModelica

Když máme nyní utříděné a shrnuté potřebné teoretické znalosti o PCM a simulačním programu, ve kterém budeme simulaci provádět, můžeme přistoupit k samotné tvorbě simulace.

4.1 Počáteční stav

Na počátku mého řešení problematiky akumulátoru tepla s fázovou přeměnou jsem vycházel ze třídy (class) HeatCapacitor (zásobník tepla) s konstantní tepelnou kapacitou, který je součástí knihoven softwaru OpenModelica. Tato komponenta dokáže poměrně přesně popsat tepelnou kapacitu a tepelný tok u látek složených z jedné fáze s konstantní tepelnou kapacitou a bez teplotního gradientu (např. ocelové trubky), ale naprosto se nehodí pro popis fázové změny z toho důvodu, že při fázové změně tepelná kapacita výrazně závisí na teplotě. Tato součást neumožňuje zadat tepelnou kapacitu jako funkci teploty, proto jsem si musel vytvořit součást vlastní, která toto umožňuje.

Na obrázku (Obrázek 9) je vidět základní konfigurace činné části akumulátoru. Do tohoto raného modelu nejsou zahrnuty prostory nad a pod trubkovou částí akumulátoru, které jsou z hlediska simulace velmi podstatné. Délka výpočtové trubky odpovídá délce trubek s PCM v reálném akumulátoru a průměr je stanoven tak, aby obsahovala stejné množství vody jako činná část reálného akumulátoru. Tímto je v modelu zajištěn stejný průtočný průřez v činné části akumulátoru a stejná rychlost proudění vody jako v reálném akumulátoru.



Obrázek 9 – První model akumulátoru tepla



4.2 Popsání fázové změny látky tuhnoucí při klesající teplotě

4.2.1 Závislosti sdílení tepla

Pro řešení problematiky akumulátoru tepla s fázovou přeměnou s modelem uvedeným v kapitole 4.1 nevystačíme a v softwaru OpenModelica není předprogramována třída s proměnnou měrnou tepelnou kapacitou. Vytvoříme proto vlastní zásobník tepla, který toto umožní. Pro začátek je nezbytně nutné uvědomění si některých závislostí, které pro sdílení tepla platí.

První termodynamický zákon pro entalpii:

$$\partial Q = dH + dW_t = dH - V \cdot dp \quad (1)$$

Pro náš případ, kde předpokládáme stálý tlak PCM platí:

$$dp = 0 \quad (2)$$

$$\partial Q = dH \quad (3)$$

Za předpokladu stejné teploty veškeré popisované látky hmotnosti m (teplota není funkcí souřadnice) platí:

$$dH = c_p \cdot m \cdot dT \quad (4)$$

Pro získání měrného přírůstku entalpie stačí předcházející rovnici vydělit hmotností m

$$dh = c_p \cdot dT \quad (5)$$

Nyní je třeba přistoupit k popsání změny entalpie při fázové změně:

$$dH = h_t \cdot dm_l \quad (6)$$

Kde h_t je entalpie tání a m_l je hmotnost kapalné složky.

Opět můžeme přejít do měrných veličin:

$$dh = \frac{h_t \cdot dm_l}{m} = h_t \cdot d\left(\frac{m_l}{m}\right) = h_t \cdot d\zeta \quad (7)$$

Kde ζ je hmotnostní podíl kapalné fáze.

Celkový elementární přírůstek měrné entalpie bude tedy roven:

$$dh = dh_l + dh_s + dh_{lat} = c_{pl} \cdot \zeta \cdot dT + c_{ps}(1 - \zeta)dT + h_t \cdot d\zeta \quad (8)$$



$$dh = c_{pl} \cdot \zeta \cdot dT + c_{ps}(1 - \zeta)dT + h_t \left(\frac{\partial \zeta}{\partial T} dT + \frac{\partial \zeta}{\partial p} dp \right) \quad (9)$$

Za výše uvedeného předpokladu konstantního tlaku lze psát:

$$dh = c_{pl} \cdot \zeta \cdot dT + c_{ps}(1 - \zeta)dT + h_t \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial T} dT = c_p \cdot dT \quad (10)$$

$$c_p = c_{pl} \cdot \zeta + c_{ps}(1 - \zeta) + h_t \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial T} \quad (11)$$

Kde c_{pl} je měrná tep. kapacita kapalně fáze a c_{ps} je měrná tep. kapacita tuhé fáze. c_p můžeme nazvat redukovanou měrnou tepelnou kapacitou.

Odtud už z diferenciálu měrné entalpie snadno získáme vztah pro celkový tepelný tok do zásobníku tepla za předpokladu teploty nezávislé na souřadnici (teplota je v každém okamžiku v celé hmotě látky stejná):

$$\dot{Q} = c_p \cdot m \cdot \frac{dT}{dt} \quad (12)$$

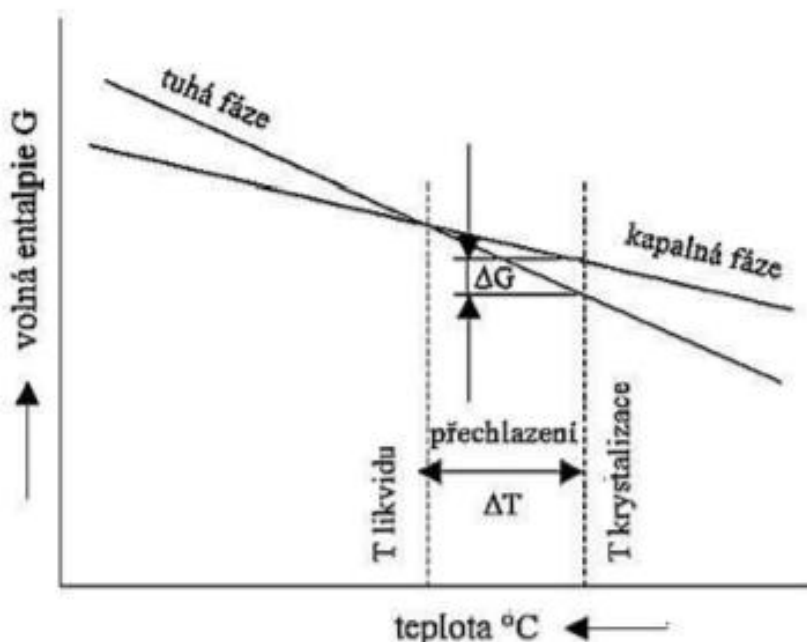
Nyní máme popsány tepelný tok do zásobníku tepla za předpokladu stejné teploty v celém objemu PCM. Redukovaná měrná tepelná kapacita c_p však závisí na neznámých funkcích $\zeta(T)$ a $\frac{\partial \zeta(T)}{\partial T}$. Stanovení těchto funkcí je úkolem pro následující kapitolu.

4.2.2 Termodynamické vlastnosti látky tuhnoucí při klesající teplotě

Pro termodynamické vlastnosti látek při změně fáze je velmi důležitým fenoménem hystereze. V jejím důsledku se látka chová jinak při tání a jinak při tuhnutí. Toto je také třeba v modelu zásobníku tepla zohlednit. PCM, jako všechny látky, taje při mírně vyšší teplotě, než při které tuhne, což je dáno podmínkami uskutečnění děje (musí platit $dg < 0$; $g = h - T \cdot s$, kde g je měrná Gibbsova entalpie, někdy také nazývána jako volná entalpie a s je měrná entropie). V rovnovážném stavu soustavy nabývá Gibbsova entalpie vždy svého minima. V případě jakékoli změny podmínek tím pádem nastane zvýšení Gibbsovy entalpie a tím vznikne spád dg , který je hnacím motorem změny stavu. Stav se mění ve směru klesající Gibbsovy entalpie. Soustava samovolně spěje k dosažení nového rovnovážného stavu, charakterizovaného novým minimem Gibbsovy entalpie, tudíž v rovnovážném stavu musí platit $dg = 0$. Proto je nutné, aby nastala změna stavu, vychýlit systém z rovnováhy. V našem případě je toho dosaženo změnou teploty na teplotu jinou než rovnovážnou (teplotu likvidu). Také by bylo možné vychýlit systém z rovnováhy změnou jiného parametru (např. tlaku), ale toto není pro tuto práci podstatné [12].



Z výše uvedeného přímo vyplývá hystereze mezi táním a tuhnutím. Aby látka začala tát, je třeba ji přehřát nad rovnovážnou teplotu pro dané ζ , aby vznikl potřebný spád dg . Aby látka začala tuhnout, je naopak nutné ji podchladit. Pro reálné tání nebo krystalizaci však nestačí elementární spád dg , nýbrž tento spád musí mít vzhledem k ostatním probíhajícím procesům, např. vzniku krystalizačních jader při tuhnutí či rozrušení krystalické struktury pevné látky při tání, konečnou velikost. Určitý spád Δg je také nutný pro zajištění dynamiky krystalizačních (tavných) pochodů proti uvolňovanému (přijímanému) latentnímu teplu. Z těchto důvodů není potřebné podchlazení (přehřátí) diferenciálem, ale nabývá konečné hodnoty [12].



Obrázek 10 – Změna volné entalpie s teplotou [12]

Nyní tedy stačí získat závislosti $\zeta(T)$ a $\frac{\partial \zeta(T)}{\partial T}$ a budeme mít shromážděny všechny poznatky potřebné k vytvoření modelu zásobníku s fázovou změnou. Získání závislostí $\zeta(T)$ a $\frac{\partial \zeta(T)}{\partial T}$ není triviální úkol, vyžaduje mnoho naměřených dat a použití nelineární interpolace pro jejich proložení správnou křivkou, která bude splňovat všechny termodynamické podmínky. Proto jsem pro tuto část použil program vytvořený panem doc. Hyhlíkem, který mi byl v rámci řešení mé práce poskytnut. Z programu doc. Hyhlíka lze vyčíst, že závislost $\zeta(T)$ odpovídá lineární kombinaci 2 distribučních funkcí Gumbelova rozdělení pravděpodobnosti a závislost $\frac{\partial \zeta(T)}{\partial T}$ tím pádem odpovídá stejné lin. kombinaci hustot pravděpodobnosti pro tato rozdělení. Vzhledem k tomu, že pro naši aplikaci předpokládáme ζ pouze jako funkci teploty, můžeme místo parciální derivace psát derivaci obyčejnou.



Pro aplikaci Gumbelova rozdělení na hmotnostní zlomek kapalné fáze platí:

$$\zeta_i(T) = 1 - \exp \left[-\exp \left(\frac{T - \mu_i}{\beta_i} \right) \right] \quad (13)$$

$$\frac{d\zeta_i}{dT} = \frac{1}{\beta_i} \cdot \exp \left(\frac{T - \mu_i}{\beta_i} \right) \cdot \exp \left[-\exp \left(\frac{T - \mu_i}{\beta_i} \right) \right] \quad (14)$$

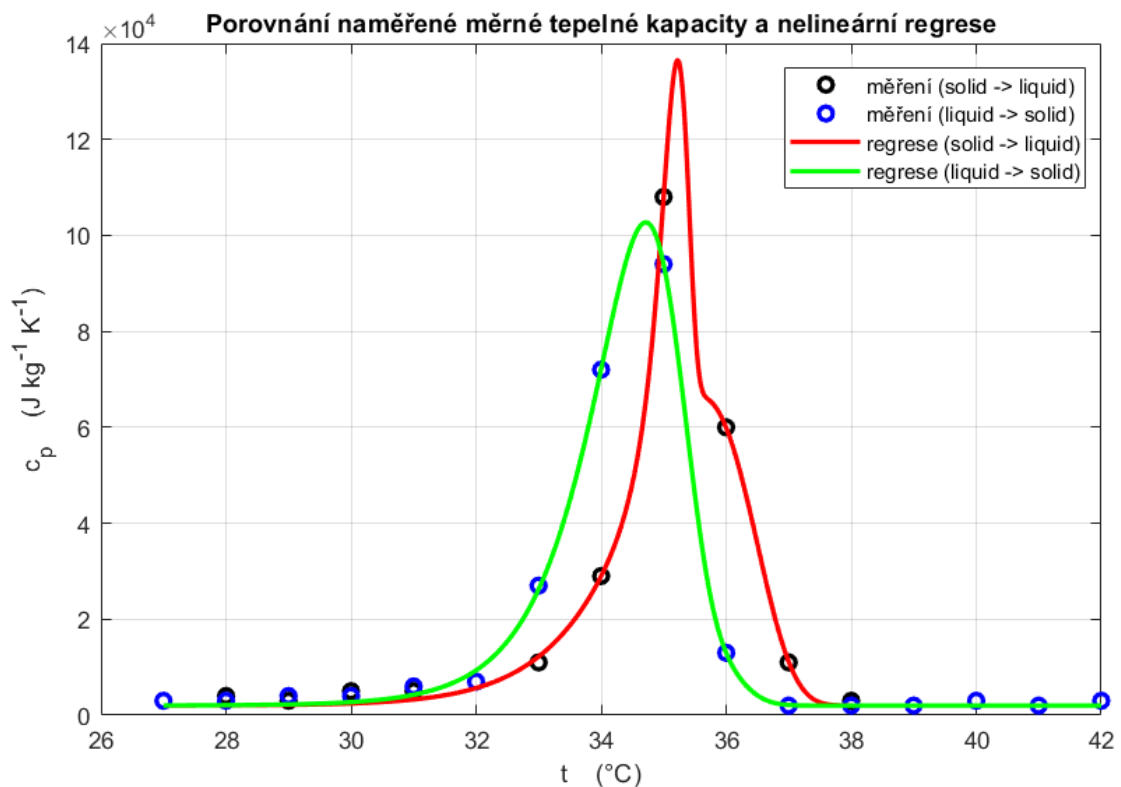
Kde μ se dá odhadnout jako střední teplota fázové přeměny a β souvisí s teplotním rozsahem, ve kterém přeměna probíhá.

Výsledná funkce popisující tání nebo tuhnutí PCM je lineární kombinací 2 Gumbelových rozdělení:

$$\zeta = w_1 \cdot \zeta_1 + (1 - w_1) \cdot \zeta_2 \quad (15)$$

$$\frac{d\zeta}{dT} = w_1 \cdot \frac{d\zeta_1}{dT} + (1 - w_1) \cdot \frac{d\zeta_2}{dT} \quad (16)$$

Kde koeficient w_1 je také získán z nelineární interpolace.



Obrázek 11 – Porovnání výrobce udávaných hodnot pro látku RT 35 HC s regresí

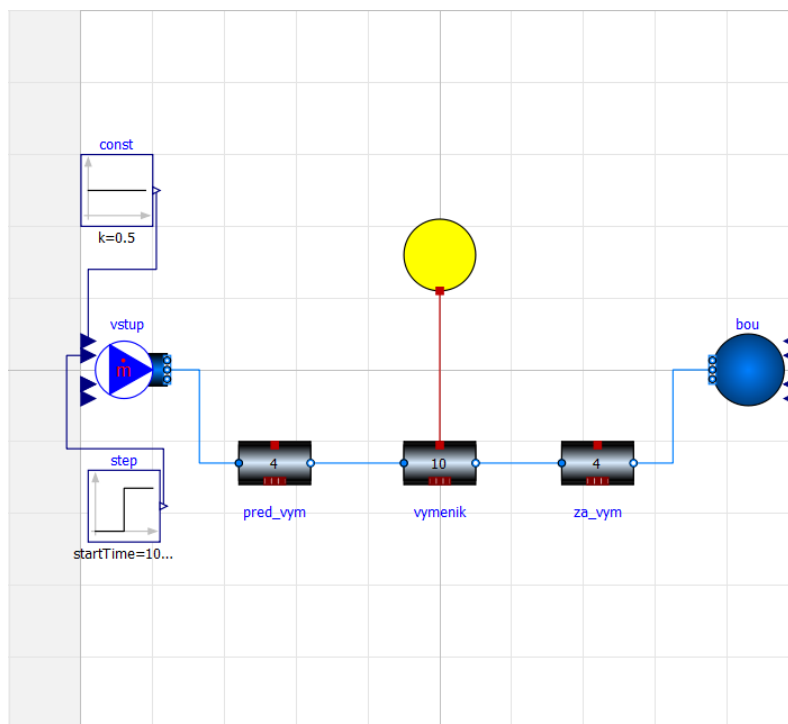


Data pro interpolaci přebírána z měření výrobce, viz [11]. Z dat dostupných na stránkách výrobce lze provést interpolaci i pro jiná PCM (např. SP 31, RT 44 HC, SP 50 aj.). Po provedení interpolace je vždy potřeba její kvalitu zhodnotit a rozhodnout o tom, zda je tato metoda interpolace pro dané PCM použitelná. Popis pomocí Gumbelova rozdělení se hodí pouze pro látky, které tají a tuhnou ve velmi úzkém rozsahu teplot. Pro jiné látky poskytuje tato interpolace nepřesné (nebo i zcela zjevně nesmyslné) výsledky.

4.2.3 Popsání látky tuhnoucí při klesající teplotě v programu

Když máme nyní shromážděny všechny potřebné znalosti, můžeme přistoupit ke tvorbě prvního modelu zásobníku tepla s nekonstantní měrnou tepelnou kapacitou. Mějme na paměti, že každá závislost (ohřev i chladnutí) je popsána lineární kombinací 2 Gumbelových rozdělení, proto pro kompletní popsání závislostí ohřevu a chladnutí potřebujeme 4 konstanty μ , 4 konstanty β a 2 konstanty w_1 popisující lineární kombinaci. K tomu dále potřebujeme konstanty termodynamické, tj. c_{pl} , c_{ps} a h_t .

Spolu s tímto rozpracováním modelu zásobníku jsem do modelu přidal části akumulátoru nad a pod jeho činnou částí, které jsou důležité zvláště na začátku simulace (je v nich uložena teplá voda, která velmi výrazně ovlivňuje chování akumulátoru). Stav modelu v této fázi ukazuje následující obrázek (Obrázek 12).



