

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní
Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

Diplomová práce

**Modelování latentního akumulátoru tepla za použití
komerčního CFD programu**

Bc. Elizaveta Schastlivtseva

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D.
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Aplikovaná mechanika

Praha, 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Schastlivtseva** Jméno: **Elizaveta** Osobní číslo: **452773**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Aplikovaná mechanika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Modelování latentního akumulátoru tepla za použití komerčního CFD programu

Název diplomové práce anglicky:

Modelling of Latent Heat Thermal Energy Storage Using Commercial CFD Code

Pokyny pro vypracování:

Provedte stručnou rešerši týkající se latentních akumulátorů tepla s důrazem na používané materiály pro ukládání tepla. Popište motivaci k použití latentních akumulátorů tepla v porovnání s akumulací bez fázové změny. K modelování fázové změny implementujte do výpočtového programu model zdánlivé měrné tepelné kapacity. Model doplňte tak, aby v oblastech kapalné fáze mohlo docházet k volné konvekci. Použitý model ve své práci podrobně popište. Provedte numerické řešení proudění v kavitě s volnou konvekcí a ověřte si správnost svého řešení. Dále provedte numerické řešení proudění v kavitě, kde dochází k postupnému tavení látky a výsledky porovnejte s referenčním řešením. V neposlední řadě řešte problém proudění, přestupu tepla a vedení tepla v pevné fázi v případě akumulátoru, který je složen z trubek vyplněných akumulační látkou, kde z vnější strany trubek proudí voda v podélném směru. Podrobně popište a diskutujte získané výsledky.

Seznam doporučené literatury:

dle doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

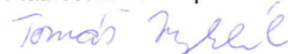
doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D., 12112


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

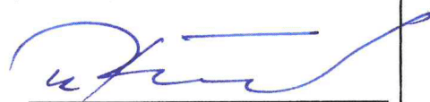
Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.04.2021**


doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

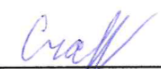

prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30.04.2020
Datum převzetí zadání


Podpis studentky

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

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

V Praze dne

.....

Elizaveta Schastlivtseva

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Tomáši Hyhlíkovi, Ph.D., za ochotu, trpělivost a cenné odborné rady, které mi pomohly při zpracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Petru Jančíkovi za konzultace a pomoc při napsání programového kódu v praktické části zadání.

Anotační list

Jméno autora: Elizaveta Schastlivtseva

Instituce: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní
12112 – Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Technická 4, 166 07 Praha 6

Obor: Aplikovaná mechanika

Název práce: Modelování latentního akumulátoru tepla za použití komerčního CFD programu

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D.

Bibliografické údaje: Počet stran 54
Počet obrázků 31
Počet tabulek 15

Rok: 2020

Klíčová slova: zásobník tepelné energie, volná konvekce, materiály s fázovou změnou, latentní zásobník tepla, tavení materiálu, výměník tepla

Keywords thermal energy storage, natural convection, phase change materials, latent heat storage, melting of materials, heat exchanger

Anotace

Práce se zabývá modelováním části latentního akumulátoru tepla typu výměník v komerčním CFD programu. V rešeršní části je uveden popis třech základních principů akumulace tepelné energie. Dále jsou popsány materiály používané k akumulaci latentního tepla. Na závěr jsou uvedeny hlavní typy konstrukce latentního zásobníku tepla. V praktické části je probrán model volné konvekce v tíhovém poli. Výsledky jsou diskutovány a porovnány s referenčním řešením pro různá Rayleighova čísla. Následně práce popisuje model tavení galia za použití metody efektivní tepelné kapacity s omezením proudění neroztavené látky. Výsledky jsou porovnány s experimentálními a modelovanými hodnotami z vybrané práce. Závěrem je uveden fungující model výměníku ve tvaru trojbokého hranolu s umístěnou trubicí v jeho úhlech, kde mezi nimi proudí teplotnosné médium. Při rozboru výsledků u modelu bylo provedeno porovnání 2 jeho různých délek, dále byl sledován vliv Reynoldsova čísla na rychlost přenosu tepla.

Abstract

The diploma thesis deals with the modeling of a part of a latent heat storage of the exchanger type in a commercial CFD program. The research part describes three basic principles of thermal energy storage. Then, the materials used to accumulate latent heat are described. In conclusion, the main types of latent heat storage design are presented. In the practical part, the model of free convection in a gravitational field is discussed. The results are discussed and compared with the reference solution for different Rayleigh numbers. Subsequently, the work describes a model of gallium melting using the method of effective heat capacity with limiting the flow of unmelted material. The results are compared with experimental and modeled values from selected scientific paper. Finally, a working model of the exchanger in the shape of a triangular prism with placed tubes in its angles, where the heat transfer medium flows between them is presented. In analyzing the results, was made a comparison for two different model's lengths, and the effect of the Reynolds number on the heat transfer rate was also checked.

Obsah

Seznam obrázků.....	8
Seznam tabulek.....	9
Seznam kódů	9
Seznam použitých symbolů a zkratek.....	10
1 Úvod	12
2 Cíle práce	13
3 Rozdělení TES podle principu akumulace tepla.....	13
3.1 Systémy akumulace citelného tepla (SHTES).....	13
3.2 Systémy pro skladování energie termochemické reakce.....	14
3.3 Systémy skladování latentního tepla (LHTES)	15
3.4 Porovnání metod	16
3.5 Ekonomické hledisko využití LHTES.....	16
4 Materiály s fázovou změnou (PCM)	18
4.1 Kritéria výběru materiálu.....	18
4.2 Organické materiály	20
4.2.1 Parafíny	20
4.2.2 Bezparafínové sloučeniny	21
4.2.2.1 Mastné kyseliny	21
4.2.2.2 Polyethylenglykoly	21
4.2.2.3 Cukerné alkoholy	22
4.3 Anorganické materiály	22
4.3.1 Hydráty solí	23
4.3.2 Roztavené soli	23
4.3.3 Kovy a slitiny kovů.....	24
4.4 Eutektiky.....	25
5 Konstrukční řešení úložných nádob latentních zásobníků tepla	25
5.1 Popis základních typů konstrukce.....	25
5.2 Zásobník tepla typu výměník.....	28
5.3 Způsoby zlepšení vodivosti materiálu.....	30
6 Modelování tavení materiálu	32
6.1 Volná konvekce.....	32
6.2 Tavení galia.....	38
7 Modelování trubkového akumulátoru tepla.....	42
7.1 Návrh modelu.....	42
7.2 Popis podmínek výpočtu	43
7.3 Výsledky řešení.....	46
8 Závěr.....	50
9 Seznam použitých zdrojů.....	52

Seznam obrázků

Obr. 1.1. Klasifikace TES systémů podle fyzikálních a chemických procesů zásobování energií [5].....	12
Obr. 3.1. Graf závislosti teploty na přiváděném teple pro materiál s fázovou změnou [10]	15
Obr. 3.2. Podíl teoretických minimálních nákladů na různé přepravní vzdálenosti [14], [30].....	17
Obr. 4.1. Rozdělení materiálů s fázovými přechody [17]	19
Obr. 5.1. Princip práce a celkový výkon zásobníku tepla typu výměník tepla [31].....	26
Obr. 5.2. Princip práce a celkový výkon zásobníku tepla s přímým kontaktem média [31]	27
Obr. 5.3. Princip práce a celkový výkon zásobníku tepla modulárního typu [31]	27
Obr. 5.4. Princip práce a celkový výkon zásobníku tepla typu suspenze s fázovou změnou [31]	28
Obr. 5.5. Klasifikace běžně používaných kontejnerů PCM z hlediska geometrie a konfigurace [32].....	29
Obr. 5.6. Způsoby zlepšení vodivosti materiálu [32].....	30
Obr. 5.7. Porovnání celkové doby tuhnutí a celkového množství tepla, které může být uloženo pro různé konfigurace [35].....	31
Obr. 6.1. Schéma modelu.....	33
Obr. 6.2. Změna vodorovné rychlosti $u(y)$ pro $Ra = 1 \cdot 10^4$	35
Obr. 6.3. Změna horizontální rychlosti $v(x)$ pro $Ra = 1 \cdot 10^4$	35
Obr. 6.4. Změna vodorovné rychlosti $u(y)$ pro $Ra = 1 \cdot 10^5$	36
Obr. 6.5. Změna horizontální rychlosti $v(x)$ pro $Ra = 1 \cdot 10^5$	36
Obr. 6.6. Změna vodorovné rychlosti $u(y)$ pro $Ra = 1 \cdot 10^6$	37
Obr. 6.7. Změna horizontální rychlosti $v(x)$ pro $Ra = 1 \cdot 10^6$	37
Obr. 6.8. Rozložení teplot a proudnice pro $Ra = 1 \cdot 10^4$, $Ra = 1 \cdot 10^5$, $Ra = 1 \cdot 10^6$	38
Obr. 6.9. Schéma modelu plochy vyplněné galiem	38
Obr. 6.10. Graf porovnání simulace čáry rozhraní fází s referenčními hodnotami	41
Obr. 6.11. Kontury rozložení teplot a vektorové pole po době výpočtu 2, 6 a 10 minutách	42
Obr. 7.1. Schéma trubkového zásobníku tepla	43
Obr. 7.2. Sítování zvoleného modelu	44
Obr. 7.3. Kontury teploty v souvislosti s časem tavení materiálu	46
Obr. 7.4. Vektorové pole pro 80, 210 a 510 sekund výpočtu.....	47
Obr. 7.5. Vektorové pole pro 540, 1 380 a 1 435 sekund výpočtu	47
Obr. 7.6. Závislost tepelného toku plochou vztaženého na jednotku délky a čas	48
Obr. 7.7. Graf porovnání rozložení teploty podél poloměru ve vzdálenosti 30 mm pro trubici o délce 30 a 90 mm	49
Obr. 7.8. Graf rozložení teploty podél poloměru pro začátek a konec trubice 90 mm.....	49
Obr. 7.9. Závislost vztaženého tepelného toku plochou na čase na jednotku délky pro modely s různými rychlostmi teplotnosného média.....	50

Seznam tabulek

Tab. 3.1. Příklady materiálů pro akumulaci citelného tepla [2]	14
Tab. 3.2. Porovnání typických vlastností systémů akumulace tepla [2]	16
Tab. 3.3. Investiční náklady na LHTES systém se sifóny a SHTES se dvěma nádržemi [13]	17
Tab. 3.4. Data ekonomické analýzy [15]	18
Tab. 4.1. Termofyzikální vlastnosti n-parafínů a komerčních parafinových PCM [21].....	20
Tab. 4.2. Termofyzikální vlastnosti mastných kyselin [11].....	21
Tab. 4.3. Termofyzikální vlastnosti PEG [24]	22
Tab. 4.4. Termofyzikální vlastnosti cukerných alkoholů [27]	22
Tab. 4.5. Termofyzikální vlastnosti solných hydrátů [11]	23
Tab. 4.6. Termofyzikální vlastností soli [12]	24
Tab. 4.7. Termofyzikální vlastnosti kovů a slitin [12].....	24
Tab. 4.8. Termofyzikální vlastnosti eutektik [24], [28]	25
Tab. 5.1. Porovnání charakteristik pro tři typy zásobníku tepla [36]	31
Tab. 6.1. Fyzikální vlastnosti vzduchu při teplotě 20 °C	34
Tab. 7.1. Vlastnosti parafínu RT69HC [46].....	43