Obrázek 12 – Kompletní schéma akumulátoru bez řešení prostupu tepla stěnou trubky



4.3 Řešení prostupu tepla

Model v kapitole 4.2.3 je však stále velmi nedokonalý, protože neřeší prostup tepla skrz PCM a stěnu trubky do vody. Model ve stavu, v jakém byl popsán v kapitole 4.2.3 stále ještě nelze použít k získání validních výsledků, protože řešení prostupu tepla stěnou je pro přesnost a samotnou platnost modelu minimálně stejně důležité, jako správné popsání fázové přeměny.

Řešení prostupu tepla je v tomto případě velmi složité, protože celý obsah trubky včetně její stěny se chová jako izolace a současně jako velmi proměnná tepelná kapacita (proměnnost souvisí s fázovou změnou). V žádném případě proto nevystačíme se třídami definovanými v Modelice a musíme si vytvořit vlastní součásti, které přiměřeně zjednodušeným způsobem, avšak s přijatelnou chybou, popíše prostup tepla PCM a stěnou trubky. Modelice neumožňuje řešení parciálních diferenciálních rovnic, proto nemůžeme pro řešení prostupu tepla použít parciální diferenciální rovnice vedení tepla a musíme se obejít bez nich. Toto je možné, bude to však za cenu určitých předpokladů a způsob řešení může být významným zdrojem chyb v modelu.

4.3.1 První řešení prostupu tepla

Moje úvaha byla taková, že drtivá většina tepla uvolněného při ochlazování PCM se uvolní při fázové změně (peak redukované měrné tepelné kapacity c_p dosahuje při vrcholící fázové přeměně cca padesátinásobku hodnoty c_{ps} a c_{pl}). Proto prostup tepla PCM popíše jako prostup tepla silnostěnnou válcovou trubkou s proměnným vnitřním poloměrem. Abych se vyhnul komplikovanému popisu prostupu tepla obvodem válce a zároveň jeho podstavami, řeknu, že tepelný tok podstavami je nulový => PCM tuhne pouze radiálně, tuhnutí u podstav se neuvažuje => délka části trubky, v níž je přítomno kapalné PCM je konstantní a je rovna počáteční délce trubky. Abych ovšem prostup tepla podstavami zohlednil alespoň ve zjednodušené formě, definuji tzv. efektivní délku trubky, což je délka fiktivní válcové trubky bez podstav, která má stejnou teplosměnnou plochu, jako původní válcová trubka s podstavami („rozvinu“ kruhové podstavy do válcové plochy).

Jelikož uvažujeme tuhnutí PCM pouze radiálně, můžeme při dalším zjednodušení tím, že budeme rychlost tuhnutí PCM uvažovat po délce trubky konstantní a tím, že budeme uvažovat konstantní hustotu PCM určit poloměr fázového rozhraní jako funkci ζ .

Pro čistě radiální tuhnutí platí, že V_l je objem válce o délce l , která je rovna délce trubky a poloměru R_{int} , který je roven poloměru válcového fázového rozhraní. Objem V_s je pak roven



doplňku do objemu V (objem mezi válcem o poloměru R_{int} a válcem o poloměru $R-s$, kde R je vnější poloměr trubky a s je tloušťka stěny).

Rovnice tedy budou formulovány za následujících předpokladů:

- 1) PCM tuhne rotačně symetricky a pouze radiálně.
- 2) Tuhnutí v axiálním směru v blízkosti podstav se neuvažuje.
- 3) Rychlost tuhnutí PCM je po celé délce trubky stejná.
- 4) Veškeré teplo se uvolní na fázovém rozhraní, tepelná kapacita ztuhlého PCM se při odvození neuvažuje (v odvození uvolněného tepla je však zahrnuta), stejně jako se neuvažuje tepelná kapacita kapalného PCM a vedení tepla z kapalně fáze na fázové rozhraní. Ztuhlé PCM se chová čistě jako izolace.
- 5) Tok tepla podstavami je zohledněn pouze jejich rozvinutím do válcové plochy zavedením tzv. efektivní délky trubky l_{ef} .
- 6) Hustota PCM se v průběhu celého procesu tuhnutí nemění a je rovna hustotě v kapalném skupenství (hmotnost PCM v trubkách je dána jejich vnitřním objemem a hustotou ρ_l).

$$S = S_{ef} \rightarrow 2\pi \cdot r \cdot l + 2\pi \cdot r^2 = 2\pi \cdot r \cdot l_{ef} \quad (17)$$

$$l_{ef} = l + r \quad (18)$$

$$m = m_s + m_l \quad (19)$$

$$V = V_s + V_l \quad (20)$$

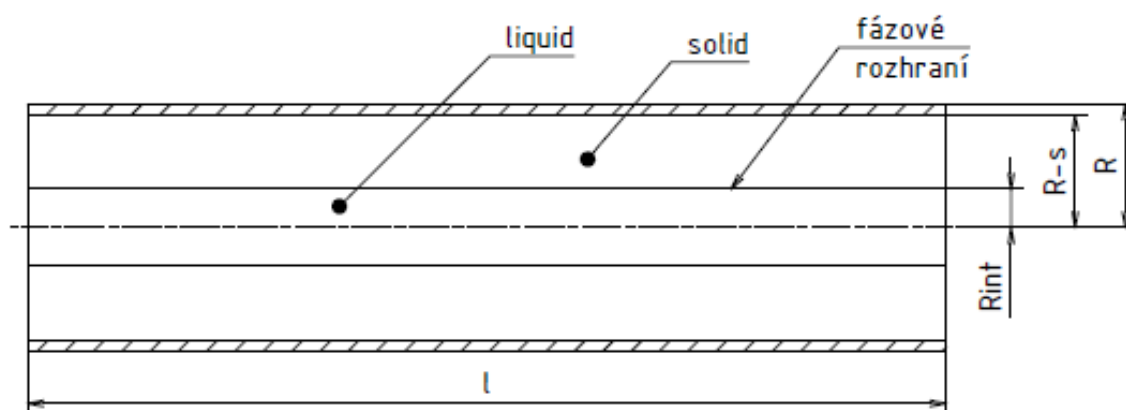
$$\rho = \rho_s = \rho_l = konst \rightarrow \frac{V_l}{V} = \frac{V_l \cdot \rho}{V \cdot \rho} = \frac{m_l}{m} = \zeta \quad (21)$$

$$V = \pi(R - s)^2 \cdot l \quad (22)$$

$$V_l = \pi \cdot R_{int}^2 \cdot l \quad (23)$$

Z poměru V_l/V lze určit R_{int}

$$\frac{V_l}{V} = \frac{m_l}{m} \rightarrow \frac{\pi \cdot R_{int}^2 \cdot l}{\pi(R - s)^2 \cdot l} = \zeta \rightarrow R_{int} = (R - s) \cdot \sqrt{\zeta} \quad (24)$$



Obrázek 13 – Idealizovaný tvar fázového rozhraní

Vzhledem k tomu, že chci zohlednit tepelnou kapacitu trubek, rozdělím celkový prostup tepla na 2 části. První část je přestup tepla na fázovém rozhraní a vedení tepla PCM, druhá část je pak vedení tepla trubkou a přestup tepla do vody. Mezi tyto části je vložena tepelná kapacita trubky.

Pro svazek silnostěnných válcových trubek je celkový tepelný tok skrze PCM

$$\dot{Q} = \frac{2\pi \cdot l_{ef} \cdot n}{\frac{1}{\alpha_{PCM} \cdot R_{int}} + \frac{\ln\left(\frac{R-s}{R_{int}}\right)}{\lambda_{PCM}}} \cdot \Delta T \quad (25)$$

Kde $l_{ef} = l + R_{int}$, n je počet trubek, α_{PCM} je součinitel přestupu tepla na fázovém rozhraní a λ_{PCM} je tepelná vodivost PCM. Způsob určení α_{PCM} je rozebrán dále v této kapitole.

Tepelný tok skrze trubky do vody je

$$\dot{Q} = \frac{2\pi \cdot l_{ef} \cdot n}{\frac{1}{\alpha_{voda} \cdot R} + \frac{\ln\left(\frac{R}{R-s}\right)}{\lambda_{tr}}} \cdot \Delta T \quad (26)$$

Kde $l_{ef} = l + R$, n je počet trubek, α_{voda} je součinitel přestupu tepla z trubek do vody a λ_{tr} je tepelná vodivost trubky.

Způsob určení α_{voda} je čistě z geometrie akumulátoru a platí pouze pro laminární proudění. Při jeho odvození se vychází ze schématu viz Obrázek 7.



Průtočná plocha jednoho kanálu

$$S = \frac{1}{2}a \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}a - 3 \cdot \frac{1}{6}\pi R^2 = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot a^2 - \pi \cdot \frac{R^2}{2} \quad (27)$$

Smočený obvod jednoho kanálu

$$o = 3 \cdot \frac{\pi}{3}R = \pi \cdot R \quad (28)$$

Každý kanál sousedí se třemi trubkami, proto vzhledem k symetrii připadá na každou trubku smáčenou daným kanálem jedna třetina kanálu (jak průtočné plochy, tak smočeného obvodu). Polovinu každé trubky smáčejí právě 3 kanály. Výsledná průtočná plocha a smočený obvod na polovinu trubky se proto rovnají přímo průtočné ploše a smočenému obvodu jednoho kanálu.

Celkový průtočný průřez činné části akumulátoru

$$S_C = 2 \cdot n \cdot S \quad (29)$$

Hydraulický průměr

$$D_h = \frac{4 \cdot S}{o} = \frac{\sqrt{3} \cdot a^2}{\pi \cdot R} - 2 \cdot R \quad (30)$$

Kriteriální rovnice pro Nusseltovo číslo v uzavřené geometrii při laminárním proudění (převzato z poskytnutého programu doc. Hyhlíka, ve kterém byla použitelnost této rovnice ověřena)

$$Nu = 3,66 + 4,12 \left(\frac{D_h}{R} - 0,205 \right)^{0,569} \quad (31)$$

Výpočet součinitele přestupu tepla α_{voda}

$$\alpha_{voda} = \frac{Nu}{R} \cdot \lambda_{voda} \quad (32)$$

Pro kontrolu platnosti vztahu (31) je třeba vypočítat Reynoldsovo číslo, protože tento vztah je použitelný pouze pro laminární proudění.

$$\bar{u} = \frac{\dot{m}}{\rho_{voda} \cdot S_C} \quad (33)$$

$$Re = \frac{\bar{u} \cdot D_h}{\nu} < 2300 \quad (34)$$

Odpor proti přestupu tepla na rozhraní PCM – trubka zanedbáme.



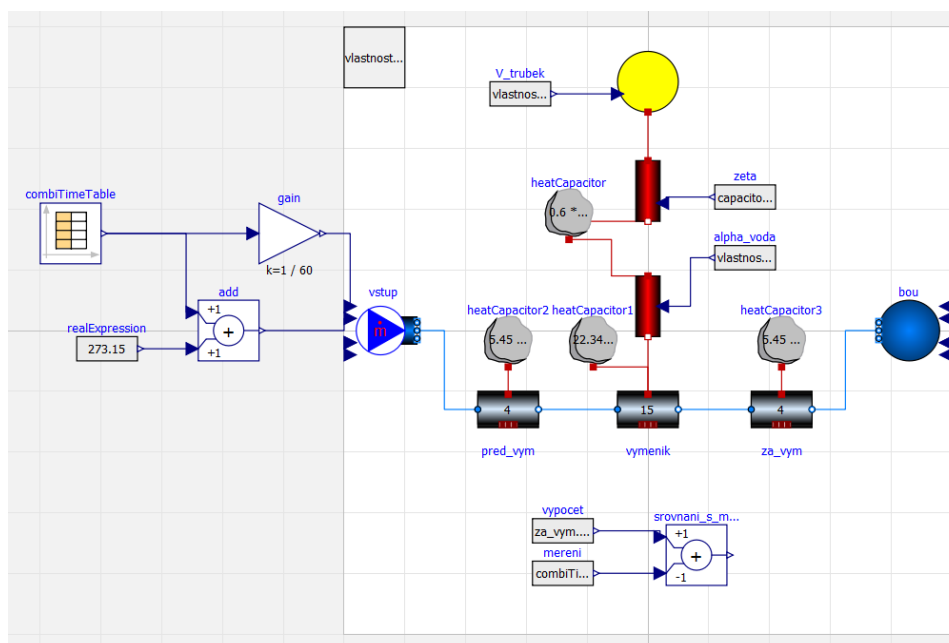
Tepelná kapacita trubek

$$C_{tr} = m_{tr} \cdot c_{ptr} \cdot n \quad (35)$$

Kde m_{tr} je hmotnost 1 trubky, c_{ptr} je měrná tepelná kapacita trubky a n je počet trubek.

Dále je nutné zohlednit tepelnou kapacitu nádoby, ve které je akumulátor uložen, včetně jejího rozdělení mezi oblasti před činnou částí akumulátoru, v činné části akumulátoru a za činnou částí akumulátoru.

Na následujícím obrázku (Obrázek 14) je vidět model akumulátoru v této fázi:



Obrázek 14 – Model akumulátoru se zahrnutím vstupních dat z experimentu

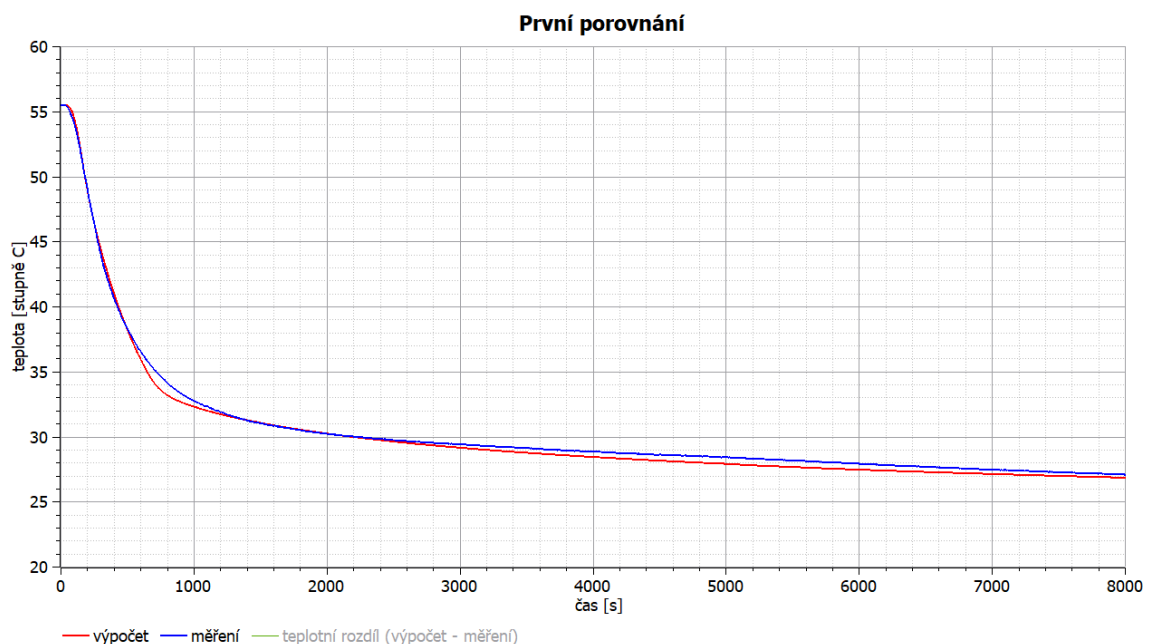
V modelu akumulátoru je také třeba zohlednit, že zdaleka ne všechna voda obsažená před a za činnou částí akumulátoru proteče skrze akumulátor ihned po spuštění přívodu vody. Toto je způsobeno vírovými strukturami kolem vpusti a za trubkami akumulátoru. Tento efekt je složitý na popis, jeho vliv je silně závislý na hmotnostním toku a také na geometrii vstupů a celého akumulátoru, proto ho odhadneme pomocí experimentálních dat. Způsob korekce tohoto jevu je snížením objemu vody před a za činnou částí akumulátoru v modelu tak, aby výsledek odpovídal experimentu.

Další vliv, který vstupuje do simulace a který nejsme schopni vyhledat, měřit, ani přibližně spočítat je součinitel přestupu tepla na straně PCM. Tento součinitel bude nabývat poměrně vysoké hodnoty (v řádu jednotek tisíc $W m^{-2} K^{-1}$), protože se jedná o přestup tepla

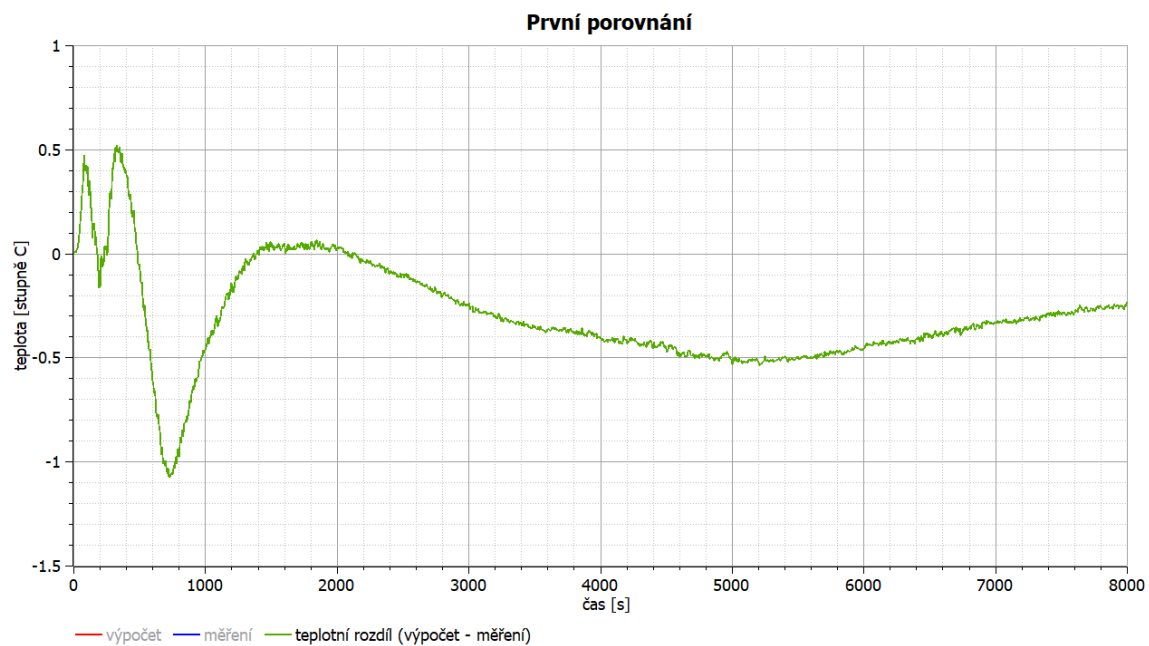


při fázové změně. Jeho hodnotu jsem odhadl na $2000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, ale porovnáním výsledků simulace s měřením jsem zjistil, že jeho velikost na simulaci nemá zásadní vliv, pokud je volena rozumně s ohledem na probíhající termodynamický děj (ve vysokých stovkách až nízkých tisících $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$).

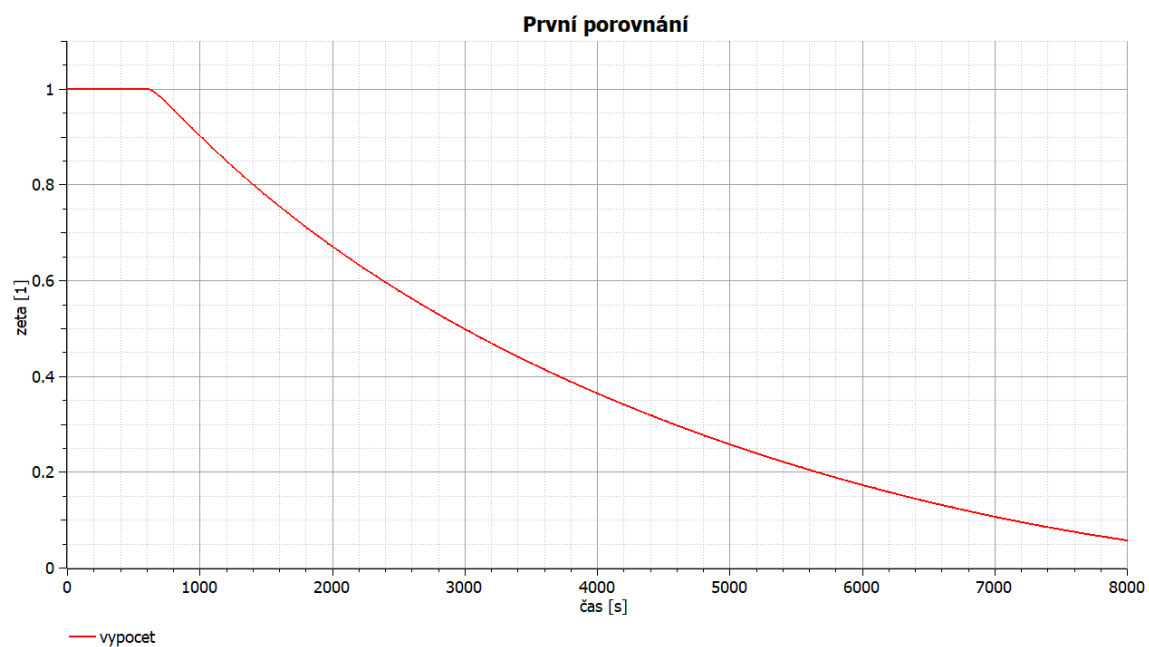
V tomto modelu prostupu tepla jsem přijal mnoho zjednodušujících předpokladů a požadavků, které musí být pro jeho platnost splněny, a proto je tento model prostupu tepla platný pouze pro $\zeta \geq 0,06$ (určeno korelací s experimentem). Pod touto hodnotou model pozbývá platnost a simulace přestává poskytovat validní výsledky. Výsledky simulace se od výsledků experimentu mírně liší vlivem zjednodušení problematiky prostupu tepla, zanedbáním vírových struktur před a za činnou částí akumulátoru, případně vlivem nepřesnosti měření. Měřená data končí v čase 8000 s. Jelikož hmotnostní tok vody a teplota vody na vstupu do akumulátoru jsou do programu importovány z měřených dat, nelze křivky extrapolovat za 8000 s. Proto je jako hraniční hodnota pro platnost modelu stanovena $\zeta(8000 \text{ s}) = 0,0568 \approx 0,06$.



Obrázek 15 – Naměřený a vypočtený průběh výstupní teploty v čase



Obrázek 16 – Průběh rozdílu vypočtené a naměřené teploty (v tomto pořadí) v čase



Obrázek 17 – Průběh hmotnostního zlomku kapalné složky v čase



4.3.2 Úprava a vylepšení řešení prostupu tepla

Množství předpokladů vyslovených v kapitole 4.3.1, které jsou na samé hranici fyzikálně možného a pravděpodobného, je pro platnost modelu zásadní a výrazně ji omezuje. Některých předpokladů je prakticky nemožné se, vzhledem ke zvolenému způsobu řešení, zbavit (zejména předpoklady uvedené pod čísly 1), 3) a 4) v kapitole 4.3.1), u jiných není jejich odstranění, či alespoň omezení jejich vlivu příliš velký problém. Mezi předpoklady patřící do druhé skupiny se řadí i předpoklad konstantní hustoty.

Předpoklad konstantní hustoty je výrazně omezující, protože se vůbec nesnaží reflektovat fyzikální realitu, hustota se při tuhnutí výrazně mění (změna hustoty je cca 14 % hustoty kapalně fáze). Tím pádem dochází k významnému omezení platnosti modelu a k jevům, které odporují fyzikální podstatě problému (R_{int} odvozený za předpokladu konstantní hustoty jde k 0 pro ζ jdoucí k 0, což v mém řešení prostupu tepla zabrání úplnému ztuhnutí PCM). Proto se pokusím předpokladu konstantní hustoty vyhnout a formulovat vztah pro R_{int} bez něj.

Všechny předpoklady formulované u prvního řešení prostupu tepla v kapitole 4.3.1 jsou platné i zde, s výjimkou bodu 6), který bude upraven na následující znění:

- 6) Hustota kapalně fáze je ρ_l , hustota pevně fáze je ρ_s , hmotnost PCM v trubkách je dána jejich vnitřním objemem a menší z obou hustot ρ_s, ρ_l

S tuhnutím PCM se zvyšuje jeho hustota, což při podmínce zachování hmotnosti a za předpokladů formulovaných výše vede k vytvoření válcové dutiny o délce trubky, která je s trubkou souosá a jejíž obsah může být pro naše účely považován za vakuum, resp. při dokonalé těsnosti trubky za syté páry PCM při dané teplotě, jejichž tepelná kapacita a celkové teplo v nich uložené je vzhledem k ostatním použitým aproximacím zanedbatelné. Z tohoto se již dá odvodit vztah pro poloměr fázového rozhraní R_{int} .

$$\pi \cdot R_{int}^2 \cdot l = V_l + V_{vak} = V - V_s \quad (36)$$

$$V_{vak} = V - V_s - V_l \quad (37)$$

$$V_s = \frac{m_s}{\rho_s} = \frac{m - m_l}{\rho_s} = \frac{(1 - \zeta) \cdot m}{\rho_s} \quad (38)$$

$$V_l = \frac{m_l}{\rho_l} = \frac{\zeta \cdot m}{\rho_l} \quad (39)$$



$$V = \pi(R - s)^2 \cdot l = \frac{m}{\rho_l} \quad (40)$$

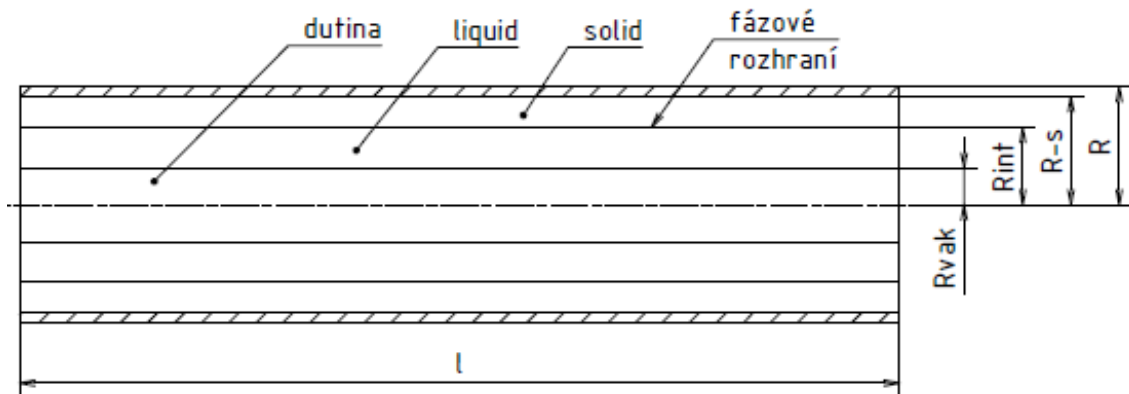
$$\frac{\pi \cdot R_{int}^2 \cdot l}{\pi(R - s)^2 \cdot l} = \frac{R_{int}^2}{(R - s)^2} = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{V_s}{V} = 1 - \frac{(1 - \zeta) \cdot m}{\frac{\rho_s}{\rho_l} \cdot m} = 1 - (1 - \zeta) \frac{\rho_l}{\rho_s} \quad (41)$$

$$R_{int} = (R - s) \cdot \sqrt{1 - \frac{(1 - \zeta) \cdot \rho_l}{\rho_s}} \quad (42)$$

Také lze určit poloměr dutiny uprostřed trubky

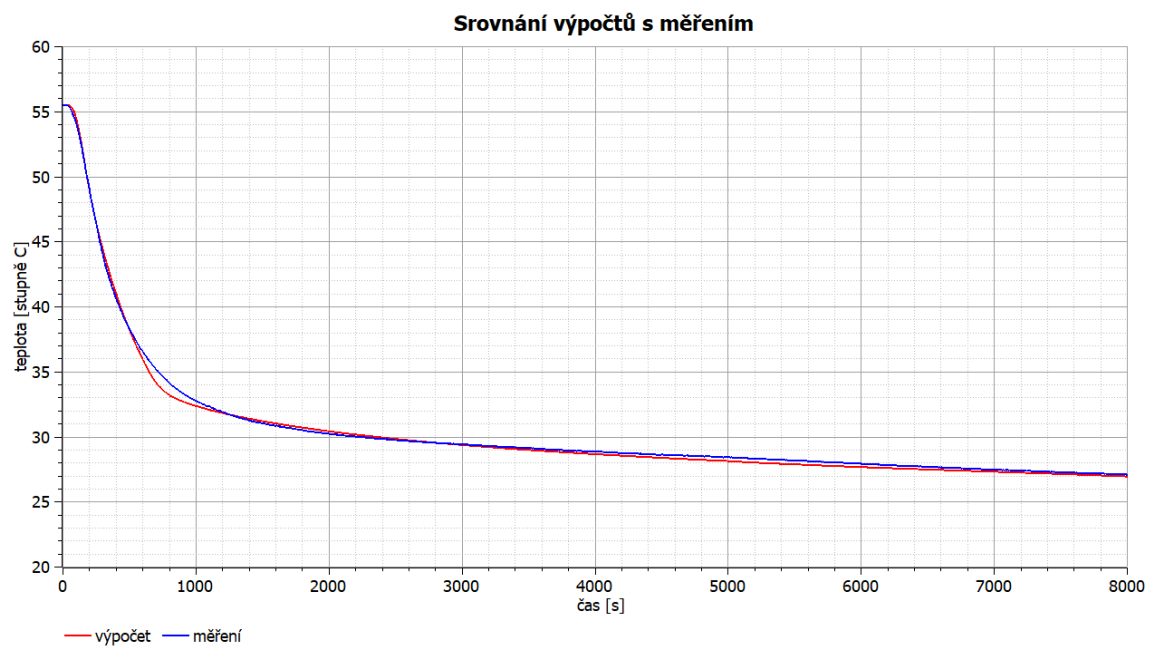
$$\begin{aligned} \frac{\pi \cdot R_{vak}^2 \cdot l}{\pi \cdot (R - s)^2 \cdot l} &= \frac{R_{vak}^2}{(R - s)^2} = \frac{V - V_s - V_l}{V} = 1 - \frac{V_s + V_l}{V} = 1 - \frac{\frac{(1 - \zeta) \cdot m}{\rho_s} + \frac{\zeta \cdot m}{\rho_l}}{\frac{m}{\rho_l}} = \\ &= 1 - \left[\zeta + (1 - \zeta) \cdot \frac{\rho_l}{\rho_s} \right] = (1 - \zeta) \cdot \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_s} \right) \end{aligned} \quad (43)$$

$$R_{vak} = (R - s) \cdot \sqrt{(1 - \zeta) \cdot \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_s} \right)} \quad (44)$$

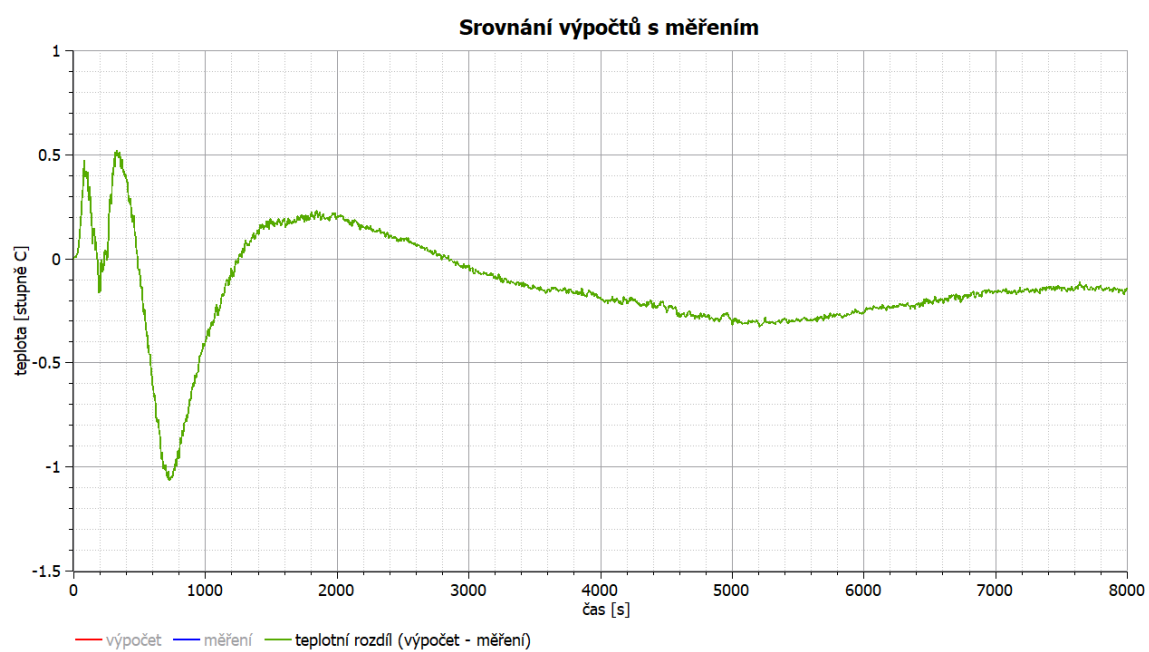


Obrázek 18 – Fázové rozhraní se změnou hustoty

Vztahy pro prostup tepla stěnou platí tak, jak byly odvozeny v prvním řešení prostupu tepla v kapitole 4.3.1. Změna se týká pouze vyjádření poloměru fázového rozhraní R_{int} .



Obrázek 19 – Naměřený a vypočtený průběh výstupní teploty v čase



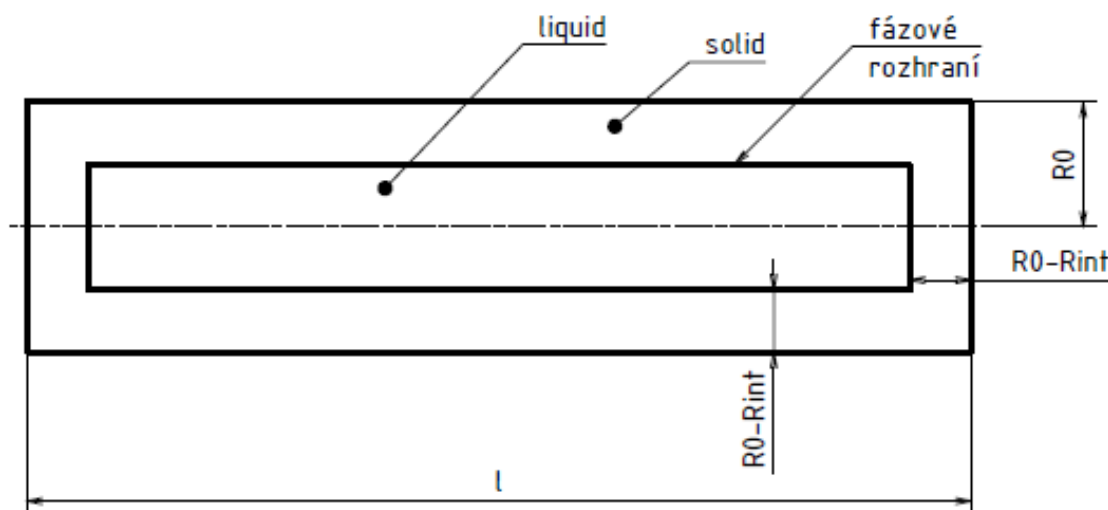
Obrázek 20 – Průběh rozdílu vypočtené a naměřené teploty (v tomto pořadí) v čase



V tomto modelu R_{int} nenabývá za žádných okolností nulové hodnoty, proto lze tento model považovat za platný v celém rozsahu pracovních teplot akumulátoru. Také lépe odpovídá fyzikální realitě tím, že respektuje změnu hustoty při tuhnutí a umožňuje úplné ztuhnutí PCM. Tímto se rozšiřuje platnost modelu, protože se o 1 snížil počet fyzikálně sporných předpokladů. Respektováním změny hustoty jsme se také vyhnuli dělení 0 v případě $\zeta \rightarrow 0$. Z grafů je vidět, že tento model pro stejné vstupní parametry lépe aproximuje měřená data. Ostatní omezení tohoto modelu však zůstávají stejná jako u prvního řešení prostupu tepla. Pro $\rho_s = \rho_l$ model přechází do modelu s konstantní hustotou.