Seznam kódů

Fig. 6.1. Skript definující efektivní tepelnou kapacitu galia	39
Fig. 6.2. Skript pro omezení proudění pevné frakce galia	40
Fig. 7.1. Skript definující efektivní tepelnou kapacitu pro parafín RT69HC.....	44
Fig. 7.2. Skript pro omezení proudění pevné frakce parafínu RT69HC	45

Seznam použitých symbolů a zkratek

Základní symboly

Symbol	Význam	Jednotky
C	velká konstanta použita v zdrojovém členu	[kg/m ³ s]
c_p	měrná tepelná kapacita	[J/kgK]
d	tloušťka vrstvy kapaliny, délka	[m]
g	tíhové zrychlení	[m/s ²]
Gr	Grashofovo číslo	[1]
h	měrná entalpie	[J/kg]
k	součinitel tepelné vodivosti	[W/mK]
l	charakteristický rozměr elementu	[m]
L	měrné latentní teplo	[J/kg]
m	hmotnost použitého média	[kg]
Q	množství uloženého tepla	[J]
Ra	Rayleighovo číslo	[1]
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
Ri	Richardsonovo číslo	[1]
S_p	zdrojový člen odporu v pohybové rovnici	[kg/m ² s ²]
T	teplota	[K]
t	čas	[s]
T'	rozdíl teploty elementu a okolí	[K]
u	rychlost ve směru osy x	[m/s]
U_{char}	charakteristická rychlost	[m/s]
v	rychlost ve směru osy y	[m/s]
V	obecná rychlost pohybu	[m/s]
w	rychlost ve směru osy z	[m/s]

Řecká písmena

Symbol	Význam	Jednotky
α	součinitel teplotní vodivosti	[m ² /s]
β	součinitel objemové roztažnosti	[1/K]
γ	poměr roztavené látky v materiálu	[1]

Symbol	Význam	Jednotky
ε	malá konstanta, která zabraňuje dělení nulou	[1]
θ	rozdíl teplot	[K]
ρ	hustota	[kg/m ³]
τ	čas pohybu elementu	[s]
τ_T	čas pro vyrovnání teploty	[s]
ν	kinematická viskozita	[m ² /s]

Dolní indexy

Symbol	Význam
0	počáteční stav
$1,2$	indexy stavů
<i>celk</i>	celkový
<i>lower</i>	dolní
<i>e</i>	výstup (angl. exit)
<i>upper</i>	horní
<i>i</i>	vstup (angl. inlet)
<i>left</i>	levý
<i>liquid</i>	tekutý
<i>m</i>	tání (angl. melting)
<i>right</i>	pravý
<i>solid</i>	pevný

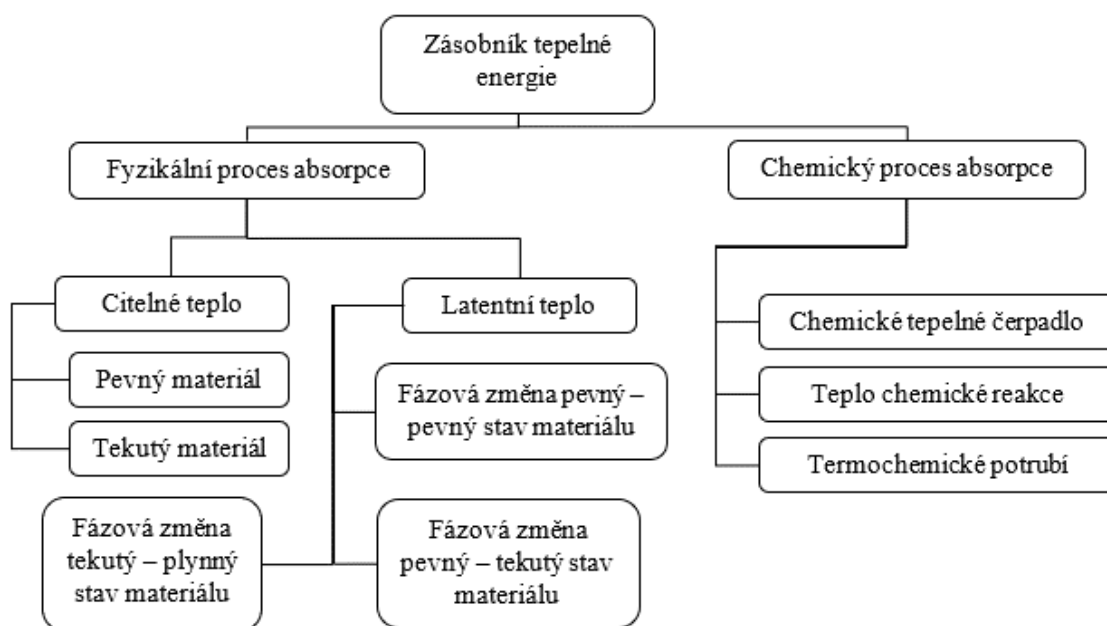
Zkratky

Symbol	Význam
HTF	heat transfer fluid
LHTES	latent heat thermal energy storage
M-TES	mobilized thermal energy storage
PCM	phase change material
SHTES	sensible heat thermal energy storage
TES	thermal energy storage

1 Úvod

Vzhledem k současné situaci v průmyslu, energetice a ekologii stojí před lidmi otázka zlepšení termické účinnosti elektráren a tepláren, aby nedocházelo k přebytečné spotřebě fosilních paliv, která může vést k jejich nedostatku, což v důsledku může hrozit velkými problémy, spočívajícími v omezení rozvoje ekonomiky a lidské společnosti. Kromě toho vede nadměrná spotřeba fosilních paliv k vážnému znečištění životního prostředí [1]. K zamezení těchto problémů se aktivně rozvíjí výroba energie z obnovitelných zdrojů a její skladování; a také metody skladování a následného použití odpadního tepla. Zásobování energií získané z obnovitelných zdrojů (jako jsou sluneční záření, mořské vlny, vítr a bioplyn) je nezbytnou součástí účinného celoročního provozu těchto elektráren, protože zisková část energie z těchto zdrojů je velice závislá na klimatických změnách [2]. Z hlediska zásobování odpadním teplem, které se většinou „vyhazuje“ do životního prostředí, lze docílit zvýšení účinnosti průmyslových tepelných aplikací a přispět k omezení rizika globálního oteplování [3]. Tuto uchovanou tepelnou energii lze používat pro další tepelné aplikace po uplynutí nějaké doby anebo na vytápění bytových prostorů.

Zde můžeme vzít v úvahu technologii skladování tepelné energie TES (thermal energy storage), která zásobuje tepelnou energií zahříváním nebo ochlazováním akumulčního média, čímž tato energie může být později použita na vytápění prostorů, chlazení a výrobu elektřiny [2]. Zmíněná technologie zásobování energií se rozděluje do dvou odvětví, která zastupují buď fyzikální nebo chemickou podstatu vzniku a přenosu tepla, s následujícím rozdělením podle principů ukládání tepelné energie. Těmito metodami jsou skladování energie citelného tepla (SHTES – sensible heat thermal energy storage), latentního tepla (LHTES – latent heat thermal energy storage) a energie termochemické reakce. Výběr TES je obecně závislý na požadované době skladování (denní nebo sezónní skladování), ekonomické životaschopnosti, provozních podmínkách atd [4]. Na obrázku níže jsou uvedena dělení těchto technologií podle typu akumulace tepelné energie:



Obr. 1.1. Klasifikace TES systémů podle fyzikálních a chemických procesů zásobování energií [5]

2 Cíle práce

Tato práce je zaměřena na postupné pochopení principů modelování tavení materiálu a následné modelování zjednodušené části zásobníku latentní tepelné energie v komerčním CFD programu. Cíle rešeršní části spočívají v popisu materiálů majících velké latentní teplo při fázové změně, které jsou vhodné pro použití v systému akumulace energie. Další část se týká krátkého přehledu základních typů konstrukce zásobníků tepla s označením hlavních motivačních bodů použití zásobníku právě daného typu. Důležitým krokem je definice modelu volné konvekce, vznikající v tekutině v tíhovém poli. Následně je pozornost věnovaná stanovení modelu tavení látky za použití metody efektivní tepelné kapacity. Hlavním úkolem práce je vytvoření numerického modelu přenosu tepla aplikovaného na část latentního zásobníku tepelné energie. Závěrečným krokem je testování získaného modelu.

3 Rozdělení TES podle principu akumulace tepla

3.1 Systémy akumulace citelného tepla (SHTES)

Systémy akumulace citelného tepla využívají tepelnou kapacitu a změnu teploty materiálu během procesu nabíjení nebo vybíjení – teplota zásobního materiálu stoupá, když je energie absorbována, a klesá, když je energie odebírána [6]. Avšak vzhledem k poměrně nízké akumulační hustotě jsou objemy příslušných materiálů potřebných k zabezpečení uložené energie v užitečném rozsahu pro spotřebu mimořádně velké. Mezi materiály používané při skladování citelného tepla patří kapalná nebo pevná akumulační média, to mohou být například písek, tlaková voda, roztavené soli, olej, keramika anebo horniny [6]. Při výběru materiálů je důležitá vysoká tepelná kapacita a také vysoká teplota varu nebo tání [7]. Samotný systém akumulace citelného tepla sestává z akumulačního média, kontejneru a vstupních / výstupních zařízení. Dlouhodobě se používají velké kolektory, skalní dna a solární jezírka [4].

Z hlediska termodynamiky ukládání citelného tepla způsobí zvýšení entalpie materiálu [7]. Množství uloženého tepla závisí na měrné tepelné kapacitě média, změně teploty a množství akumulačního materiálu, což je popsáno v následujícím vzorci [4]:

$$Q = m \cdot \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT, \quad (3.1)$$

kde Q je množství uloženého tepla, m je hmotnost použitého média, c_p je jeho měrná tepelná kapacita, T_1 a T_2 jsou počáteční a konečná teplota.

V závislosti na teplotním rozsahu a aplikaci existuje velké množství akumulačních materiálů. Nejběžnější volbou je voda, protože má poměrně vysokou měrnou tepelnou kapacitu (4,2 kJ/kgK) v porovnání s jinými kapalinami při okolních teplotách, umožňuje velkou rychlost přenosu tepla a na rozdíl od pevných látek může čerpat teplo z okolí. Pevné látky mají výhodu vyšších měrných tepelných kapacit, což umožňuje používat kompaktnější úložné jednotky. Pokud je potřeba využívat vyšší teploty (jako například pro předehřívání dodávek vzduchu do pece), pevné látky jsou preferovaným citelným zásobníkem tepla, ze kterých se častěji používají žáruvzdorné materiály. Pokud je potřeba čerpat zásobní médium, tak se používají tekuté kovy [4]. Příklady materiálů podle [2] jsou v tabulce níže:

Materiál	Použitelná teplota [°C]	Hustota [kg/m³]	Měrná tepelná kapacita c_p [J/kgK]
Písek	20	1 555	800
Kámen	20	2 560	879
Beton	20	2 640	820
Litina	20	7 900	837
Voda	0–100	1 000	4 190
Motorový olej	≤ 160	888	1 880
Ethanol	≤ 78	790	2 400

Tab. 3.1. Příklady materiálů pro akumulaci citelného tepla [2]

Zásobníky citelného tepla jsou používány pro teplo nízké kvality, jako je například sluneční energie nebo odpadní teplo z elektráren a z průmyslových tepelných procesů pro krátkodobé a dlouhodobé skladování [7]. I když je tato metoda méně účinná, na rozdíl od metod latentního a chemického skladování tepla je nejnadhěji realizovatelná. Pro ni jsou používány levnější, netoxické látky.