4.4 Úprava tvaru fázového rozhraní (pro další zpřesnění řešení prostupu tepla)

Pro účely zpřesnění modelu prostupu tepla lze tvar fázového rozhraní upravit do podoby na následujícím obrázku (Obrázek 21) uvažováním tuhnutí PCM v blízkosti podstav. Pro jednoduchost je nutné uvažovat na podstavách stejnou rychlost tuhnutí jako na válcové části.



Obrázek 21 – Upravený tvar fázového rozhraní

Hodnotu R_s nahradíme označením R_0 , které značí vnitřní poloměr trubky. V_s značí objem ztuhlé části PCM. Pro takto zavedené fázové rozhraní lze psát (bez odvození):

$$\frac{V_s}{V} = \frac{\rho_l}{\rho_s} (1 - \zeta) = -\frac{2}{R_0^2 \cdot l} \cdot R_{int}^3 + \left(\frac{2}{R_0 \cdot l} - \frac{1}{R_0^2} \right) \cdot R_{int}^2 + 1 \quad (45)$$

Tento model fázového rozhraní byl použit pro určení tepelného toku podstavami a válcovou plochou trubky, nikoli však pro výpočet R_{int} , kde jsem se podržel v kapitole 4.3.2 odvozeného vztahu pro jednodušší tvar fázového rozhraní (důvody jsou uvedeny níže).



Vzhledem k chybám, kterých se dopouštíme ostatními aproximacemi, bez kterých nedokážeme tuto úlohu řešit relativně jednoduchým způsobem, nemá smysl pokoušet se zpřesňovat tvar fázového rozhraní. Výpočet je apriori zatížen chybami, na které nemá tvar fázového rozhraní vliv a jejichž vliv je řádově významnější než případné zpřesnění výpočtu vlivem mírného zpřesnění tvaru fázového rozhraní. Zpřesnění fázového rozhraní způsobí nárůst výpočetní náročnosti (jedná se o řešení obecného polynomu 3. stupně) aniž by přineslo zlepšení přesnosti simulace. Dále je problémem fakt, že při zpřesnění fázového rozhraní je třeba použít zápis ve tvaru implicitní funkce, což působí problémy s kořeny dané rovnice (vstupní hodnotou je ζ a pro každou hodnotu ζ od 0 do 1 má rovnice 3 kořeny). Vyjádření fázového rozhraní explicitně (jak je provedeno v kapitole 4.3.2) nevnáší do simulace významné chyby a zjednodušuje výpočet. Případné zpřesnění fázového rozhraní způsobem uvedeným v této kapitole se navíc týká pouze oblastí v bezprostředním okolí (oblast délky $\approx R_0$) čela trubky, která je bez ohledu na tvar fázového rozhraní zatížena velkými chybami plynoucími z napojení rovinné a válcové plochy.

Dle mého soudu je v případě této simulace největším zdrojem chyb velmi těžce odstranitelný předpoklad, že se veškeré teplo uvolňuje na fázovém rozhraní a dále způsob řešení prostupu tepla obecně.

4.5 Posouzení vlivu sdílení tepla podstavami trubek

Na základě tvaru fázového rozhraní z kapitoly 4.4 jsem provedl úpravu vztahů pro prostup tepla stěnou tak, že respektují rovinnost podstav, uzavřenost trubky a přibližně respektují plochu fázového rozhraní (vzhledem k povaze aproximace nelze provést rozdělení na válcovou a rovinnou část zcela přesně). Z výsledků této simulace je zřejmé, že vliv podstav na sdílení tepla je naprosto zanedbatelný, kterýžto výsledek bylo možné vzhledem k tomu, jak je povrch podstav malý ve srovnání s povrchem válcové plochy trubky, očekávat. Proto na tomto místě neuvádím průběhy teplot ani jiných veličin. Omezím se zde pouze na uvedení rovnic, které byly pro posouzení vlivu podstav využity a které budou využívány i v dalších simulacích, protože lépe odpovídají fyzikální realitě.



Platí zde tedy následující předpoklady:

- 1) Pro výpočet R_{int} uvažujeme tuhnutí PCM rotačně symetrické a čistě radiální, tuhnutí v axiálním směru v blízkosti podstav se pro tento účel neuvažuje.
- 2) Pro výpočet tepelného toku je uvažováno axiální tuhnutí PCM v blízkosti podstav.
- 3) Rychlost tuhnutí PCM je po celém povrchu trubky stejná.
- 4) Veškeré teplo se uvolní na fázovém rozhraní, tepelná kapacita ztuhlého PCM se při odvození neuvažuje (v odvození uvolněného tepla je však zahrnuta), stejně jako se neuvažuje tepelná kapacita kapalného PCM a vedení tepla z kapalně fáze na fázové rozhraní. Ztuhlé PCM se chová čistě jako izolace.
- 5) Tok tepla podstavami je zohledněn na základě uvažování ztuhlé vrstvy PCM na nich podle předpokladů 2), 3) a 4)
- 6) Hustota kapalně fáze je ρ_l , hustota pevně fáze je ρ_s , hmotnost PCM v trubkách je dána jejich vnitřním objemem a menší z obou hustot ρ_s, ρ_l

Pro svazek silnostěnných válcových trubek s respektováním podstav je celkový tepelný tok skrze PCM

$$\dot{Q} = \frac{2\pi \cdot l \cdot n}{\frac{1}{\alpha_{PCM} \cdot R_{int}} + \frac{\ln\left(\frac{R_0}{R_{int}}\right)}{\lambda_{PCM}}} \cdot \Delta T + \frac{2\pi \cdot n \cdot R_{int}^2}{\frac{1}{\alpha_{PCM}} + \frac{R_0 - R_{int}}{\lambda_{PCM}}} \cdot \Delta T \quad (46)$$

Tepelný tok skrze trubky do vody je

$$\dot{Q} = \frac{2\pi \cdot l \cdot n}{\frac{1}{\alpha_{voda} \cdot R} + \frac{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)}{\lambda_{tr}}} \cdot \Delta T + \frac{2\pi \cdot n \cdot R^2}{\frac{1}{\alpha_{voda}} + \frac{s}{\lambda_{tr}}} \cdot \Delta T \quad (47)$$



5 Srovnání modelu s měřením

Nyní, když máme odvozený model zohledňující podstatné termodynamické jevy a máme vysloveny předpoklady, za kterých tento model platí, můžeme přistoupit k samotnému naladění modelu podle měřených dat a k jeho validaci. Veškerá experimentální data použitá pro naladění modelu a jeho validaci byla změřena na experimentálním akumulátoru tepla Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky (Ú12112) FS ČVUT v Praze.

Srovnání modelu s měřenými hodnotami lze provést z mnoha hledisek. Pro praktickou aplikaci modelu je nejvíce vypovídající srovnání z hlediska výstupní teploty, tepelného toku a celkového sděleného tepla. Tyto hodnoty jsou určující pro reálnou použitelnost akumulátoru. Příliš nízká výstupní teplota omezuje využitelnost tepla neseného vodou, příliš nízký výkon zase omezuje praktickou použitelnost celého akumulátoru. Celkové sdělené teplo je měřítkem množství uložené energie, jeho časový průběh je pak měřítkem energie, kterou lze do určitého času od náběhu akumulátoru uvolnit. Celkové sdělené teplo je časovým integrálem tepelného toku. Vzhledem k možnému použití matematického modelu pro předpovězení chování jiného akumulátoru než toho, na kterém byla provedena měření, nás spíše, než absolutní odchylka zajímá odchylka relativní. Výjimkou je odchylka teploty, kde je obtížné definovat, k jaké hodnotě budeme odchylku vztahovat. Relativní odchylku jsem počítal tak, že jsem absolutní odchylku vztáhl k měřeným hodnotám, protože je pokládám za zatížené menší chybou než hodnoty vypočtené. Vzhledem k relativní blízkosti naměřených a vypočtených hodnot nebude mít přílišný vliv, ke kterým hodnotám bude absolutní odchylka modelu za účelem vypočtení relativní odchylky vztažena. Pro použití modelu při návrhu akumulátoru by mohlo být vhodné vztahovat při výpočtu relativní odchylky absolutní odchylku k vypočteným hodnotám, protože měřené hodnoty nebudeme mít k dispozici a vztažení k vypočteným hodnotám nám v takovémto případě poskytne ucelenější obrázek o tom, jakou odchylku můžeme vzhledem k vypočteným hodnotám očekávat.

5.1 Srovnání s experimentem použitým pro naladění modelu

5.1.1 Vstupní data experimentu

Hmotnostní tok akumulátorem při experimentu byl roven přibližně $0,125 \text{ kg s}^{-1}$ a v průběhu experimentu nedocházelo k velkým fluktuacím. Vstupní teplota vody se po počátečním prudkém poklesu z hodnot kolem $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ustálila na přibližně $25,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Zásobník byl nabit na počáteční teplotu $55,5 \text{ }^\circ\text{C}$.



5.1.2 Srovnání a komentář

Po vypočtení veličin uvedených v úvodu kapitoly 5 je zřejmé, že matematický model převážně podhodnocuje tepelný tok. Celkové sdělené teplo pak podhodnocuje v celém rozsahu simulačního času. Toto jsou důležité závěry, které lze využít pro zlepšení kalibrace modelu a také pro odhad výkonu jiného akumulátoru, na který bude tento model použit (můžeme očekávat mírně vyšší výkon, než ukáže simulace).

Celkově bych hodnotil shodu modelu s měřením jako vyhovující, vzhledem k množství přijatých zjednodušujících předpokladů a celkově výraznému zjednodušení modelu oproti skutečnosti je shoda až překvapivě dobrá. Takto naladěný model akumulátoru by měl dávat relevantní výsledky i při použití na jiný akumulátor a měl by být použitelný pro návrh akumulátoru, který vyhoví zadaným charakteristikám. Tento model by také mělo být možné použít pro návrh soustavy akumulátorů a jejího řízení. Vzhledem k velkému propadu vypočtených hodnot vůči naměřeným v čase 500 – 1200 s můžeme usuzovat, že v tomto časovém rozmezí hraje významnou roli fenomén, který se nám nepodařilo zachytit. Tato oblast je oblastí začátku fázové přeměny, proto zde nemusí přesně fungovat vztahy odvozené dříve v této práci.

Moje hypotéza pro vysvětlení tohoto propadu je, že se jedná o důsledek předpokladu konstantní teploty v celém objemu PCM. V reálné trubce s teplotním gradientem dojde k rychlému ochlazení PCM u povrchu trubky, v jehož důsledku začne PCM u stěny tuhnout a uvolňovat značné množství tepla. Toto teplo je rozdílové oproti teplu v modelu a přičte se k teplu odevzdávanému chladnoucí kapalnou fází, se kterým v této časové oblasti model počítá. Tím způsobí vyšší tepelný výkon, z čehož vyplývá i vyšší výstupní teplota vody, než by odpovídalo pouze přenosu tepla při chladnutí kapalně fáze jako v modelových výpočtech. Tento jev je dále podpořen teplotním gradientem po délce trubky, kdy se uplatňuje stejný princip, akorát se jedná o tuhnutí v axiálním směru (začátek trubek je intenzivně ochlazován). Kombinací radiálního a axiálního teplotního gradientu vznikne vliv, který způsobí, že v reálném akumulátoru část PCM již intenzivně tuhne, zatímco v modelu k tuhnutí ještě nedochází kvůli výše zmíněnému předpokladu konstantní teploty v celém objemu PCM (PCM jako celek se ještě neochladilo na teplotu začátku fázové přeměny, ale ve skutečnosti jeho části již intenzivně tuhnou).

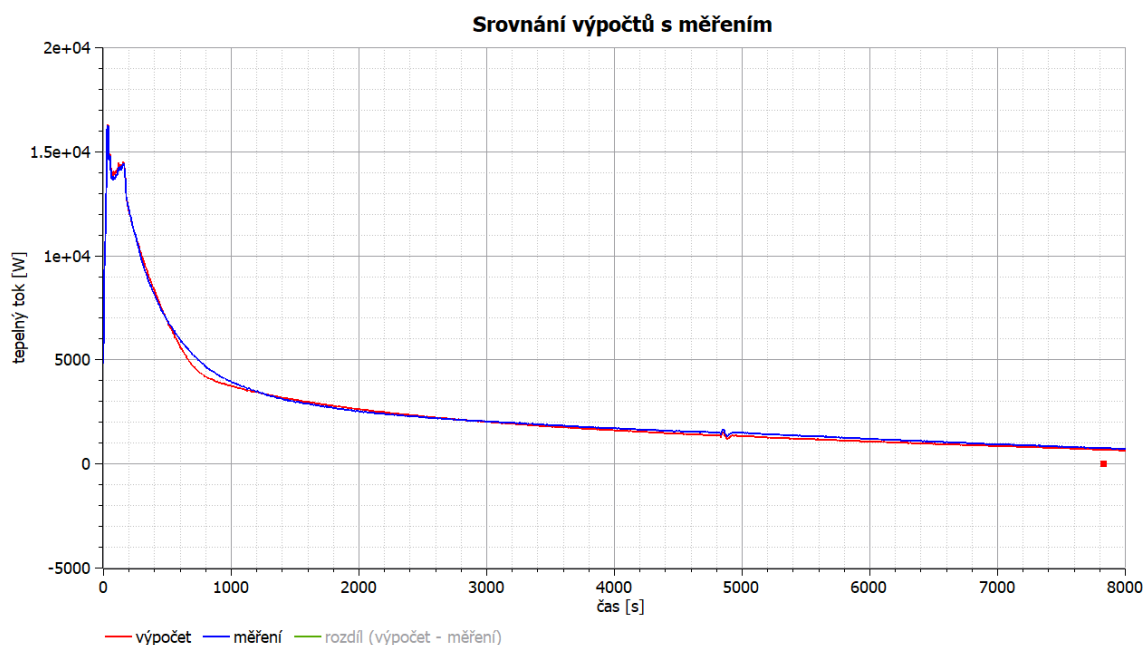
Další (i když dle mého názoru minoritní) vliv může být zanedbání konvektivního přenosu tepla v kapalně fázi. U tohoto vlivu nejsem schopen odhadnout jeho míru ani směr



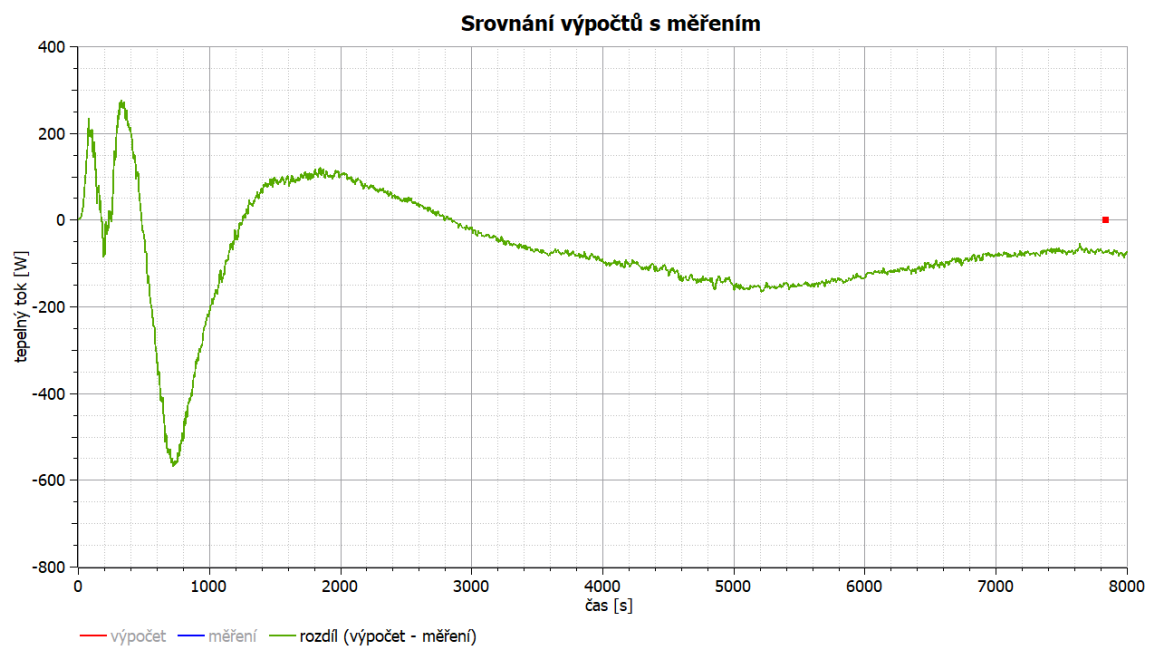
působení, tedy zda vliv zanedbání teplotního gradientu zesiluje, či jej naopak potlačuje. V modelu je uvažováno, že se veškeré teplo uvolňuje na fázovém rozhraní, jehož poloměr v této časové oblasti odpovídá vnitřnímu poloměru trubky. Toto by odpovídalo situaci, kdy je tepelná vodivost kapalně fáze nekonečně velká a prvním odporem proti prostupu tepla je až fázové rozhraní (v této časové oblasti vnitřní stěna trubky) charakterizované koeficientem přestupu tepla α_{PCM} . Vzhledem k výše řečenému se kloním k názoru, že zanedbání odporu proti přenosu tepla v kapalně fázi (zanedbání konvekce) efekt neuvažování teplotního gradientu spíše potlačuje.