3.2 Systémy pro skladování energie termochemické reakce

Systémy skladování vazebné energie jsou založeny na vratných chemických reakcích, během nichž je energie absorbována nebo uvolňována porušováním nebo obnovováním chemických vazeb. Veškeré uložené teplo lze získat zpátky pomocí chemického slučování produktu z předchozího chemického rozložení. Tento proces ukládání a uvolňování tepla lze popsat obecnou rovnicí:



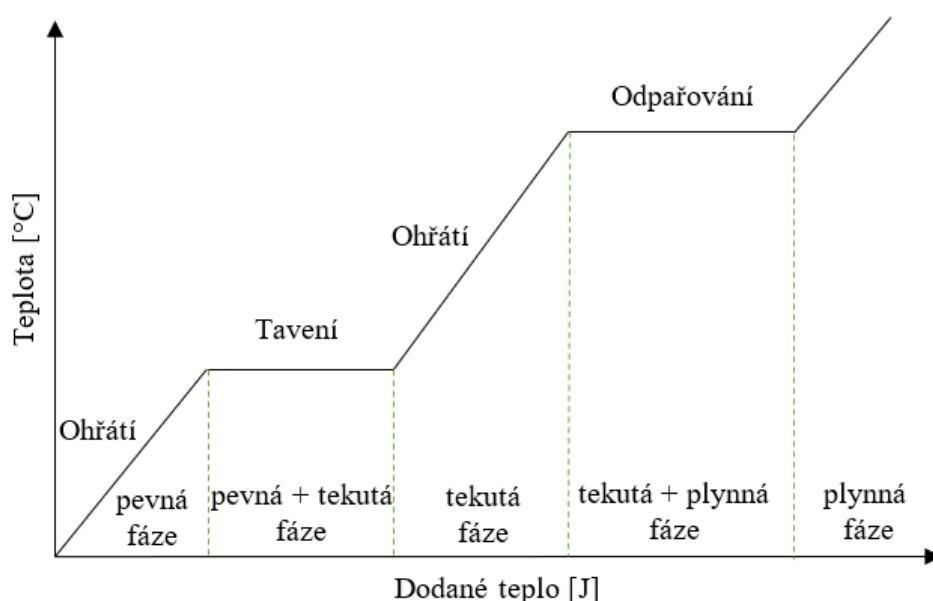
kde se sloučenina A přívodem tepla dělí na chemické látky B a C endotermickou disociační reakcí. Vyrobené chemické látky B a C ukládají tepelnou energii ve formě energie chemického potenciálu. Pro umožnění dlouhodobého skladování s minimální ztrátou tepla je potřeba ukládat reakční složky B a C zvlášť. [8]

Základními akumulačními materiály je skupina hydrátů solí: běžně používaným je hydrát Epsomické soli (MgSO₄·7H₂O). Nutnou vlastností používaných hydrátů je možnost zabudovat velké množství vody do krystalové mřížky, aby usnadnila chemickou reakci. Pro dlouhodobé skladování se musí tato látka dehydratovat a ukládat se jako bezvodá sůl. [5]

Přínosem této metody je mnohem vyšší hustota akumulace energie než u jiných způsobů skladování, protože u některých reakcí je reakční teplo vyšší než citelné teplo nebo teplo fázové změny, což teoreticky může vést k menším rozměrům uložistiště a nižším nákladům. Další výhodou je to, že některé reakce probíhají při vysokých teplotách, které jsou dostatečné pro fungování tepelných motorů vysoké účinnosti, například při výrobě elektřiny. Nevýhodami této metody jsou cena chemikálií a složitost systému. Solární energie je dobrým příkladem velkého, ale nestálého zdroje energie, který by mohl být používán více, pokud by byly k dispozici úsporné akumulační prostředky. [9]

3.3 Systémy skladování latentního tepla (LHTES)

Systémy skladování latentní tepelné energie (LHTES) jsou založeny na absorbování nebo uvolňování tepla při fázové změně materiálu. Mechanismus ukládání tepla lze popsat pomocí níže uvedeného grafu. Na začátku ohřívání teplota materiálu roste přímo úměrně k přijímané energii – akumulace citelného tepla. Dále teplota materiálu dosáhne bodu tavení (případně bodu varu materiálu, pokud je ohřívána látka na počátku tekutá). Po dosažení této teploty se přidávaná energie používá na změnu fáze materiálu při izotermickém procesu, toto teplo spotřebované na změnu fáze je nazýváno latentní. Po celkové přeměně materiálu do kapalné / plynné fáze jeho teplota zase začíná růst, až dosáhne bodu varu v případě ohřátí tekuté látky. Při této teplotě dochází k izotermické fázové přeměně kapalina-plyn. Obdobné změny probíhají při procesu ochlazování, kde můžeme dostat zpátky v látce akumulovanou energii pro další použití. [10]



Obr. 3.1. Graf závislosti teploty na přiváděném teple pro materiál s fázovou změnou [10]

Uložené teplo lze vyjádřit vztahem:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mc_{p,solid}(T)dT + mL + \int_{T_m}^{T_e} mc_{p,liquid}(T)dT, \quad (3.3)$$

kde první člen popisuje akumulaci citelného tepla, který je přímo úměrný růstu teploty do bodu tání materiálu, druhý člen popisuje latentní teplo změny fáze materiálu, třetí člen zase popisuje akumulaci citelného tepla, pokud dojde k dalšímu ohřátí materiálu. Množství uložené energie závisí na množství materiálu, měrném latentním teple a stavu materiálu, který zažil transformaci.

Materiály, které jsou používány pro daný způsob akumulace, jsou známé jako materiály s fázovou změnou (PCM – phase-change material). Tyto materiály budou popsány v dalších odstavcích. Při výběru prvotního stavu se využívá ten fakt, že při přeměně z kapalné na plynnou fázi má materiál nejvyšší latentní teplo, ale zároveň je to doprovázeno obrovskou změnou v objemu skladovacího materiálu, což činí skladování velice složitým a nepraktickým. Proto jsou častěji využívány materiály PCM s přeměnou pevné fáze na kapalnou [10].

Konstrukce obecného systému v sobě zahrnuje PCM látku akumulující teplo, úložnou jednotku s vodivým povrchem a vstupní / výstupní zařízení pro přívod / odvod tepelné energie

[11]. Hlavní výhodou je vysoká akumulční tepelná kapacita ve srovnání s SHS metodou a schopnost materiálů cyklické přeměny fází pro dlouhodobé použití.

3.4 Porovnání metod

Samozřejmě každá metoda má svoje výhody a nevýhody. Kromě toho rozdíl v metodách umožňuje jejich efektivnější použití v rozličných aplikacích. Níže je uvedena tabulka porovnání hlavních vlastností zásobníků energie podle [2]:

TES systém	Kapacita [kWh/t]	Příkon [MW]	Účinnost [%]	Doba skladování	Cena [€/kWh]
Systém akumulace citelného tepla (horká voda)	10–50	0,001–10	50–90	dny/měsíce	0,1–10
Systém akumulace latentního tepla (PCM)	50–150	0,001–1	75–90	hodiny/měsíce	10–50
Systém akumulace tepla termochemické reakce	120–250	0,01–1	75–100	hodiny/měsíce	8–100

Tab. 3.2. Porovnání typických vlastností systémů akumulace tepla [2]

Dnes je největší pozornost ve výzkumu věnována latentním zásobníkům tepla. V důsledku možností výběru materiálů ve velkém rozsahu pracovních teplot, dostupné konstrukce nádob a poměrně levných materiálů je LHTES vhodný pro většinu aplikací. Proto další část práce bude věnována primárně metodě LHTES, materiálům PCM a modelování procesu fázového přechodu látky.

3.5 Ekonomické hledisko využití LHTES

Z ekonomického hlediska bylo použití metody latentního skladování podrobeno několika ekonomickým vyhodnocení a analýzám. Zásadním bylo zjištění, že v důsledku používání LHTES lze snížit nároky na spotřebu energií, vyrovnat rozdíly v poptávce energií a také distribuovat tepelnou energii na velké vzdálenosti, například pro zmenšení nákladů na spotřebu elektřiny k vytápění prostorů a ohřátí teplé vody u samostatně stojících domů, které nejsou připojeny k síti dálkového vytápění.

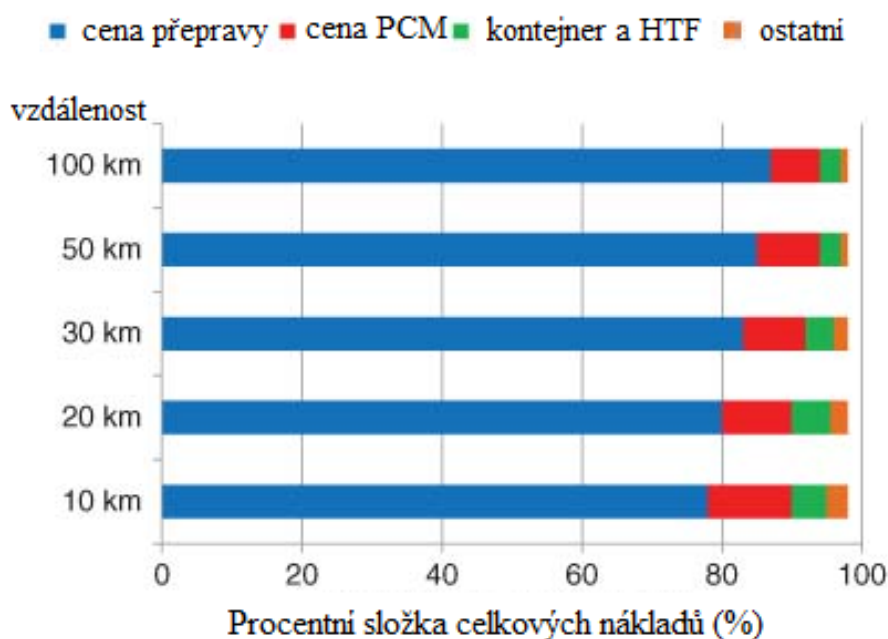
Pro podrobnější studium lze uvést práci skupiny výzkumníků Robaka, C. W., Bergmana, T. L. a Faghri, A. [13], kteří provedli ekonomické vyhodnocení systému LHTES s využitím termosifónů místo tepelných trubek v konstrukci. Tento systém byl nákladově porovnán se systémem SHTES. Jako akumulční látka v obou případech byla předpokládána sůl. Ve své práci se vědci zabývali analýzou investičních nákladů na jednotku LHTES spojenou se čtyřmi hlavními komponentami systému: vnější úložný kontejner, PCM, termosifóny a kanály pro teplotnosnou tekutinu. Tato analýza kapitálových nákladů hlavních komponent byla umožněna za pomoci odhadu ceny na základě velikosti a hmotnosti komponent. Autoři stanovili, že v důsledku větší akumulční hustoty energie PCM v systému LHTES se snižuje požadovaný celkový objem nádrže přibližně o 65 %, zároveň se snižuje střední hmotnost TES přibližně o 30 % ve srovnání s SHTES. Dále jejich analýza ukázala, že za použití konstrukce LHTES s termosifóny lze dosáhnout 15% úspory investičních nákladů ve srovnání s metodou citelné

akumulace tepelné energie. Níže je uvedena tabulka porovnání nákladů TES systémů, převzata z [13], ceny z jejich práce jsou aktuální pro rok 2011.

Zařízení	LHTES cena (USD \$)	Náklady SHTES (USD \$)
Akumulační materiál	14,9	21,0
Úložný kontejner	4,8	10,4
Termosifóny	11,1	-
Kanály teplonosné tekutiny	1,6	-
Výměník tepla roztavené soli	-	5,4
Roztavené solné čerpadlo	-	1,6
Režie (10%)	3,3	3,9
Celkové náklady	35,7	42,3

Tab. 3.3. Investiční náklady na LHTES systém se sifóny a SHTES se dvěma nádržemi [13]

Další ukázkou je práce vědců Li, H., Wang, W., Yan, J., Dahlquist, E. [30], kteří se zabývali identifikací základních nákladů na systém M-TES pro dálkovou distribuci tepla. U těchto systémů je materiál PCM, který přímo rozhoduje o topné kapacitě a nákladech, uložen do specifické nádoby a přepravován nákladním automobilem. Z jejich práce je patrné, že největší část nákladů je spojena s náklady na dopravu. Cena provozu stoupá lineárně spolu se zvyšováním dopravní vzdálenosti a klesá s rostoucí poptávkou energie, avšak při velké spotřebě tepla roste přepravní frekvence dodání, tím se způsobuje další růst transportních nákladů. Na Obr. 3.2 je diagram podílu nákladů na provoz systému v souvislosti se vzdáleností od spotřebitelů. Ve srovnání s jinými metodami dodávky tepla, jako jsou kotelní systémy na pelety / bio-olej / bioplyn nebo olej a elektrické tepelné čerpadlo na vzduch, je systém M-TES vhodnější pro koncového uživatele s krátkou dopravní vzdáleností a velkou poptávkou na teplo.



Obr. 3.2. Podíl teoretických minimálních nákladů na různé přepravní vzdálenosti [14], [30]

Dalším příkladem ekonomické analýzy je použití LHTES pro klimatizační prostor v dopravních aplikacích [15]. V této práci byly porovnány experimentální a simulační scénáře práce klimatizace bez a za využití PCM materiálu. Analýza probíhala z hlediska změn teploty místnosti v přechodném stadiu, změny teploty místnosti v provozu v ustáleném stavu, relativní vlhkosti v testovacím prostoru, topného faktoru, úspory energie, nouzového větrání / chlazení a doby návratnosti investic. Závěry těchto prací jsou zmenšení kolísání teploty v místnosti od 4,31 °C do 2,56 °C a snížení spotřeby elektrické energie o 17,82 %, z toho je následkem zvýšení hodnoty topného faktoru klimatizačního systému o 19,05 %. Také byl stanoven předpoklad na vysoké ziskovosti daného systému po době návratnosti ~ 3,3 let, která by mohla být dále snížena na ~ 1,83 při použití systému ve velkém měřítku. Níže je přiložena tabulka rozpočtu aplikace systémů.

Vlastnosti	SHTES systém	Systém založený na PCM
Provozní den	200 den/rok	
Provozní doba	8 h/den	
Život	15 let	
Diskontní sazba	4%	
Náklady na elektřinu	14,4 pence/kWh	
Spotřeba elektrické energie	7,24 kWh/den	5,95 kWh/den
Náklady na zařízení pro skladování energie	0 GBP	40 liber
Cena PCM	0 GBP	8,37 GBP/kg
Množství PCM	0 kg	10 kg

Tab. 3.4. Data ekonomické analýzy [15]

4 Materiály s fázovou změnou (PCM)

4.1 Kritéria výběru materiálu

Nejdůležitější částí návrhu zásobního systému je výběr akumulční látky. Aby akumulace tepla byla co nejvíc účinná, materiály musí mít řadu určitých vlastností. Tyto materiálové požadavky jsou formulovány skupinou výzkumníků. Zásadní část uvedl ve své práci Abhat, A. [16], následně je rozepsal ve své pozdější práci [11]. Tato kritéria, která musí splňovat PCM materiál, jsou uvedena níže:

A) Termodynamická kritéria

- bod tání musí být blízký požadovanému rozsahu provozních teplot systému TES;
- mít vysoké latentní teplo na jednotku hmotnosti, tím se zmenší hmotnostní / objemová spotřeba materiálu pro ukládání daného množství energie;
- mít vysokou hustotu materiálu pro menší velikost zásobníku;
- mít vysokou měrnou tepelnou kapacitu pro zvýšení akumulace citelného tepla;

- mít vysokou tepelnou vodivost pro zvýšení požadované rychlosti nabíjení a vybíjení;
- mít shodné tavení a tuhnutí: materiál by se měl úplně roztavit / ztuhnout tak, aby složení kapalná a pevná fáze bylo shodné – rozdíl v hustotě mezi pevnou látkou a kapalinou může způsobit segregaci (nerovnoměrné chemické složení ve výsledné struktuře látky);
- mít malé změny objemu během fázového přechodu, aby bylo možné použít jednoduchou geometrii úložné nádoby.

B) Kinetická kritéria

- materiál fázové změny by měl vykazovat malé nebo žádné podchlazení (začátek tuhnutí materiálu je výrazně pod teplotou tání) během tuhnutí; někdy může být podchlazení potlačeno zavedením nukleačních činidel do použité látky.

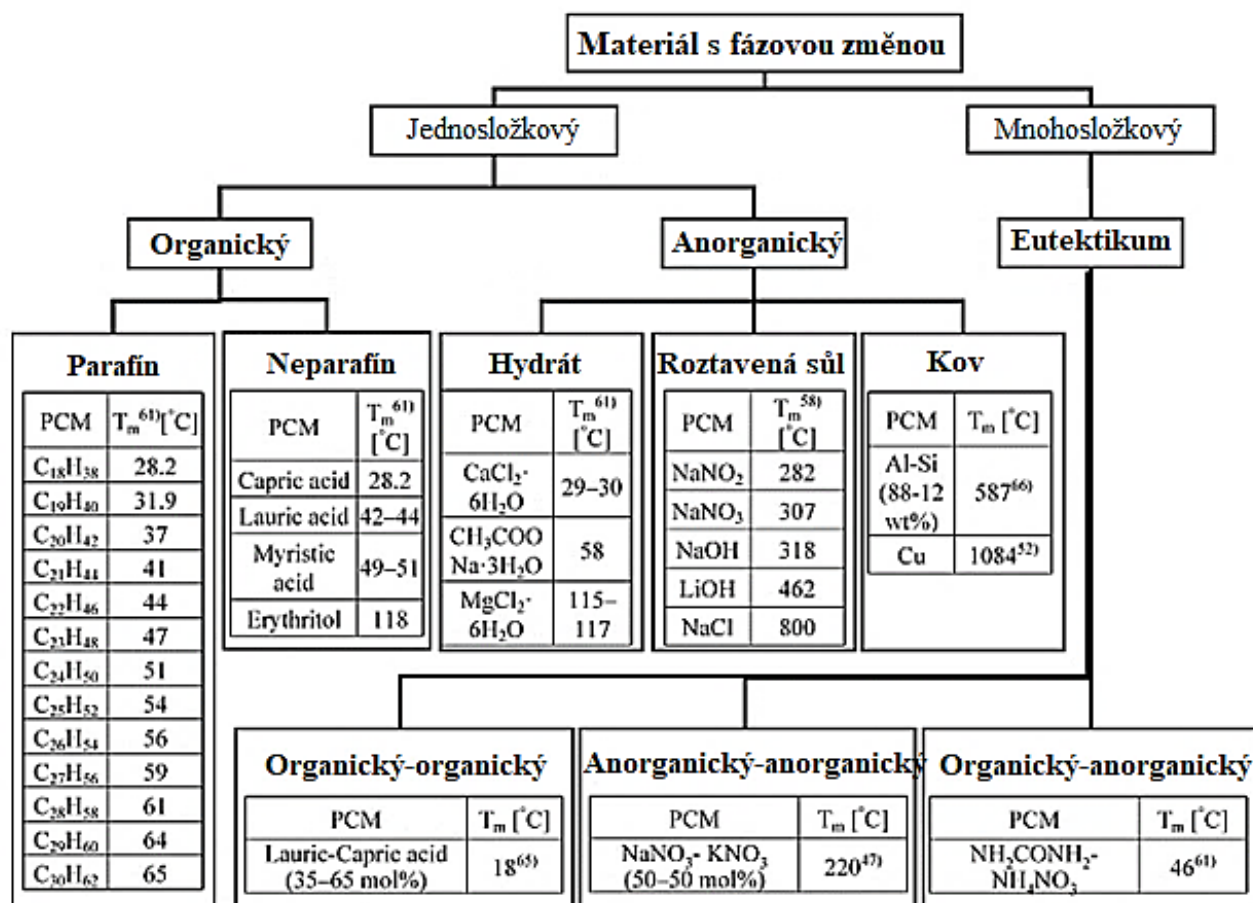
C) Chemická kritéria

- mít chemickou stabilitu;
- nemělo by docházet k žádnému chemickému rozkladu pro zajištění vysoké životnosti systému LHTES;
- nemít korozivní náchylnost na úložný materiál zásobníku;
- materiál by měl být nejedovatý, nehořlavý a nevýbušný.

D) Ekonomická kritéria

- materiál by měl být k dispozici ve velkém množství;
- levný.

Na základě chemické povahy se materiály s fázovou změnou rozdělují do třech skupin: organické, neorganické a jejich eutektiky. Níže je uveden graf rozdělení materiálů do skupin a jejich zástupce, převzatý z [17].