Mírné fluktuační na začátku simulace nepovažuji za významné a rozhodující pro platnost modelu v této oblasti. Dle mého soudu jsou z velké části způsobeny měřeními a dají se připisat kolísání hodnot před ustálením stavu.

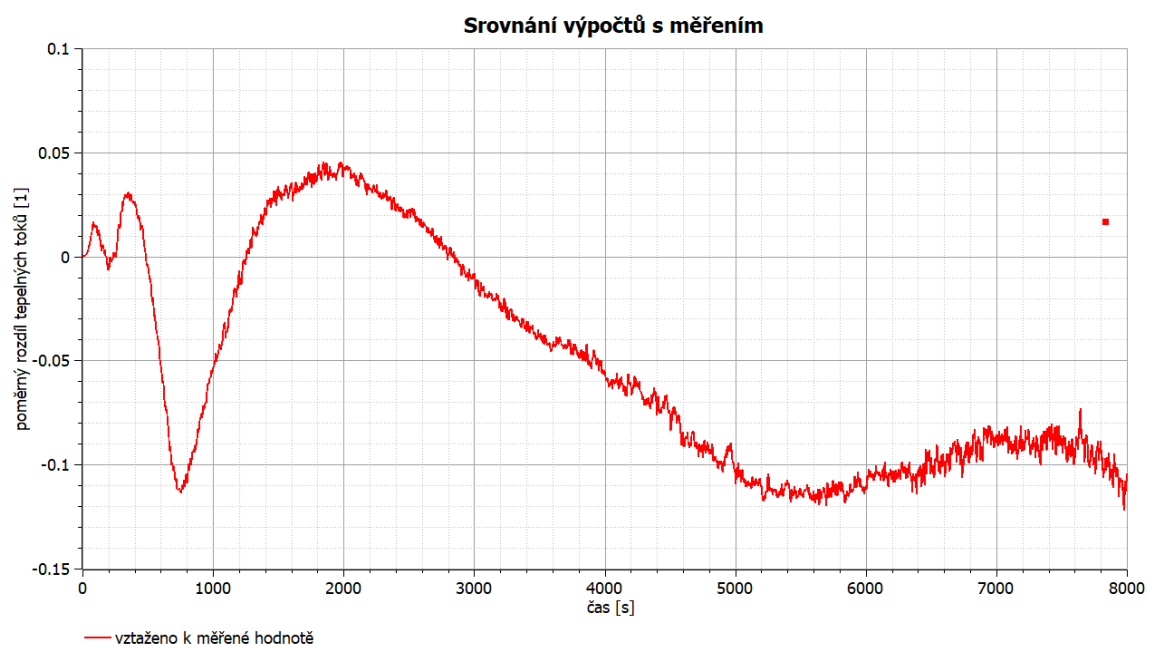
Průběhy teplot a jejich rozdíl viz Obrázek 19 a Obrázek 20.



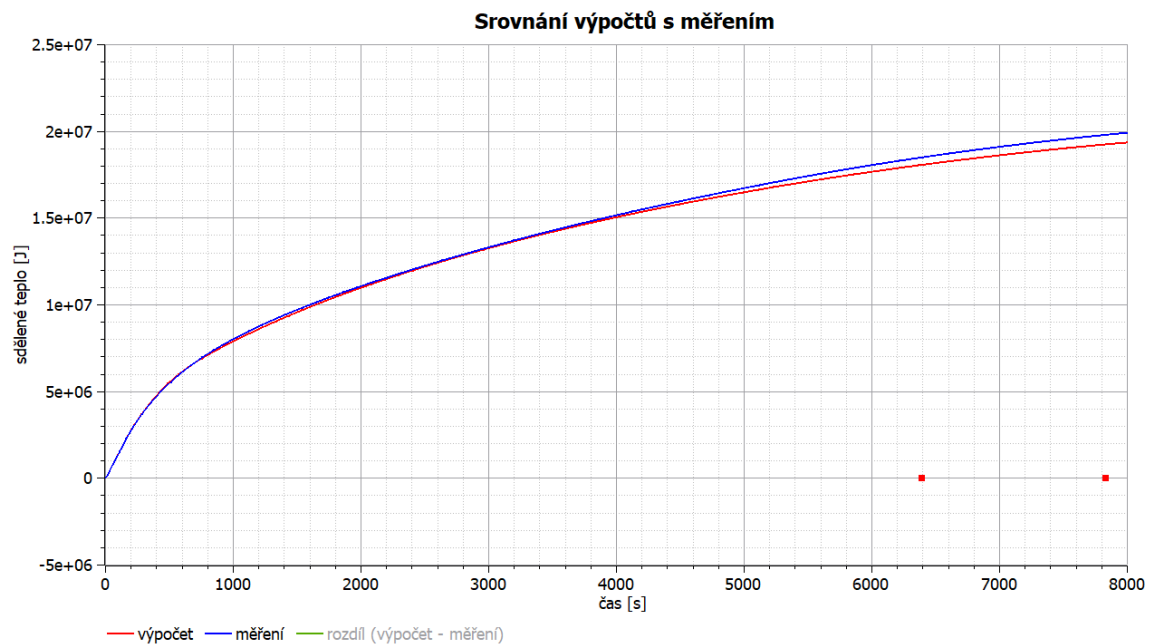
Obrázek 22 – Srovnání vypočteného a naměřeného tepelného toku



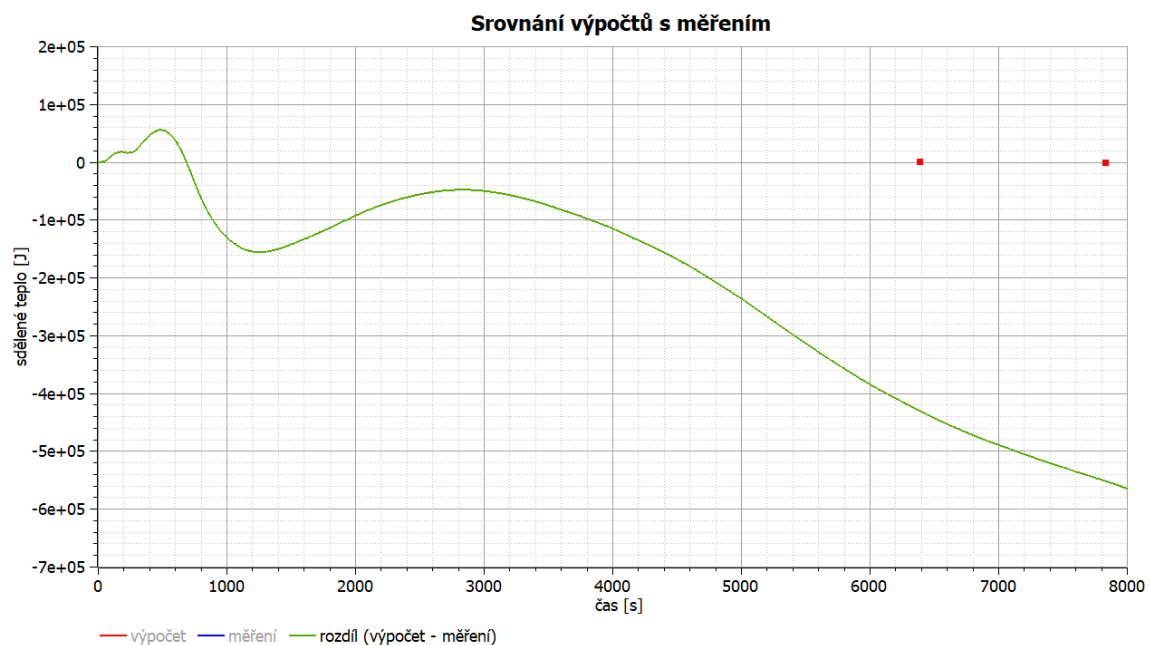
Obrázek 23 – Rozdíl vypočteného a naměřeného tepelného toku (v tomto pořadí)



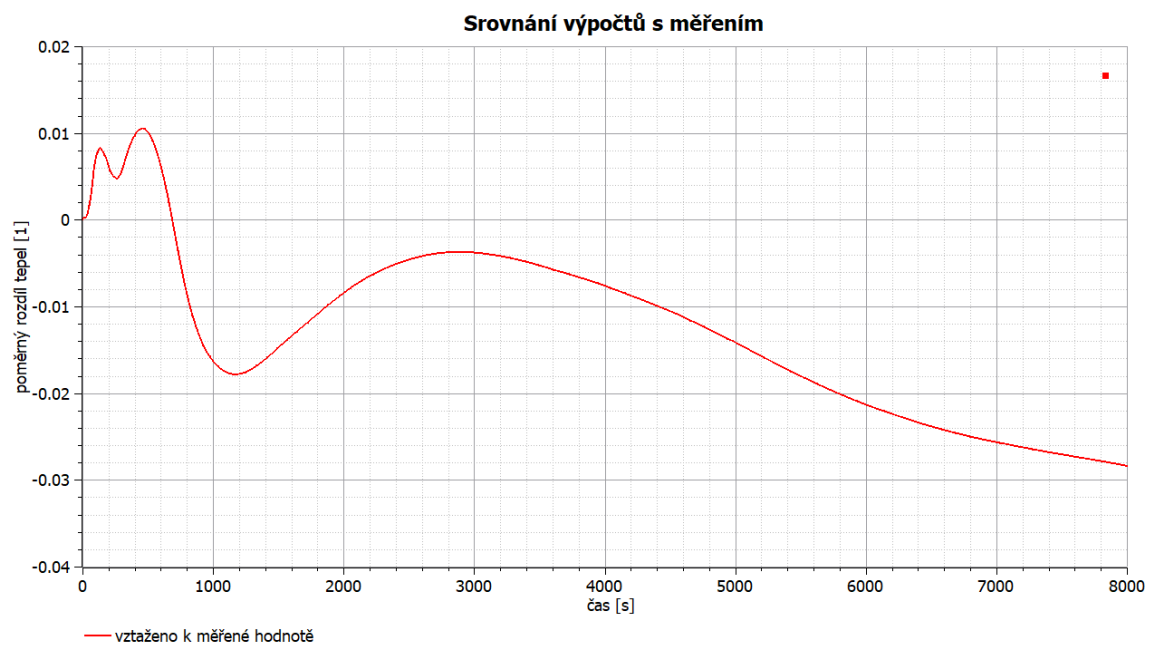
Obrázek 24 – Rozdíl tepelných toků vztahený na měřenou hodnotu



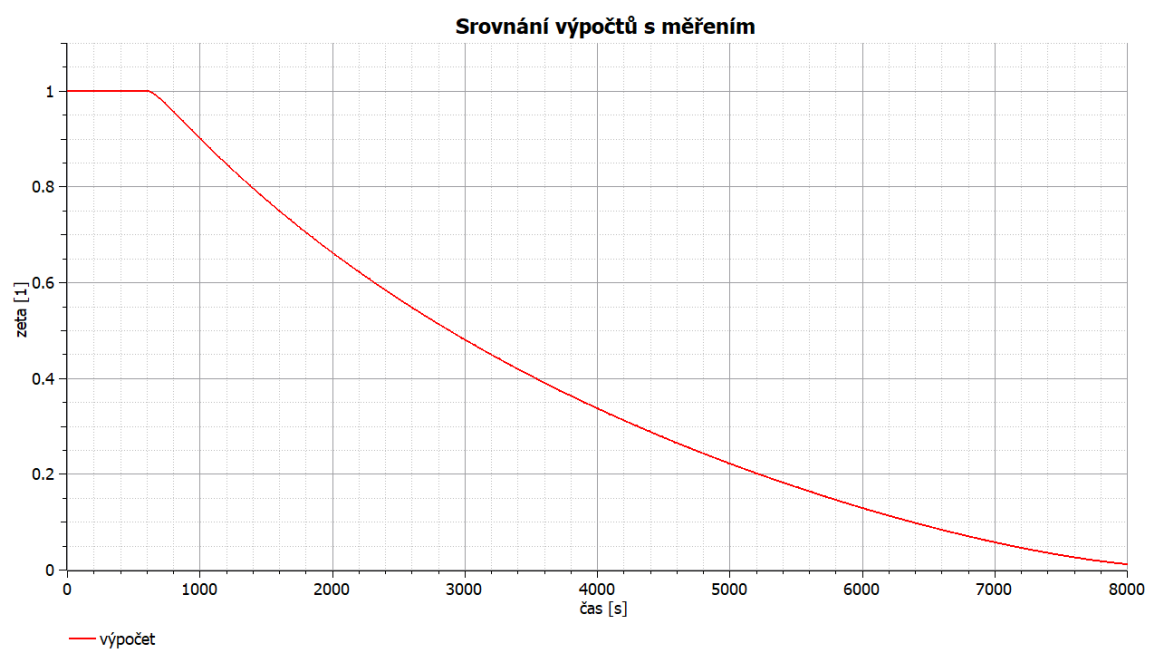
Obrázek 25 – Srovnání vypočteného a naměřeného sděleného tepla



Obrázek 26 – Rozdíl sděleného tepla (výpočet – měření)



Obrázek 27 – Rozdíl sděleného tepla vztahovaný na měřenou hodnotu



Obrázek 28 – Průběh hmotnostního zlomku v čase



5.2 Porovnání s jinou sadou měřených dat

Pro nezávislé posouzení obecné platnosti modelu je nezbytné provést posouzení shody i s jinými daty, než která byla použita k vyladění modelu. Při dobré shodě s měřenými daty z jiného experimentu lze prohlásit, že model věrně simuluje realitu. Porovnávané veličiny jsou stejné jako v kapitole 5.1.2 a proto se zde odkáží na úvod kapitoly 5.

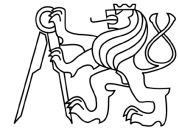
5.2.1 Vstupní data experimentu

Hmotnostní tok akumulátorem při experimentu byl roven přibližně $0,5 \text{ kg s}^{-1}$ a v průběhu experimentu nedocházelo k velkým fluktuacím. Vstupní teplota vody se rychle ustálila na přibližně $24,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Zásobník byl nabit na počáteční teplotu $55,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.2.2 Srovnání důležitých parametrů a komentář

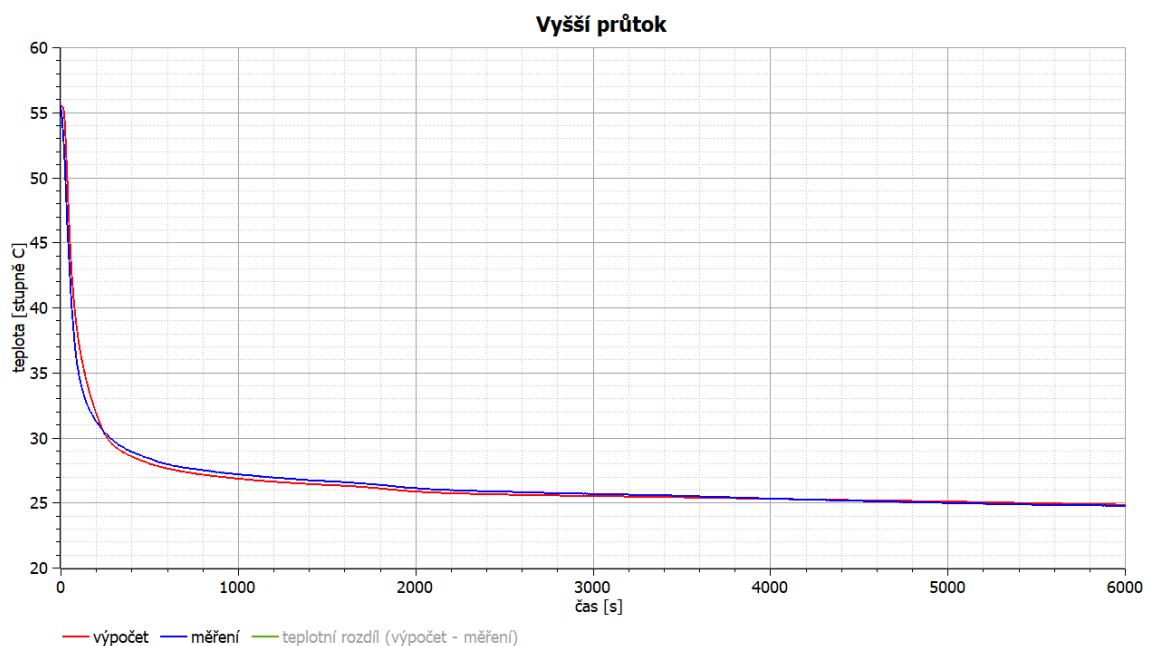
Po odeznění přechodového děje, ve kterém mají dominantní vliv jevy tímto modelem nezachytitelné je vidět, že model podhodnocuje výstupní teplotu v čase od 240 do 4200 s. Je patrná konzistence s experimentem použitým pro kalibraci, kde model všechny relevantní veličiny též převážně podhodnocoval, příp. se jejich relativní chyba držela v blízkosti nuly. Velké nadhodnocení teploty na počátku je s největší pravděpodobností způsobeno vírovými strukturami před a za činnou částí akumulátoru a jejich odlišným chováním při výrazně větším průtoku, které tento model nezohledňuje. Vlivem výrazně (4x) vyššího průtoku dochází k intenzivnímu ochlazování trubek a rychlému tuhnutí PCM, při kterém se mohou projevit jevy, které model nezachycuje (mají hlubší fyzikální podstatu nebo odporují předpokladům). V tomto případě rychlého tuhnutí může hrát výraznou roli tepelná kapacita již ztuhlého PCM, ze kterého se teplo uvolňuje podstatně blíže ke stěně trubky, než je fázové rozhraní, tudíž dochází k intenzivnějšímu sdílení tepla, protože toto není nuceno překonávat tak silnou vrstvu izolace. V tomto případě vzniká v trubce strmý teplotní gradient, což je v rozporu s předpoklady pro chování PCM (pro odvození sdíleného tepla v kapitole 4.2.1 předpokládáme, že jeho teplota závisí pouze na čase, a ne na souřadnici). Navzdory tomuto model dokáže realitu bez dalších úprav poměrně přesně kopírovat.