Obr. 4.1. Rozdělení materiálů s fázovými přechody [17]

4.2 Organické materiály

Organické materiály jsou látky, které mají přírodní původ. Rozlišujeme parafinové a bezparafinové organické sloučeniny. Tyto materiály jsou chemicky stabilní, mají stejné složení před a po tuhnutí, úzký teplotní rozsah fázové změny, vysokou hustotu tepelné energie, jsou stabilní, většinou nemají podchlazení, prokazují malou korozivnost a jsou vhodné pro přísadu do různých stavebních materiálů. Používány jsou pro nízkoteplotní aplikace (0–120 °C) zahrnující akumulaci energie v budovách, jako akumulární přísada v textilní látce, skladování solární energie, chlazení elektronických zařízení a baterií. Kromě výhod mají řadu nevhodných parametrů, jako jsou nízká tepelná vodivost (0,1–0,35 W/mK), hořlavost, tvorba kouře, několik z nich zapáchá a u některých může být významná změna objemu po fázovém přechodu. V současné době probíhají zkoušky na posouzení hořlavosti a potenciálu tvorby kouře u některých z efektivnějších PCM pro stanovení požární odolnosti. [18], [19], [20]

4.2.1 Parafíny

Parafín je derivát ropy, skládá se ze směsi alkanů $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$ s převážně přímým řetězcem. Větší množství tepla se uvolňuje při krystalizaci (CH_2) řetězce. Teplota tání alkanů se zvyšuje s rostoucím počtem atomů uhlíku. Alkany obsahující přibližně 8 až 15 atomů uhlíku známe jako komerční vosky. Alkany obsahující 14 až 40 atomů uhlíku a mají teploty tání mezi 6–80 °C jsou obecně chápány jako parafíny. Parafíny se kvalifikují jako materiál pro LHTES kvůli jejich dostupnosti ve velkém teplotním rozmezí. Z důvodu zohlednění nákladů však mohou být jako PCM použity pouze parafíny technické kvality. Parafín je bezpečný, nereaktivní, nekorozevní, nemá tendenci k podchlazení. Je chemicky inertní a stabilní pod teplotou 500 °C. Vykazuje stabilní tepelné vlastnosti pro 1 500 cyklů tavení. Kromě několika příznivých vlastností vykazuje některé nežádoucí vlastnosti, jako například nízká tepelná vodivost, poměrně velká změna objemu v procesu stavové změny. Často komerční parafíny nemají přesně stanovenou teplotu tání, jsou hořlavé a mohou způsobit změkčení plastových nádob při těsném kontaktu. Tyto nežádoucí účinky lze částečně odstranit mírnou úpravou složení parafinové látky a úložné nádoby. Kromě toho je nevýhodou to, že ceny parafínu jsou spojeny s cenami ropy, a proto nejsou stabilní, velký objem těžby ropy má zároveň vliv na znečištění životního prostředí. [11], [20], [21], [22]

Níže je uvedena tabulka s příkladem parafinových materiálů a jejich vlastností pro teplotu 20 °C:

Materiály	Bod tání [°C]	Latentní teplo [kJ/kg]	Hustota [kg/m ³]	Tepelná vodivost [W/mK]
n-tetradekan (C ₁₄)	6	228–230	763	0,14
n-pentadekan (C ₁₅)	10	205	770	0,20
parafín C ₁₃ - C ₂₄	22–24	189	900	0,21
RT 35 HC	35	240	880	0,20
RT 70 HC	69–71	260	880	0,20
parafinový přírodní vosk 811	82–86	85	-	0,72 (pevná látka)

Tab. 4.1. Termofyzikální vlastnosti n-parafinů a komerčních parafinových PCM [21]

4.2.2 Bezparafínové sloučeniny

Jedná se o rozsáhlou skupinu organických PCM, které pocházejí z rostlinného oleje nebo živočišného tuku. Na rozdíl od různých druhů parafínů, které mají mezi sebou velmi podobné vlastnosti, každý z bezparafínových organických materiálů má své odlišné charakteristiky. Jsou to hydrogenované uhlovodíky, které jsou chemicky stabilní a mohou vydržet po celá desetiletí. Tyto materiály jsou hořlavé a neměly by být vystaveny nadměrně vysokým teplotám, plamenům nebo oxidačním činidlům. [22], [23]

4.2.2.1 Mastné kyseliny

Mastné kyseliny jsou karboxylové kyseliny s dlouhým uhlovodíkovým řetězcem a koncovou karboxylovou skupinou, mají chemický vzorec $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{2n}-\text{COOH}$. Mastné kyseliny mají obvykle sudý počet atomů uhlíku (4 až 28). Jejich výhodami jsou nulová toxicita, biologická rozložitelnost, mají schopnost k cyklickému tavení a tuhnutí bez podchlazení. Další výhodou je možnost tvorby eutektické směsi, což umožňuje upravovat teplotu změny fáze. Jejich hlavními nevýhodami jsou náklady, které jsou 2–2,5 krát větší než náklady na parafíny. Kromě toho mastné kyseliny mají nízkou tepelnou vodivost. [20], [24], [25]

Níže jsou v tabulce Tab. 4.2 uvedeny termofyzikální vlastnosti mastných kyselin.

Materiály	Bod tání [°C]	Latentní teplo [kJ/kg]	Hustota [kg/m ³]	Tepelná vodivost [W/mK]
kyselina kaprylová	16.5	149	1,033 (10 °C)	0,148 (20 °C)
kyselina kaprinová	31.5	153	0,886 (40 °C)	0,149 (10 °C)
kyselina laurová	42–44	178	0,870 (50 °C)	0,147 (40 °C)
kyselina myristová	54	187	0,844 (80 °C)	-
kyselina palmitová	63	187	0,847 (80 °C)	0,165 (70 °C)
kyselina stearová	70	203	0,941 (40 °C)	0,172 (70 °C)

Tab. 4.2. Termofyzikální vlastnosti mastných kyselin [11]

4.2.2.2 Polyethylenglykoly

Polyethylenglykoly (PEG) jsou dalším druhem neparafínového organického PCM. Číslice používané v názvech PEG označují průměrnou molární hmotnost. Chemický vzorec pro PEG je $\text{HO-CH}_2-(\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2)_n-\text{CH}_2-\text{OH}$. Jsou vyráběny z etylenglykolu, rozpustné ve vodě. Mají příznivé vlastnosti, jako jsou vysoká hodnota latentního tepla, tepelná a chemická stabilita, žádná toxicita, jsou nehořlavé, nekorozivní, nemají podchlazení a mají nízkou hodnotu. Teplota fázové změny PEG může být naladěna úpravou molekulové hmotnosti. PEG má (stejně jako jiné organické PC) nízkou tepelnou vodivost. Tab. 4.3 ukazuje tepelné vlastnosti vybraných PEG pro PCM. [24]

Materiály	Teplotní bod počátku tání [°C]	Teplotní bod na konci tání [°C]	Nejvyšší teplotní bod v procesu tání [°C]	Latentní teplo [kJ/kg]
PEG1000	19,0	45,6	76,7	78,6
PEG2000	42,0	63,0	90,9	163,1
PEG4000	45,6	64,7	93,9	172,0
PEG8000	47,6	67,7	97,2	177,2
PEG10000	50,3	69,7	99,5	191,0
PEG20000	51,0	67,7	95,8	180,5

Tab. 4.3. Termofyzikální vlastnosti PEG [24]

4.2.2.3 Cukerné alkoholy

Cukerné alkoholy, také známy jako polyalkoholy, se považují za PCM o střední teplotě (90–200 °C). Cukerné alkoholy jsou hydrogenovanou formou uhlohydrátů, jejich obecný vzorec je $\text{HO-CH}_2\text{-[CH(OH)]}_n\text{-CH}_2\text{-OH}$. Obecně mají vyšší latentní teplo a hustotu než parafíny a mastné kyseliny. Jejich výhodami jsou malá změna objemu, jsou nekorozivní, netoxické a šetrné k životnímu prostředí. Náchylné k podchlazení. Proces podchlazení umožňuje skladování materiálu v kapalně fázi a zachovává latentní teplo s použitím minimální izolace. Jejich nevýhodami jsou nízká tepelná vodivost, nízká tepelná stabilita pro dlouhé cyklické použití a taky málo údajů o jejich fyzikálních vlastnostech, experimentálně doložených. [12], [26]

Materiály	Bod tání [°C]	Latentní teplo [kJ/kg]	Hustota [kg/m ³]
D-manitol	166,0	279,0	1,52
erythritol	117,0	340,0	1,45
galactitol	188,5	358,0	1,47
xylitol	94,0	246,0	1,52
maltitol	150,0	159,7	1,62
isomalt	140,0–155,0	129,0	1,69

Tab. 4.4. Termofyzikální vlastnosti cukerných alkoholů [27]

4.3 Anorganické materiály

Tyto materiály mají široký rozsah teplot fázového přechodu. Jejich výhodami jsou vysoká hustota akumulace tepla, vysoká hodnota skupenského tepla vztahovaná na jednotku objemu. Jsou snadno dostupné za nízkou cenu, nehořlavé, mírně toxické, mají relativně vyšší tepelnou vodivost kolem 0,5 W/mK. Jsou náchylné k segregaci a podchlazení, korozivní. Anorganické sloučeniny zahrnují hydráty solí, soli, kovy a slitiny. [18], [28]

4.3.1 Hydráty solí

Hydráty solí se běžně používají při nízkých provozních teplotách v rozmezí 30–50 °C. Jsou to anorganické soli obsahující jednu nebo více molekul vody, s chemickým vzorcem $AB \cdot nH_2O$, kde A i B jsou sloučeniny soli. Solné hydráty jsou netoxické a nehořlavé. Mají vyšší tepelnou vodivost ve srovnání s organickými PCM, ale také vykazují změny objemu při tání. Proces změny fází pevných a kapalných hydrátů solí vypadá ve skutečnosti jako dehydratace hydratovaných solí, tato reakce je podobná termodynamickému tání nebo tuhnutí. Solný hydrát se obvykle při tání přeměňuje na solný hydrát s menším počtem molů vody nebo na jeho bezvodou formu. Hydráty solí nejsou stabilní ve vodních prostředích a parách. Taktéž je potřeba zamezit nepříznivému dopadu na životní prostředí. Ukládání materiálu je možné do plastových obalů, díky tomu je tento proces relativně snadný a levný, ale při návrhu je nutno dávat pozor na těsnost pro zabezpečení dlouhodobé životnosti. Během cyklování v provozu může dojít k nerovnoměrnému tavení materiálu a část soli se usadí na dně. Při opakování této situace může většina soli ztuhnout na dně a tím se bude snižovat celková kapacita akumulace tepla, protože oddělení fází vede k tomu, že horní a spodní vrstva dál poskytuje pouze citelné teplo k celkovému množství tepla systému akumulace energie. K řešení tohoto problému může být provedena chemická modifikace hydrátu soli přidáním vhodných aditiv nebo zahušťování materiálu. Další nevýhodou hydrátů solí je významné podchlazení, dané jejich špatnou nukleační schopností, pro jejíž zamezení se používají nukleační činidla. [18], [28]

Níže je uvedena tabulka Tab. 4.5 termofyzikálních vlastností vybraných zástupců.

Materiály	Bod tání [°C]	Latentní teplo [kJ/kg]	Hustota (solid) [kg/m ³]
KF·4H ₂ O	18,5	231	1 455 (18 °C)
CaCl ₂ ·6H ₂ O	29,7	171	1 710 (25 °C)
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32,4	254	1 485
Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	35,0	281	1 520
Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	36,4	147	2 065 (14 °C)
Ba(OH) ₂ ·8H ₂ O	78,0	267	2 180

Tab. 4.5. Termofyzikální vlastnosti solných hydrátů [11]

4.3.2 Roztavené soli

Roztavené soli jsou dalším druhem anorganických látek používaných pro TES. Vzhledem k jejich teplotám tání (250–1 680 °C) se většinou používají pro aplikace mezi 100 až 450 °C, například pro výrobu páry za nízkých / středních teplot v potravinářském a textilním průmyslu, pro výrobu páry při vysokých teplotách v solárních elektrárnách při výrobě elektřiny. Mají vysokou hustotu skladování energie a většinou nízkou cenu. Obecně lze roztavené soli rozdělit na fluoridy, chloridy, dusičnany, uhličitany a sírany. Dusičnany, které mají nejnižší teplotu tání, jsou nejčastěji používanými PCM pro systémy pracující při vysokých teplotách, rozkládají se při teplotách vyšších než 550 °C. Fluoridy, které mají vyšší teplotu tepelného rozkladu, se používají v extrémních prostředích, jako je letecký a jaderný průmysl. Nevýhodou je jejich velká změna objemu během změny fází. Chloráty a sírany jsou silně leptavé látky, zejména v kapalině. Pro ně je těžké najít vhodné kontejnery nebo potrubí. Uhličitany jsou považovány za kvalitní látky pro

systémy akumulace tepelné energie, ale zároveň jejich špatné vodivé vlastnosti a vysoká viskozita omezují účinnost přenosu tepla ve srovnání s jinými roztavenými solemi. Hlavními nevýhodami solí jsou nízká tepelná vodivost (menší než 1 W/mK), velké změny objemu během fázové změny (do 25 %) a také vysoká úroveň chemické koroze na kovových materiálech úložných nádob. [12], [24]

Materiály	Bod tání [°C]	Latentní teplo [kJ/kg]
NaNO ₃ -KNO ₃ (46–54 %)	222	100
NaOH-NaNO ₃ (28–72 %)	247	247
NaOH-NaNO ₃ (81,5–18,5 %)	257	258
NaCl-KCl-MgCl ₂ (33,0–21,6–45,4%)	385	234
MgCl ₂	367	453
NaCl	800	483

Tab. 4.6. Termofyzikální vlastnosti soli [12]

4.3.3 Kovy a slitiny kovů

Kovy a slitiny jsou nejméně populární skupinou ze dnes používaných PCM (v důsledku vysoké ceny, velké hmotnosti a malého množství provedených experimentů). Hlavními důvody k použití kovových látek jsou vysoká tepelná vodivost, která o několik stovek převyšuje hodnoty vodivosti jiných látek. Tepelná kapacita slitin je přibližně stejná jako kapacita roztavené soli, ale díky své hustotě mají slitiny vysokou kapacitu skladování energie na jednotku objemu, proto jsou většinou uvažovány v určitých aplikacích, kde je důležitá kompaktnost skladování. Kovové látky mají vysokou teplotu tání a většinou se používají pro aplikace s teplotou nad 500 °C. Mají nízkou objemovou expanzi do 0,7 %, kterou dokonce lze ještě zmenšit legováním. Další vlastností je dobrá tepelná stabilita pro cyklické přeměny. Kovy, které lze použít v nízkoteplotních aplikacích, jsou cesium, galium, indium, cín a bizmut, kovy pro vysokoteplotní aplikace zahrnují zinek, hořčík, hliník a jejich slitiny. Mezi nevýhody patří velká korozivnost na kovové úložné jednotky, což lze odstranit nanášením vrstvy keramiky na tyto konstrukční materiály. [12], [28], [29]

Materiály	Bod tání [°C]	Latentní teplo [kJ/kg]
Mg-Zn (46,3–53,7 %)	340	185
Zn-Al (96–4 %)	381	138
Mg-Al (34,65–65,35 %)	497	285
Al-Cu (66,92–33,08 %)	548	372
Al-Si-Cu (46,3–4,6–49,1 %)	571	406
Cu	1 084	286

Tab. 4.7. Termofyzikální vlastnosti kovů a slitin [12]

4.4 Eutektiky

Eutektické směsi vznikají složením dvou nebo více složek se shodnou změnou fází, určitou teplotou tání a schopností tvořit během krystalizace směs složeného krystalu. Rozlišujeme eutektiky se složkami organicko-organickými, organicko-anorganickými a anorganicko-anorganickými. Hlavní výhodou eutektických směsí je to, že jejich teplota fázové změny může být nastavena kombinací různých hmotnostních poměrů složek. Eutektická směs má stejný tepelný výkon jako její složky a vždy taje a tuhne bez segregace. Mohou být vyrobeny nekonečné počty různých eutektických směsí pro jakýkoli výhodný bod tání. Většina organických eutektik má teplotu tání v rozmezí 20–60 °C s latentním teplem fúze 150–200 kJ/kg. Anorganická eutektika vyvinutá z hexahydrátu chloridu vápenatého má teplotu tání shodnou s organickými blízko 20 °C a latentní teplo pod 150 kJ/kg. Ze všech eutektik, eutektiky vyvinuté z methylstearátu a methylpalmitátu mají nejvyšší latentní teplo. Co se týče termofyzikálních vlastností eutektik, jsou k dispozici pouze omezené údaje, protože použití těchto materiálů je pro aplikace tepelného skladování docela nové. Níže v tabulce jsou uvedeny vybrané zástupce. Hlavním problémem těchto sloučenin jsou náklady, které jsou dvakrát nebo třikrát vyšší než u organických nebo anorganických dříve popsaných PCM. [18], [24], [29]

Materiály	Bod tání [°C]	Latentní teplo [kJ/kg]
LiCl-KCl (58–42 %)	348,0	170,0
LiF-KF (33–67 %)	493,0	458,0
LiF-NaF (60–40 %)	652,0	816,0
kyselina kaprinová-kyselina laurová (65–35 %)	18,0	148,0
kyselina laurová-kyselina stearová (82–17 %)	24,7	178,6
methylstearát-methyl palmitát (86–14 %)	23,9	220,0

Tab. 4.8. Termofyzikální vlastnosti eutektik [24], [28]

5 Konstrukční řešení úložných nádob latentních zásobníků tepla

V předchozím oddílu práce byly popsány základní skupiny používaných materiálů se změnou fáze, které jsou klíčovou částí latentního tepelného zásobníku tepla. Při výběru pracovní látky k průmyslovému využití se velký důraz klade na cenu a dostupnost této látky. Problémem je, že cenově výhodné materiály mají nízkou tepelnou vodivost, což má za následek dlouhou dobu nabíjení a vybíjení zásobníku. Tuto nevýhodu lze omezit správným konstrukčním řešením tvaru nosné nádoby akumulacího média. V současné době lze najít hodně prací zabývajících se modelováním těchto výměníků.

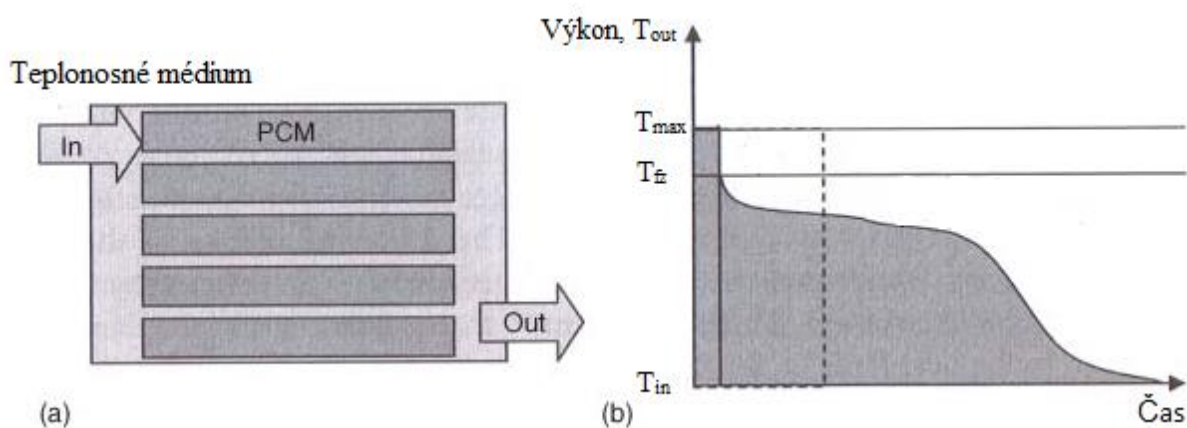
5.1 Popis základních typů konstrukce

Základní čtyři modely byly popsány v práci vědců Mehling, H. a Cabeza, L. F. [31]. Konstrukční principy zásobníků jsou uvedeny níže na Obr. 5.1 – Obr. 5.4, na nichž je v levé části

vyznačeno schéma výměníku a v pravé části je grafika závislosti celkového výkonu systému na čase. Přerušovanou čarou je označen výkon při uvažování akumulace jenom citelného tepla teplotnosnou látkou.

1) První typ – tepelný výměník – Obr. 5.1

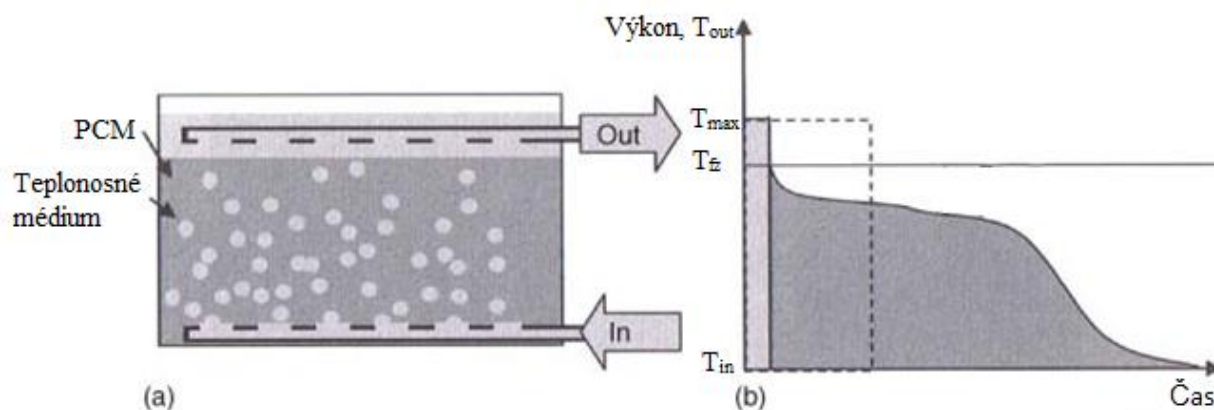
Podobný princip práce jako u obyčejných tepelných výměníků. Skrz nádrž, v níž jsou rovnoměrně rozložené trubice naplněné materiálem PCM, proudí přenosové médium. Vlastnostmi tohoto výměníku jsou vysoká hustota skladování energie (danou tím že PCM materiál vyplňuje 95 % objemu nádoby), velmi vysoký výkon na začátku a vysoký až střední výkon potom, při správné konstrukci zásobníku. Na Obr. 5.1b je ukázán graf přenosu uložené tepelné energie do teplotnosné tekutiny (to znamená vybití zásobníku). Šedou plochou je označena hodnota integrálu z výkonu v závislosti na čase, který se rovná odebranému teplu a následně i uloženému teplu při zanedbávání tepelných ztrát. Na začátku děje je přehřátá tekutina, která má zároveň maximální teplotu, opustí zásobník a do vstupu zásobníku vtéká chladná voda; chladná tekutina odebírá citelné teplo PCM materiálu a na grafu je zřejmý rychlý pokles teploty až do teploty fázové změny materiálu. Poté pokles teploty materiálu PCM zpomaluje a trvá až do úplného vybíjení a tuhnutí látky. Nelineární závislost ochlazování na čase je dána proměnným tepelným odporem tuhnoucí látky, který se dá řídit návrhem zásobníku. [31]