Nejzajímavější je srovnání relativních odchylek, protože ty můžeme srovnat s předchozím měřením (kapitola 5.1.2). Relativní odchylka tepelného toku dosahuje pro čas $t > 4800 \text{ s}$ alarmujících hodnot. Vzhledem k velmi nízkému výkonu v této oblasti (při vztažení na hmotnostní tok více než 4x nižšímu než u prvního experimentu) nemá tato relativní odchylka pro praktickou použitelnost modelu příliš velký význam. Je však nutné mít na paměti, že vzhledem k takto vysoké odchylce model neumí dobře pracovat se zcela ztuhlým PCM

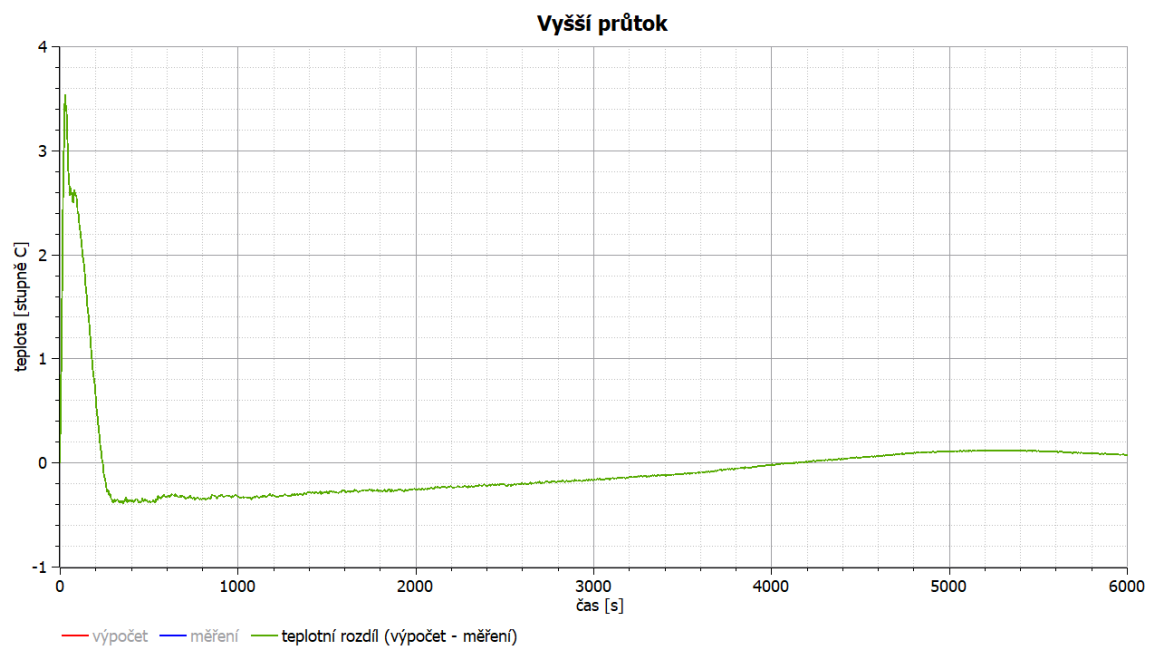


z hlediska prostupu tepla (předpokládá v něm podstatně vyšší teplotu, než jaká v něm reálně vlivem teplotního gradientu je). Pokud vezmeme jako mezní odchylku tepelného toku, pro kterou model ještě vyhoví hodnotu $\pm 25 \%$ měřené hodnoty, pak lze při tomto hmotnostním toku model označit za platný pro $\zeta \geq 0,02$. Pokud je pro nás podstatná celková hodnota sděleného tepla, pak model pro rozumně dlouhé simulační časy (≥ 1000 s), velmi dobře odpovídá realitě.

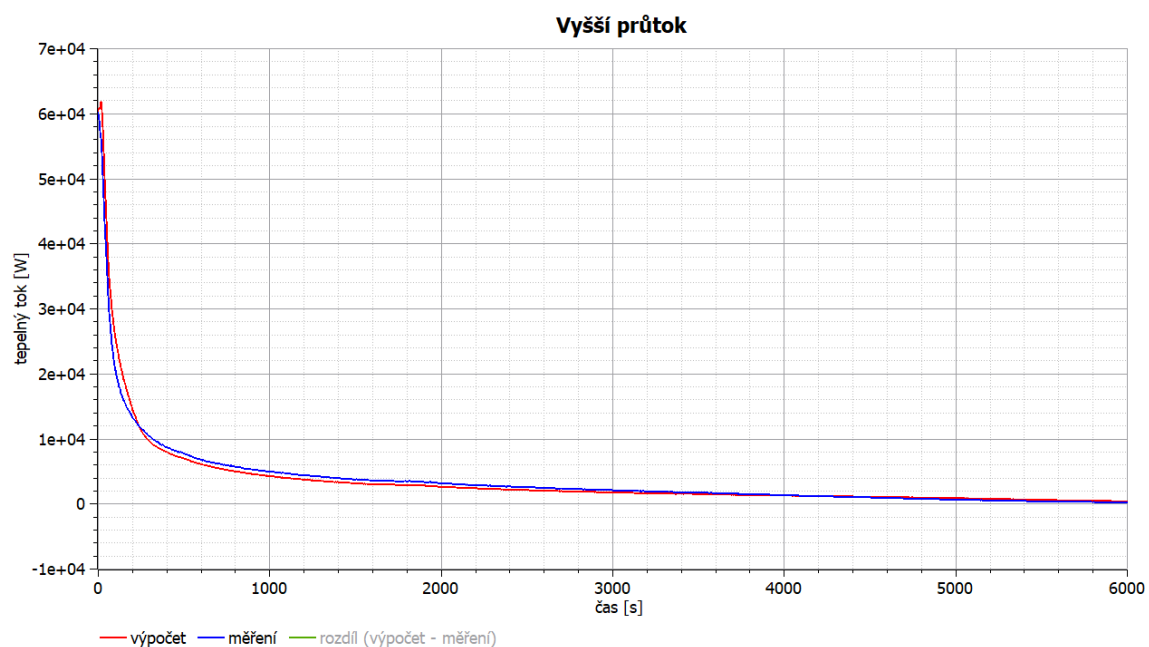
Z porovnání obou experimentů můžeme říci, že hmotnostní tok vody nemá na výkon akumulátoru v ustáleném stavu vstupních veličin významný vliv. Při zvýšení hmotnostního toku dojde k výraznému snížení výstupní teploty, což ve výsledku vede pouze k velmi mírnému (pokud vůbec nějakému) zvýšení výstupního výkonu. Zvýšením hmotnostního toku se dosáhne v podstatě pouze extrémní výkonové špičky na začátku měření a následného velmi strmého poklesu, což je pro praktickou aplikaci akumulátoru krajně nevhodné.



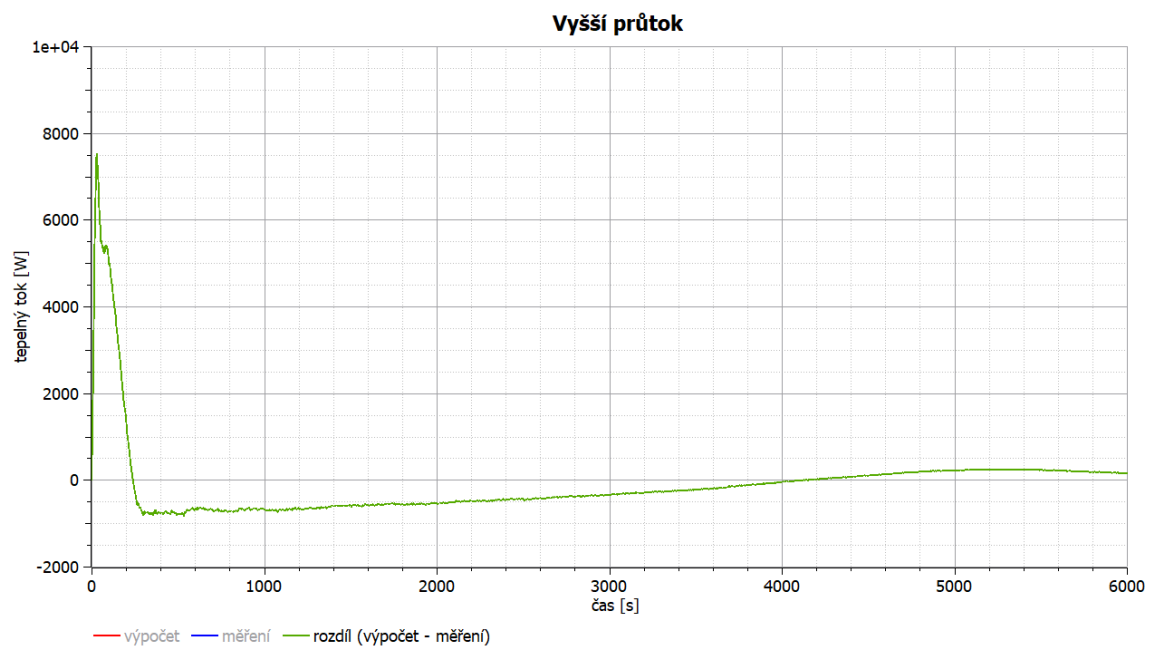
Obrázek 29 – Naměřený a vypočtený průběh výstupní teploty v čase



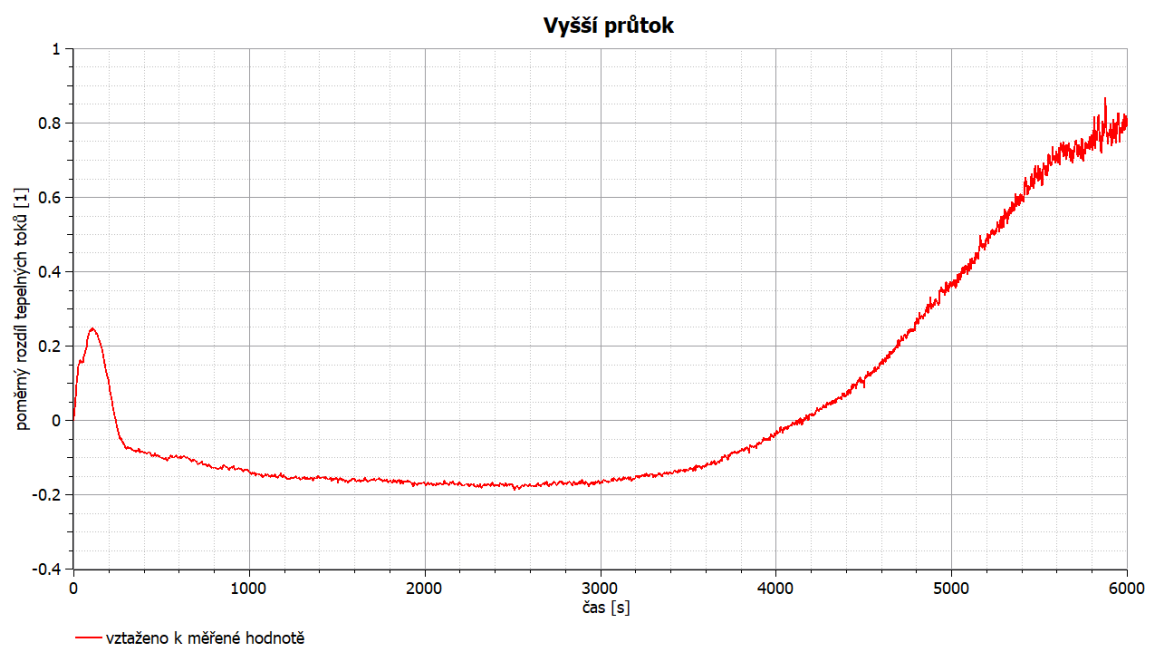
Obrázek 30 – Průběh rozdílu vypočtené a naměřené teploty (v tomto pořadí) v čase



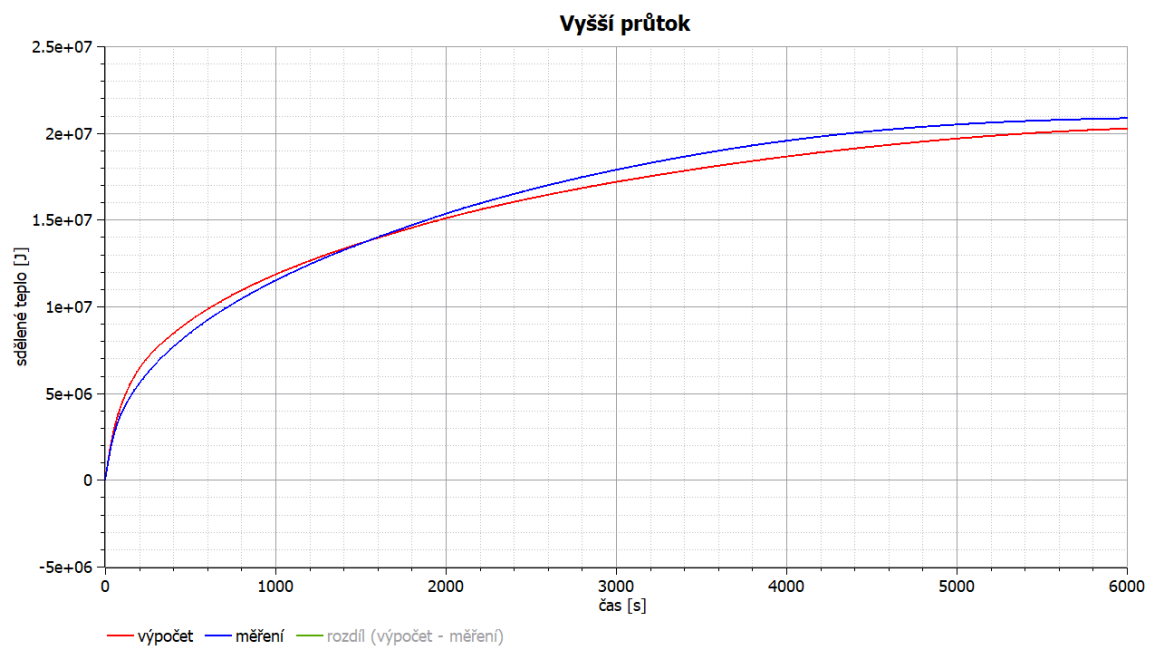
Obrázek 31 – Srovnání naměřeného a vypočteného tepelného toku



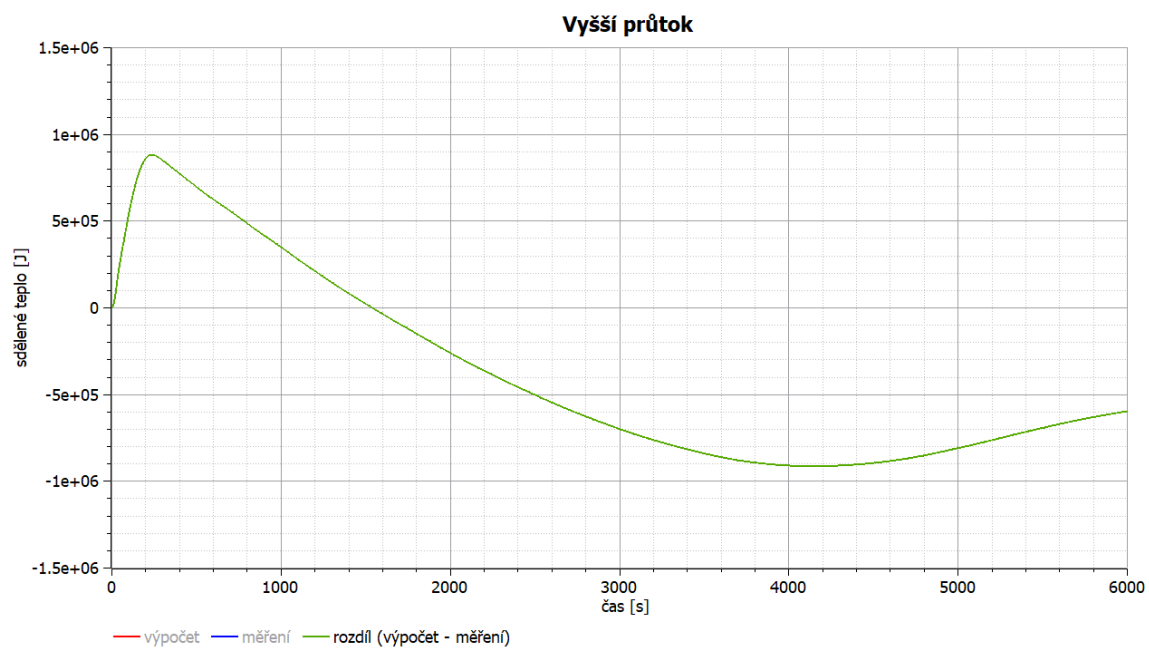
Obrázek 32 – Rozdíl vypočteného a naměřeného tepelného toku (v tomto pořadí)



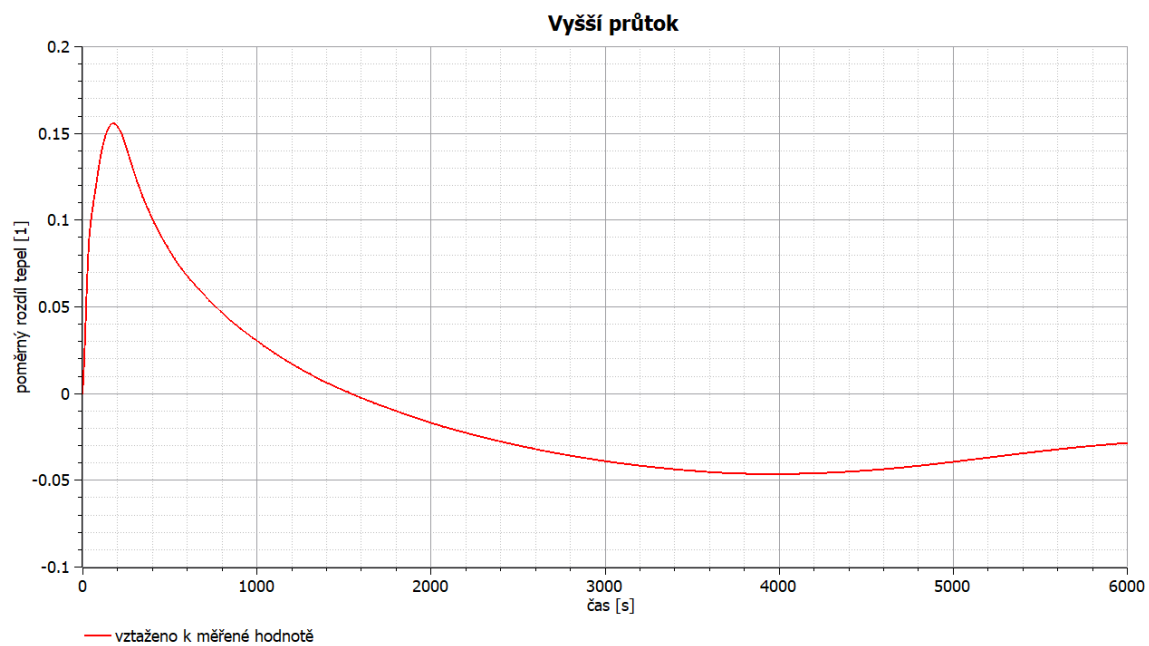
Obrázek 33 – Rozdíl tepelných toků z obrázku (Obrázek 32) vztažený na měřenou hodnotu



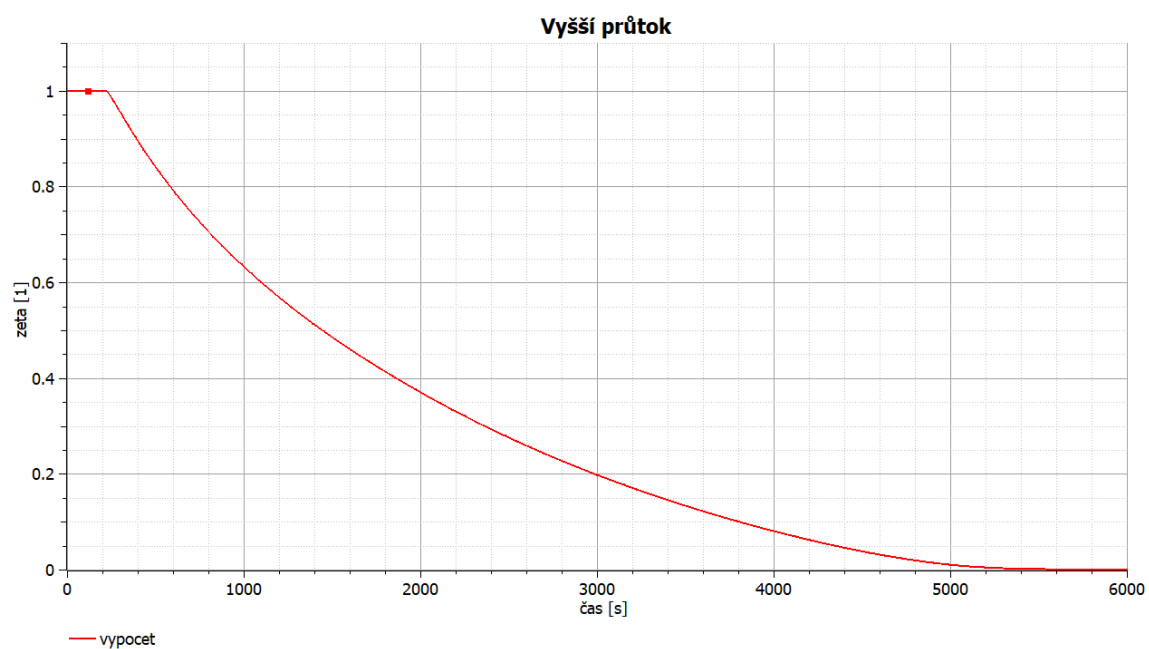
Obrázek 34 – Srovnání vypočteného a naměřeného sděleného tepla



Obrázek 35 – Rozdíl sděleného tepla (výpočet – měření)



Obrázek 36 – Rozdíl sděleného tepla vztahený na měřenou hodnotu



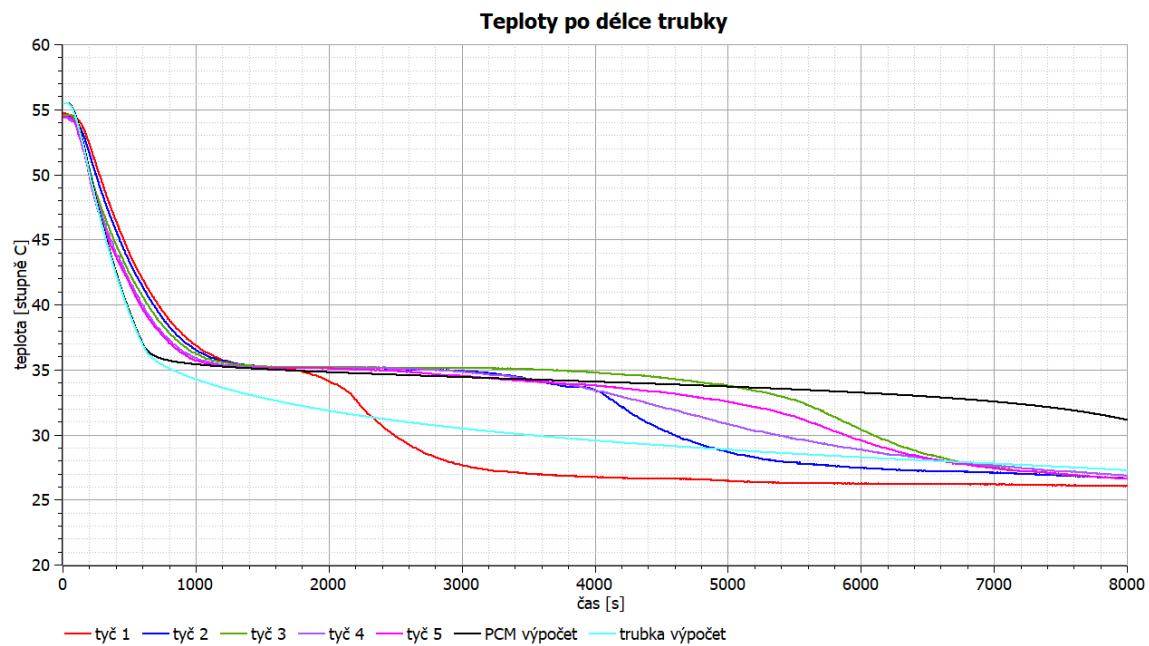
Obrázek 37 – Průběh hmotnostního zlomku v čase



5.3 Srovnání teplot po délce trubky v experimentu s teplotou z modelu

Při porovnání teplot v jednotlivých částech válcového pouzdra (číslování 1–5 jde vzestupně ve směru proudění) s teplotou pouzdra v modelu a s teplotou PCM v modelu (měla by přibližně odpovídat teplotě fázového rozhraní v PCM) je vidět nápadná shoda v oblasti nejlepší platnosti modelu. Měření teploty v různých částech válcových pouzder a srovnání s modelem je velmi silně ovlivněno pozicí teploměru uvnitř válcového pouzdra (zda měříme na stěně nebo uprostřed). O pozici měřáků mi není nic známo, proto předpokládáme jejich umístění „někde mezi“ stěnou a osou pouzdra. Teplota pouzdra v modelu je střední teplotou po délce (v simulaci odvozené v této práci je teplota nezávislá na souřadnici). Z grafu na obrázku (Obrázek 38) je vidět, že na konci simulace po ztuhnutí drtivě většiny PCM se teplota PCM drží stabilně a vysoko nad měřenými hodnotami v libovolném místě pouzdra. Toto může být způsobeno nesouladem v metodice měření a simulace. Při měření je měřena teplota v jedné konkrétní vzdálenosti od stěny pouzdra, kdežto při simulaci teplota PCM udává teplotu na postupujícím fázovém rozhraní. Dokud jsou teploměry umístěny v místě kapalné fáze PCM, je teplota na nich stejná nebo vyšší než teplota fázového rozhraní (v grafu oblast $t < 1400$ s). Když se fázové rozhraní přiblíží teploměrům, vypočtená teplota se začne držet velmi blízko naměřených hodnot. Jakmile fázové rozhraní překročí úroveň teploměrů a posune se blíže do středu pouzdra, začnou vlivem nízké tepelné vodivosti PCM teploměry měřit výrazně nižší teplotu, než odpovídá teplotě fázového rozhraní.

Z tohoto popisu je zřejmé, jak se rychlost tuhnutí PCM mění po délce pouzdra. Na začátku pouzdra PCM tuhne nejrychleji. Pak následuje druhá část pouzdra. Nejpomaleji tuhne PCM uprostřed délky pouzder. Tento výsledek je poněkud překvapivý, mým očekáváním bylo, že se rychlost tuhnutí PCM bude po délce pouzdra monotónně snižovat. Toto může být způsobeno tuhnutím PCM od podstav na koncích pouzder (hlavně v případě měřené hodnoty 5) či vlivem volné konvekce v nastojato umístěných pouzdrech (kapalné PCM blízko fázového rozhraní se ochlazuje a klesá dolů, kde tuhne). Tento vliv není patrný v horní části pouzder, kde je rychlost ochlazování natolik velká, že se vliv volné konvekce nestačí na rychlosti tuhnutí příliš projevit a PCM tuhne rovnou v místě ochlazování.



Obrázek 38 – Srovnání teplot v PCM



6 Obrácený chod akumulátoru

V předcházejících kapitolách byl popsán postup tvorby modelu akumulátoru pro vybíjení a jeho experimentální validace. Vybíjení akumulátoru je však pouze jeden provozní stav, jež musíme být pomocí simulace schopni předpovědět. Neméně důležitým provozním módem každého akumulátoru je jeho nabíjení, jemuž se budeme věnovat v této kapitole.

6.1 Odvození fázového rozhraní při tání pro zahřívání úplně ztuhlého akumulátoru

Pro model nabíjení (zahřívání) akumulátoru budeme vycházet ze stavu, kdy je akumulátor zcela vybitý a tuhnutí PCM skončilo ($\zeta = 0$). Při odvození vztahů pro zahřívání budeme vycházet z předpokladů, které se osvědčily při modelování tuhnutí s tím, že je přizpůsobíme tak, aby dávaly smysl při tání. Opět uplatníme předpoklad, že veškeré teplo se spotřebovává na změnu skupenství, proto platí, že veškeré teplo je přivedeno na fázové rozhraní, kde se spotřebuje. Neuvažujeme teplo spotřebované pro zahřátí kapaliny a pevné látky. Dalším předpokladem je, že vrstva kapaliny vznikající na vnitřním povrchu trubky se chová jako izolace. V tomto modelu není uvažována volná konvekce probíhající v kapalině a z ní vyplývající přenos tepla prouděním. Přenos tepla kapalinou je uvažován jako přenos čistě vedením. Pro zohlednění fenoménu proudění je možné po provedení experimentu v modelu oddělit tepelnou vodivost kapalného a pevného PCM a zvýšit hodnotu tepelné vodivosti kapalného PCM tak, aby výpočet lépe odpovídal experimentu. Problém s rozpínáním látky při tání jsem řešil tak, že přebytečná kapalina, která se nevejde do vrstvy mezi pevným PCM a stěnou trubky, odtéká do centrální dutiny v PCM vzniklé při tuhnutí a dále se termodynamických dějů již neúčastní. Pro odvození poloměru fázového rozhraní R_f je využito stejného modelu fázového rozhraní jako při odvození tuhnutí (viz kapitola 4.3.2).

Za těchto předpokladů lze psát

$$V_{IC} = V_l + V_l' = \frac{m_l}{\rho_l} \quad (48)$$

Objem V_l je objem kapalně fáze uzavřené mezi vrstvou pevného PCM a stěnou trubky. Objem V_l' je objem kapaliny, která otekla do centrální dutiny. Objem V_{IC} je celkový objem vzniklé kapaliny. Objem V_l lze stanovit jako objem kapalně fáze, pokud by během tání nedocházelo ke změně hustoty a veškerá kapalná složka by tím pádem zůstala uzavřená mezi pevným PCM a stěnou trubky.



$$V_l = \frac{m_l}{\rho_s} \quad (49)$$

$$V_l' = V_{lC} - V_l = \frac{m_l}{\rho_l} - \frac{m_l}{\rho_s} = m_l \cdot \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_s \cdot \rho_l} \quad (50)$$

Z geometrie fázového rozhraní lze psát

$$V_l = \pi(R_0^2 - R_F^2) \cdot l \quad (51)$$

Jelikož potřebujeme R_F jako funkci ζ , dáme objemy do podílu a objem trubky vyjádříme pomocí hmotnosti PCM a hustoty kapalné fáze (je menší než hustota fáze pevné a limituje max. přípustnou hmotnost PCM v trubkách).

$$\frac{V_l}{V} = \frac{\frac{m_l}{\rho_s}}{\frac{m}{\rho_l}} = \frac{\rho_l}{\rho_s} \cdot \zeta = \frac{\pi(R_0^2 - R_F^2) \cdot l}{\pi \cdot R_0^2 \cdot l} = 1 - \frac{R_F^2}{R_0^2} \quad (52)$$

$$R_F = R_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{\rho_l}{\rho_s} \cdot \zeta} \quad (53)$$

Pro tepelný tok skrze trubky a PCM na fázové rozhraní použijeme stejné vztahy jako při tuhnutí PCM upravené tak, aby vrstvou izolace byla vrstva kapalné fáze. Jelikož tepelný tok skrze trubky do vody nezávisí na tvaru fázového rozhraní, zůstanou vztahy, které ho popisují, stejné. Změní se pouze vztahy pro vedení tepla skrze PCM.

$$\dot{Q} = \frac{2\pi \cdot l \cdot n}{\frac{1}{\alpha_{PCM} \cdot R_F} + \frac{\ln\left(\frac{R_0}{R_F}\right)}{\lambda_{PCM}}} \cdot \Delta T + \frac{2\pi \cdot n \cdot R_F^2}{\frac{1}{\alpha_{PCM}} + \frac{R_0 - R_F}{\lambda_{PCM}}} \cdot \Delta T \quad (54)$$

6.2 Srovnání výstupů modelu tání a tuhnutí

Parametry simulace

Tuhnutí: počáteční teplota akumulátoru ... 55,5 °C

vstupní teplota vody ... 25 °C

hmotnostní tok vody ... 0,125 kg s⁻¹

Tyto parametry přibližně odpovídají prvnímu experimentu (viz kapitola 5.1.1)