Obr. 5.1. Princip práce a celkový výkon zásobníku tepla typu výměník tepla [31]

2) Druhý typ – přímý kontakt média – Obr. 5.2

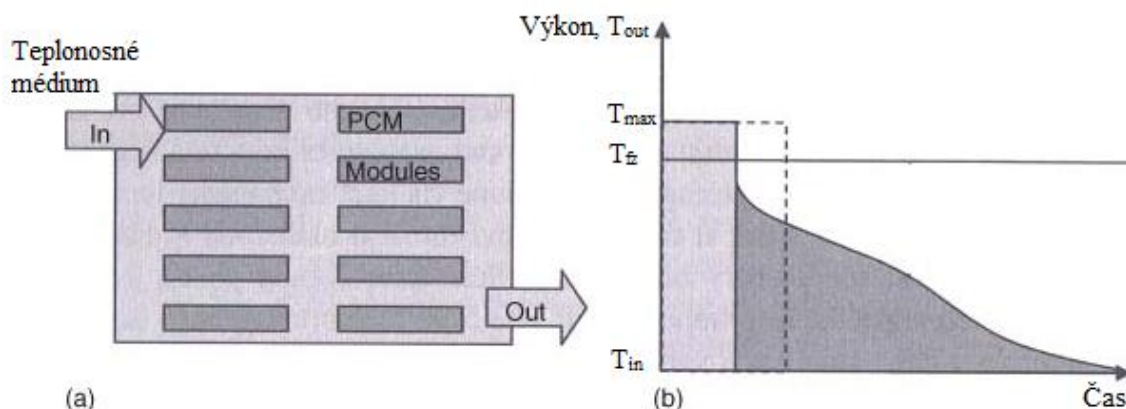
Přenosové médium je v přímém kontaktu s PCM látkou. Pro správné fungování musí mít materiály odlišnou hustotu a být nemísitelnými, aby bubliny přenosového média mohly klesat nebo se vznášet uvnitř PCM při jejich ohřívání nebo tuhnutí. Na cestě vzhůru kapičky teplotnosné tekutiny předávají své teplo do PCM materiálu a zároveň promíchávají celou vrstvu, tím urychlují tepelnou výměnu. Výhodami jsou vysoká hustota ukládání tepelného média, která je dána 90% obsahem latentního materiálu, vysoký až střední výkon daný přímým kontaktem média a nucenou konvekcí. Při návrhu tepelné výměny tímto způsobem je nutno dávat pozor na hodně parametrů, jako jsou viskozita a hustota PCM a také závislost hustoty teplotnosné tekutiny na teplotě. Dále je také důležitá velikost bublin, ve kterých se tekutina nachází, která je následně závislá na povrchovém napětí daného kombinací parametrů PCM a teplotnosného média. Tím vzniká velice složitý model pro návrh. Problémem je také najít vhodný materiál pro funkci transportu teploty. [31]



Obr. 5.2. Princip práce a celkový výkon zásobníku tepla s přímým kontaktem média [31]

3) Třetí typ – modulární – Obr. 5.3

Tento typ výměníku je obdobný prvnímu typu – tepelnému výměníku, s rozdílem zapouzdření PCM do makrokapsle – modulů. V tomto případě se problém zapouzdření PCM látky a zamezení škodlivých vlastností, jako jsou změna objemu při změně fáze a určení vhodné geometrie pro výměnu tepla, přesouvá k výrobcí. Výhodou této metody je možnost výroby flexibilní konstrukce celkového zásobníku a je vhodnější pro sériovou výrobu. Nejčastěji se používají kulové moduly v důsledku jejich samouspořádání při obsazování nádoby. V případě stejných modulů – sfér – maximální podíl PCM látky je 74 % objemu úložiště. Tento typ zásobníků má menší hustotu naplnění akumulací látkou než předchozí typy, avšak je levnější na výrobu. Na grafu lze vidět, že účinnost po dosažení teploty fázové přeměny je menší než v předchozích případech, avšak lze jí docílit velkého výkonu při výběru obdobné geometrie modulu jako u trubice v případě zásobníku typu výměník. [31]

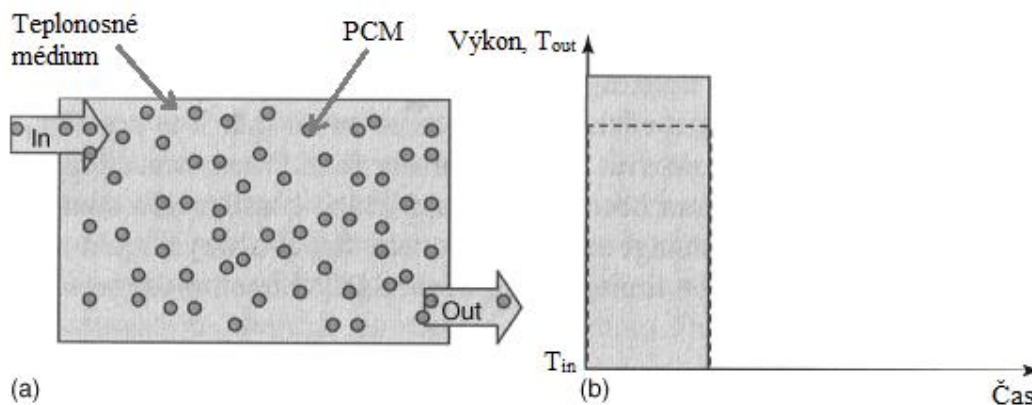


Obr. 5.3. Princip práce a celkový výkon zásobníku tepla modulárního typu [31]

4) Čtvrtý typ – suspenze – Obr. 5.4

Částice PCM jsou zabalené do mikrokapsle a jsou tak malé, že se akumulací média a teplosměnná média stávají jednou tekutinou obsahující dvě složky, kde jedna nese funkce akumulátoru tepelné energie a druhá zajišťuje vlastnosti tekutiny. Výhodou tohoto způsobu je zvětšení teplosměnné plochy v porovnání se stejným objemem PCM s makrokapslemi. Značnou výhodou je možnost přepravovat toto médium pomocí potrubí, které může rovnou nést i funkci zásobníku. Na grafu níže je uvedena závislost výkonu na čase a je patrna větší schopnost akumulace tepla při použití smíšeného média, než při použití čistě teplosměnné tekutiny

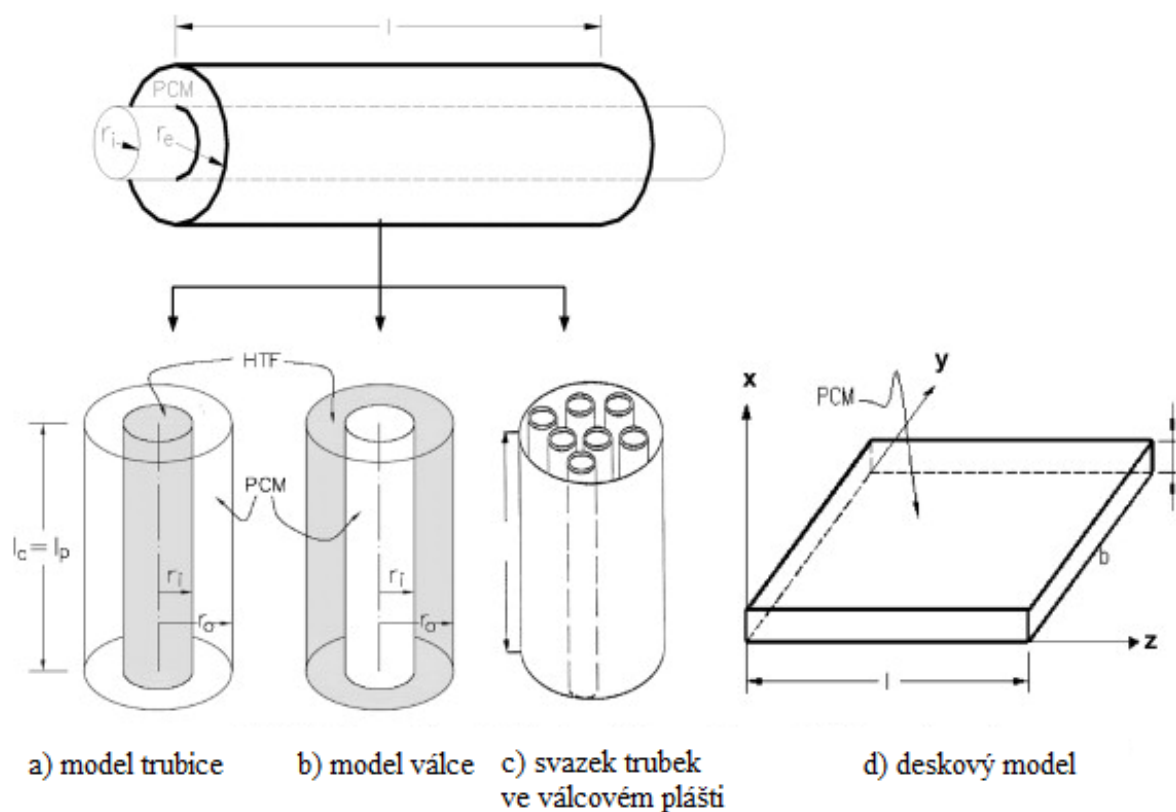
akumulující jen citelné teplo, avšak menší než u výše uvedených typů zásobníků. Výstupní teplota je stejná pro akumulace jak jen citelného, tak i zároveň citelného a latentního tepla, avšak výkon je ve druhém případě větší. Hlavním problémem je různá hustota látek, což může vést k tvorbě různých vrstev a přivádět k zácpě v potrubí. Otázkou je zjištění viskozity celé tekutiny. [31]



Obr. 5.4. Princip práce a celkový výkon zásobníku tepla typu suspenze s fázovou změnou [31]

5.2 Zásobník tepla typu výměník

Dále upneme naši pozornost na zásobník tepla typu výměník. Podle literatury nejběžnější formou úložných nádob jsou pravoúhlé a válcové konstrukce. Správně zvolená geometrie úložného kontejneru má přímý vliv na dobu tavení a výkon zásobníku. Na obr. Obr. 5.5 převzatého z [32] jsou schémata základních konstrukcí. Na obrázku 5.5a je trubkový model, kde uvnitř centrální trubky proudí teplonosná tekutina, kolem ní v prstencovém okolí se nachází PCM látka. Na obrázku 5.5b je ukázán cylindrický model fungující s opačným principem, kde se PCM látka nachází uvnitř centrální trubice, kolem níž proudí tekutina. Na obrázku 5.5c je model výměníku s mnoha trubicemi zaplněnými akumulující látkou, v jejichž okolí proudí tekutina. Na obrázku 5.5d je ukázka deskového kontejneru, který je zcela vyplněn PCM, k jehož stěnám se přivádí / odvádí teplo.