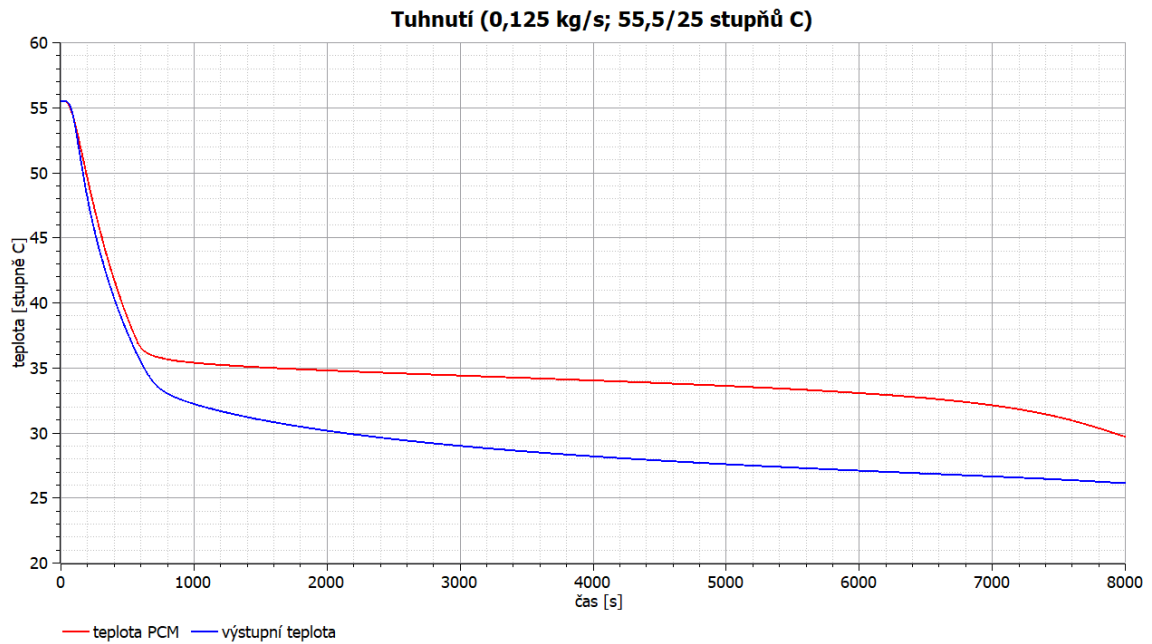


Tání: počáteční teplota akumulátoru ... 25 °C

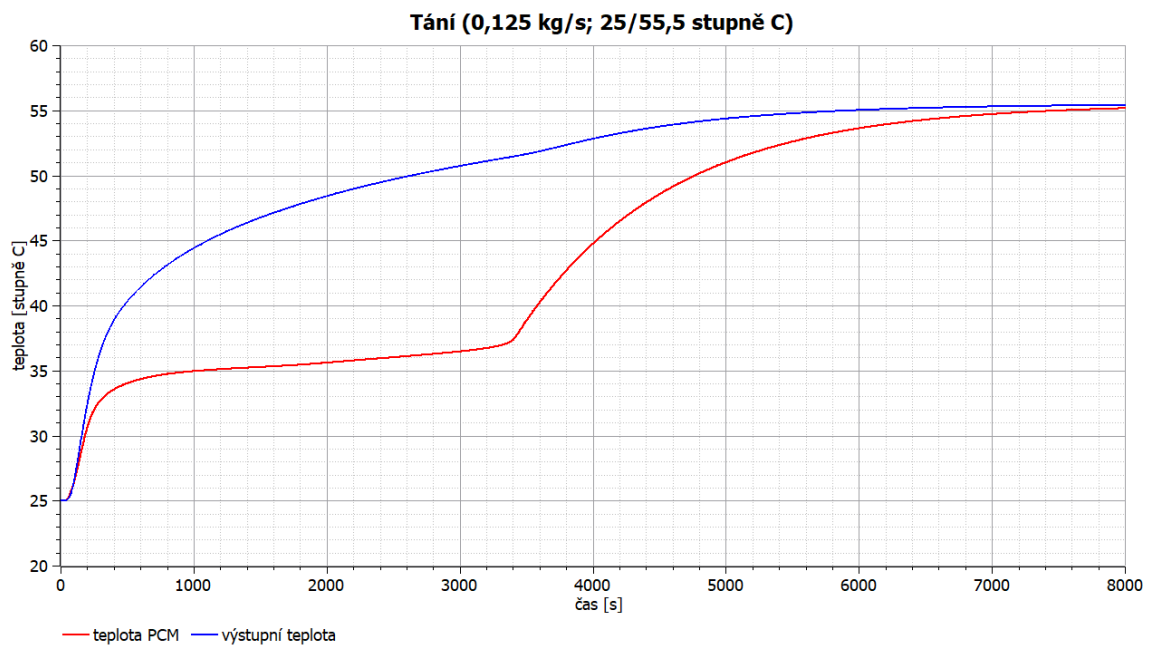
vstupní teplota vody ... 55,5 °C

hmotnostní tok vody ... 0,125 kg s⁻¹

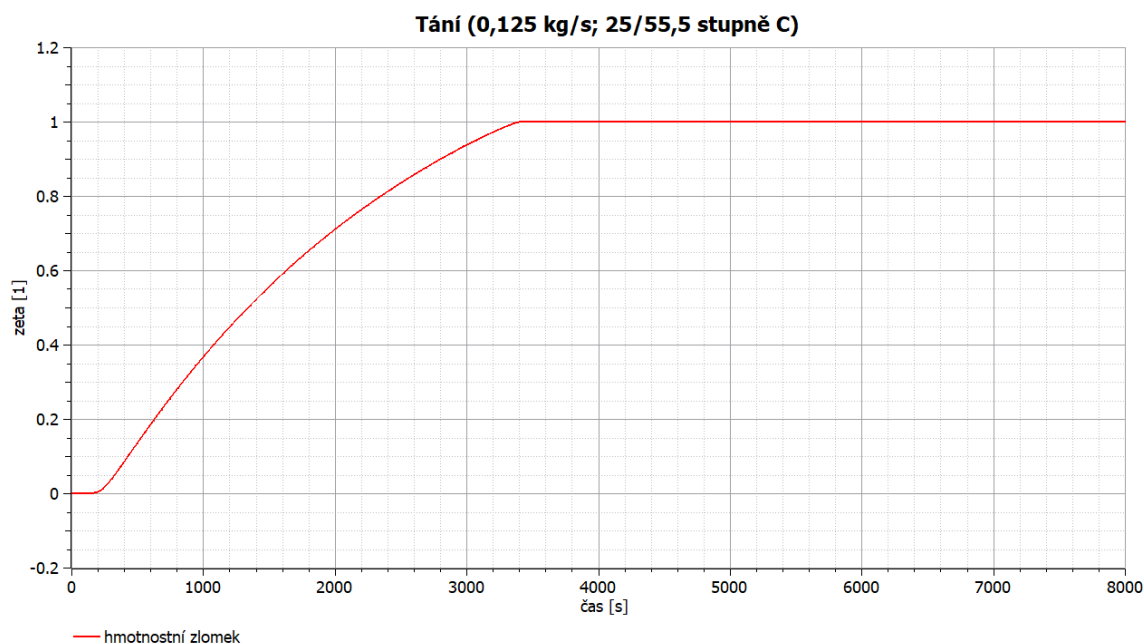
Ostatní parametry výpočtu byly ponechány tak, jak byly odladěny při srovnání simulace s měřenými daty při prvním experimentu.



Obrázek 39 – Simulace tuhnutí



Obrázek 40 – Simulace tání



Obrázek 41 – Závislost hmotnostního zlomku kapalné fáze na čase při tání

Pro obrácený chod (nabíjení) akumulátoru nebyla provedena validace experimentem, proto jsou výsledky čistě ilustrační. Pro simulaci tání bylo použito stejného nastavení modelu jako pro simulaci tuhnutí, u které byla validace úspěšně provedena. Vzhledem k použití modelu tání založeném na modelu tuhnutí jsou křivky velmi podobné, pouze místo klesajícího průběhu mají průběh rostoucí. Na průběh tání má také velký vliv chování materiálu při tání, které je odlišné od tuhnutí (viz kapitola 4.2.2).

Vzhledem k tomu, že při modelování tání bylo použito stejné zjednodušené řešení prostupu tepla jako při tuhnutí (se stejnými fyzikálně spornými předpoklady), bude při tání pravděpodobně docházet k podobným problémům s platností modelu jako při tuhnutí. Při tání může být problematická situace vysokého dodávaného tepelného výkonu, který způsobí velký teplotní gradient v PCM, což negativně ovlivňuje přesnost modelu. Tento gradient však může být do značné míry potlačen vlivem volné konvekce v kapalné fázi, pročež by bylo potřebné porovnat model tání s měřenými daty a odladit jej. Dále může být, vzhledem ke zkušenostem s modelem tuhnutí, problematická situace při roztání na vysoký hmotnostní zlomek kapalné fáze, kdy se zjednodušené řešení prostupu tepla bude se zvyšujícím se podílem kapalné fáze při tání stále výrazněji odchylovat od reality.



7 Závěr

V rešeršní části práce proběhlo seznámení s podstatou PCM, výhodami akumulátorů tepla na nich založených a byl proveden přehled různých druhů PCM a jejich fyzikálně chemických a termodynamických vlastností. Součástí rešeršní části je také úvod do jazyka Modelica, stručný přehled jeho historie a použití. Dále jsou rozebrány jeho výhody při simulaci komplexních dynamických systémů, včetně srovnání s programem Simulink na jednoduchém příkladu. V rešeršní části je také řečeno, proč byl zvolen právě program OpenModelica a jsou velmi stručně popsány jeho základní části.

V praktické části práce je popsán postup odvození modelu zásobníku tepla od počáteční třídy s konstantní tepelnou kapacitou v OpenModelice až po finální model zohledňující závislost měrné tepelné kapacity na teplotě a ve zjednodušené formě i prostup tepla skrze PCM a trubku až do vody se zohledněním tepelné kapacity trubek. V další části práce je provedeno naladění modelu podle naměřených dat a srovnání shody modelu s těmito daty. Také je provedeno srovnání s daty z jiného experimentu. Pro účely tohoto porovnání došlo pouze k záměně sady měřených dat, jinak bylo nastavení modelu ponecháno tak, jak bylo naladěno dříve. Porovnání s experimentem ukazuje na dobrou platnost modelu, zvláště za ustálených podmínek s ne příliš vysokým hmotnostním tokem vody. Toto je způsobeno přístupem při odvození modelu, kdy je pro sdělené teplo potřebné pro změnu teploty PCM uvažována stejná teplota v celém objemu PCM, která je rovna rovnovážné teplotě pro dané ζ a tání / tuhnutí, podle aktuálního režimu akumulátoru (nabíjení / vybíjení). Při vzniku teplotního gradientu v trubkách tudíž dochází k odchýlení modelu od reality. Platnost modelu je tím horší, čím větší teplotní gradient je přítomen. Dalším zdrojem nepřesností je řešení prostupu tepla, kdy se uvažuje, že teplota PCM zmíněná výše je teplotou fázového rozhraní a veškeré teplo uvolňované nebo přijímané PCM se předává na tomto rozhraní. Odchyly může také způsobovat nelineární interpolace použitá pro stanovení funkce $\zeta(T)$, která je nezbytná pro řešení akumulace a uvolňování tepla. Tato interpolace je provedena z dat výrobce, přičemž způsob jejího provedení a způsob výběru funkce pro proložení daty přesahuje rámec této práce. Použitím numerických metod pro řešení PDR sdílení tepla by se bezpochyby dalo dosáhnout podstatně přesnějších výsledků lépe odpovídajících měřením, což však nebylo cílem práce.



Cílem práce bylo připravit model tání a tuhnutí zásobníku tepla dostatečně jednoduchý pro případné použití ve větším celku, což je pomocí programů pro numerické řešení PDR sdílení tepla nedosažitelné. Řešení provedené v této práci vyhovuje požadavkům zadání a je dostatečně přesné pro případný návrh zapojení a řízení více akumulátorů, případně pro návrh rozměrů akumulátoru splňujícího dané výkonové a teplotní požadavky.

Další problematikou, která je mimo rozsah této práce, ale zasloužila by prozkoumání je chování akumulátoru při přepnutí režimu uprostřed vybíjení nebo nabíjení. Tato problematika je komplikovaná, avšak pro použití modelu na reálný akumulátor v reálném zapojení je velmi podstatná, protože akumulátor se bude nabíjet, pokud je teplo k dispozici a vybíjet, pokud je teplo potřeba pro další aplikaci a zcela určitě nebude docházet k úplnému nabití a vybití akumulátoru v každém cyklu. Bylo provedeno také odvození modelu pro nabíjení (tání) akumulátoru na základě modelu použitého pro tuhnutí, avšak pro tento model tání nebyla validace experimentem provedena z důvodu neexistence experimentálních dat. Srovnání s měřeními by bylo vzhledem k některým odlišnostem oproti modelu tuhnutí velmi zajímavé.



Bibliografie

- [1] SHARMA, Atul, V.V. TYAGI, C.R. CHEN a D. BUDDHI. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. Elsevier, 2009, , s. 318-345 [cit. 2021-03-11]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2007.10.005
- [2] KRAUSE, Luboš. *Akumulace tepelné energie v PCM*. Liberec, 2017. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra energetických zařízení. Vedoucí práce Doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
- [3] SODJA, Anton a Borut ZUPANČIČ. Modelling thermal processes in buildings using an object-oriented approach and Modelica. In: *Simulation Modelling Practice and Theory* [online]. Elsevier, 2009, , s. 1143-1159 [cit. 2021-03-11]. ISSN 1569190X. Dostupné z: doi:10.1016/j.simpat.2009.04.003
- [4] KOFRÁNEK, Jiří, ed. MODELICA. In: *MEDSOFT 2013* [online]. Krasnojarská 14, 100 00 Praha 10: Creative Connections, 2013, s. 64-68 [cit. 2021-03-11]. ISBN 978-80-904326-7-3. ISSN 1803-8115. Dostupné z: http://www.creativeconnections.cz/medsoft/2013/Medsoft_2013_Kofranek2.pdf
- [5] Modelica Language. *The Modelica Association* [online]. Linköping (Sweden): Modelica Association, 2021 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://www.modelica.org/modelicalanguage>
- [6] Modelica a numerické metody. In: *CourseWare Wiki* [online]. Praha: ČVUT FEL, 2018 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: https://cw.fel.cvut.cz/b181/_media/courses/a6m33mos/mos_numerika2016.pdf
- [7] Introduction. *OpenModelica* [online]. Švédsko: Open Source Modelica Consortium, 2021 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://www.openmodelica.org/>
- [8] OpenModelica Connection Editor. *OpenModelica* [online]. Švédsko: Open Source Modelica Consortium, 2021 [cit. 2021-07-07]. Dostupné z: <https://openmodelica.org/?id=78:omconnectioneditoromedit&catid=10:main-category>
- [9] Advanced Interactive OpenModelica Compiler (OMC). *OpenModelica* [online]. Švédsko: Open Source Modelica Consortium, 2021 [cit. 2021-07-07]. Dostupné z: <https://openmodelica.org/?id=51:open-modelica-compiler-omc&catid=10>
- [10] SCHMIRLER, Michal, Jakub DEVERA a Adam BLÁHA. *LA_02_V1_04 Zkušební zařízení pro lab měření*. Praha, 2020.
- [11] Data Sheet RT35HC. In: *RUBITHERM* [online]. Berlin: Rubitherm Technologies, 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_RT35HC_EN_09102020.PDF
- [12] STROUHALOVÁ, Michaela. *Studium fázových změn v oceli během jejího tuhnutí*. Ostrava, 2018. Disertace. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálově-technologická, Katedra metalurgie a slévárství. Vedoucí práce Doc. Ing. Karel Gryc, Ph.D.



Seznam obrázků

Obrázek 1 – Energie akumulovaná v různých látkách [2]	2
Obrázek 2 – Rozdělení PCMs [1], [2]	3
Obrázek 3 – PCMs podle teploty a entalpie tání [2]	3
Obrázek 4 – Popis úlohy v Modelice a v Simulinku [6]	7
Obrázek 5 – Schéma akumulátoru v osovém řezu	10
Obrázek 6 – Expanzní výkres akumulátoru [10]	11
Obrázek 7 – Schéma části akumulátoru v příčném řezu	11
Obrázek 8 – Foto měřicí stanice s popisky [10]	12
Obrázek 9 – První model akumulátoru tepla	13
Obrázek 10 – Změna volné entalpie s teplotou [12]	16
Obrázek 11 – Porovnání výrobcem udávaných hodnot pro látku RT 35 HC s regresí	17
Obrázek 12 – Kompletní schéma akumulátoru bez řešení prostupu tepla stěnou trubky	18
Obrázek 13 – Idealizovaný tvar fázového rozhraní	21
Obrázek 14 – Model akumulátoru se zahrnutím vstupních dat z experimentu	23
Obrázek 15 – Naměřený a vypočtený průběh výstupní teploty v čase	24
Obrázek 16 – Průběh rozdílu vypočtené a naměřené teploty (v tomto pořadí) v čase	25
Obrázek 17 – Průběh hmotnostního zlomku kapalné složky v čase	25
Obrázek 18 – Fázové rozhraní se změnou hustoty	27
Obrázek 19 – Naměřený a vypočtený průběh výstupní teploty v čase	28
Obrázek 20 – Průběh rozdílu vypočtené a naměřené teploty (v tomto pořadí) v čase	28
Obrázek 21 – Upravený tvar fázového rozhraní	29
Obrázek 22 – Srovnání vypočteného a naměřeného tepelného toku	34
Obrázek 23 – Rozdíl vypočteného a naměřeného tepelného toku (v tomto pořadí)	35
Obrázek 24 – Rozdíl tepelných toků vztažený na měřenou hodnotu	35
Obrázek 25 – Srovnání vypočteného a naměřeného sděleného tepla	36
Obrázek 26 – Rozdíl sděleného tepla (výpočet – měření)	36
Obrázek 27 – Rozdíl sděleného tepla vztažený na měřenou hodnotu	37
Obrázek 28 – Průběh hmotnostního zlomku v čase	37
Obrázek 29 – Naměřený a vypočtený průběh výstupní teploty v čase	39
Obrázek 30 – Průběh rozdílu vypočtené a naměřené teploty (v tomto pořadí) v čase	40
Obrázek 31 – Srovnání naměřeného a vypočteného tepelného toku	40
Obrázek 32 – Rozdíl vypočteného a naměřeného tepelného toku (v tomto pořadí)	41



Obrázek 33 – Rozdíl tepelných toků z obrázku (Obrázek 32) vztažený na měřenou hodnotu ...	41
Obrázek 34 – Srovnání vypočteného a naměřeného sděleného tepla	42
Obrázek 35 – Rozdíl sděleného tepla (výpočet – měření)	42
Obrázek 36 – Rozdíl sděleného tepla vztažený na měřenou hodnotu	43
Obrázek 37 – Průběh hmotnostního zlomku v čase	43
Obrázek 38 – Srovnání teplot v PCM	45
Obrázek 39 – Simulace tuhnutí	48
Obrázek 40 – Simulace tání.....	48
Obrázek 41 – Závislost hmotnostního zlomku kapalné fáze na čase při tání	49

Seznam použitého softwaru

Autodesk Inventor 2019

MATLAB R2019b

Microsoft office 365

OpenModelica

Seznam příloh

Složka obsahující všechny soubory vytvořeného modelu potřebné pro jeho spuštění

Návod k použití modelu

Tabulka s různými druhy PCM doplněná o interpolační data potřebná pro změnu PCM
v modelu ve formátu (.xlsx)

Tabulky s oběma použitými sadami experimentálních dat ve formátu (.mat)