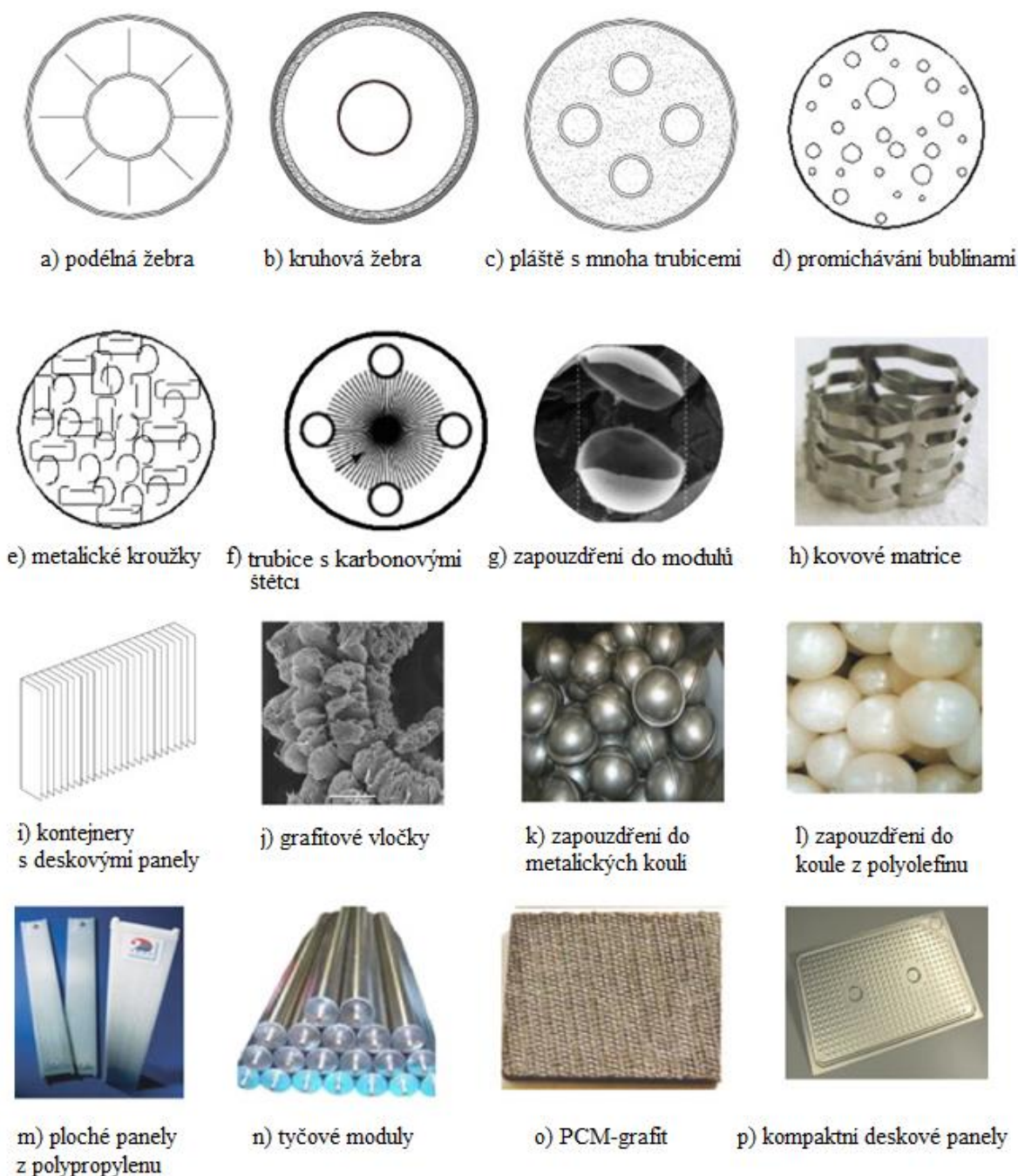


Obr. 5.5. Klasifikace běžně používaných kontejnerů PCM z hlediska geometrie a konfigurace [32]

Nejběžnější formou podle většiny vědeckých článků je systém shell and tube – trubice v skořepině. Podle prací [33], kde byly porovnány základní charakteristiky válcových systémů typů trubice a válec na obrázcích (a) a (b), kratší doba tání byla v případě cylindrického modelu, kde je materiálem PCM vyplněno mezikruží, a teplotná tekutina protéká vnitřní trubicí. Kromě toho je zjištěno, že tento model má nižší míru tepelné ztráty do okolí, protože většina tepla dodávaného ze středu zahřívá PCM [32]. V další práci [34] bylo provedeno porovnání modelu typu trubice s modelem typu skořepiny s mnoha trubicemi. Model s mnoha trubicemi obsahoval 4 trubice naplněné erythritolem s teplotou tání $117,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. V práci byly porovnány teplotní gradienty obou systémů v závislosti na čase ve třech směrech, a to axiálním, radiálním a úhlovém. Největší nárůst teploty byl pozorován v radiálním směru. Dále po době 300 min v modelu s trubicí a po 100 minutách v modelu s mnoha trubicemi byl zpozorován prudký nárůst teplotního gradientu v úhlovém směru, který naznačil začátek přirozené konvekce. Gradient v axiálním směru pro oba typy trubic měl hodnotu totožnou s 2,5 a 3,5 % hodnoty teplotního gradientu zaznamenaného v radiálním směru, což v podstatě lze zanedbat a vyhodnotit jen dvourozměrný přenos tepla v obou systémech. V práci také bylo vyhodnoceno, že v systému skořepin a trubic dominuje účinek vícenásobného konvekčního přenosu tepla ve srovnání s vodivým přenosem tepla v trubkovém modelu, což vysvětluje rychlejší tavení materiálu [32].

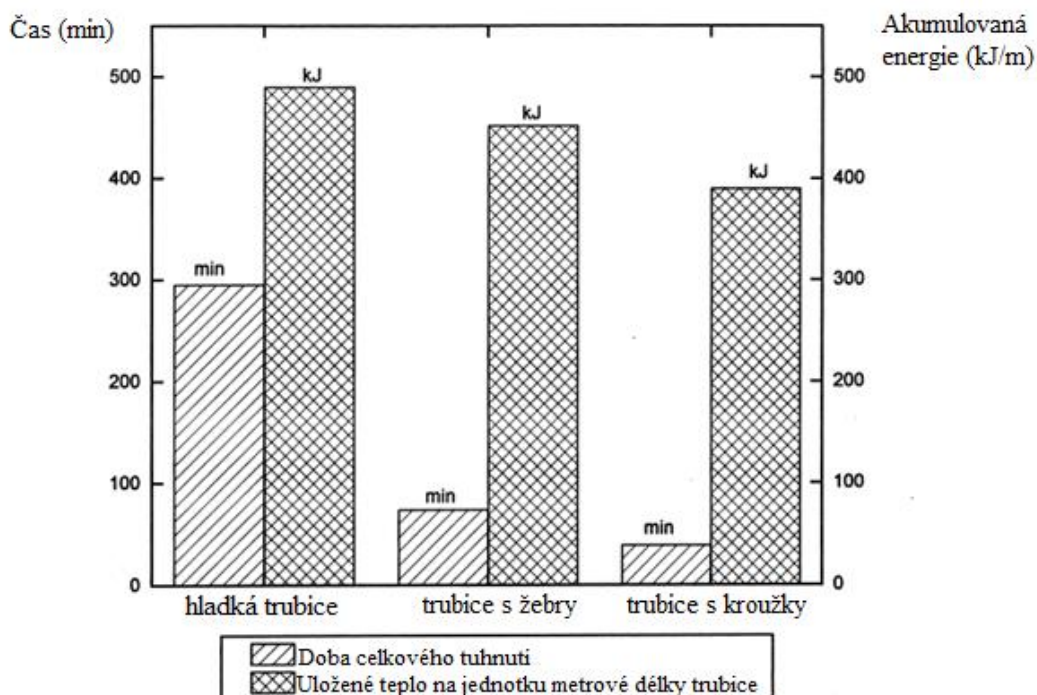
5.3 Způsoby zlepšení vodivosti materiálu

Kromě celkové geometrie zásobníku lze upravovat vnitřek úložných nádob pro zvýšení tepelné vodivosti akumulčních materiálů. Dnes už existuje velké množství způsobů zvýšení tepelné vodivosti materiálu. Na obrázku níže, převzatém z [32], jsou představeny příklady zlepšovacích konstrukcí úložné nádoby navrhnuté a studované různými autory. Jedná se zejména o trubky s různými konfiguracemi žebor, promícháváním bublinami, vložením kovových matic, použitím mikrokapsulového zapouzdření PCM a využitím vysoce vodivých částic ve vrstvě materiálu. Ale z pohledu definování optimální metody není vhodné dané konstrukce porovnávat z důvodu různých podmínek modelování zásobníku, jako jsou různé akumulční materiály, různé teploty tání a různá teplotnosná média [32].



Obr. 5.6. Způsoby zlepšení vodivosti materiálu [32]

Avšak existuje několik prací, ve kterých jsou některé z těchto metod porovnány při stejných podmínkách. Například je práce [35], kde jsou porovnány čas tuhnutí a teplo, které může být uloženo v zásobníku klasifikovaného různou vnitřní konstrukcí, a to za použití podélných žebër a Lessingova prstence v trubici naplněné voskem. Výsledek této práce je zobrazen na Obr. 5.7, kde je jasně vidět značné zmenšení doby tuhnutí materiálu při malém snížení množství uložené energie u obou způsobů zlepšení konstrukce. Zmenšení množství uložené energie bylo vyvoláno zmenšením objemu akumulací látky v důsledku obsaženého místa zapouzdřením konstrukčního materiálu (žebra obsazují 7 % objemu nádoby, metalické kroužky obsazují 20 % objemu nádoby [35]).



Obr. 5.7. Porovnání celkové doby tuhnutí a celkového množství tepla, které může být uloženo pro různé konfigurace [35]

Dále jsou v práci [36] porovnány 3 typy konstrukce, a to trubice válcového typu, konstrukce s podélnými žebry a konstrukce s kruhovými žebry. Výsledkem práce byly výraznější výhody konstrukce s podélnými žebry. K úplnému roztavení došlo za 8 hodin za použití této konstrukce, kdežto u jiných konstrukcí nedošlo k úplnému roztavení materiálu za 10 hodin. Hlavní porovnávací charakteristiky ukazuje tabulka Tab. 5.1:

Charakteristiky	Válcová trubice	Trubice s kruhovými žebry	Trubice s podélnými žebry
Kumulativní nabitá energie (kJ)	9 035,0	10 418,2	12 429,2
Kumulativní ztracená energie (kJ)	475,3	583,0	670,0
Účinnost nabíjení (%)	94,7	94,4	94,6
Kumulativní vybitá energie (kJ)	4 977,8	7 293,1	8 813,1
Úložná kapacita celkového účtovaného množství (%)	55,0	70,0	70,9

Tab. 5.1. Porovnání charakteristik pro tři typy zásobníku tepla [36]

Závěrem lze uvést, že skoro každým konstrukčním řešením zlepšení konstrukce zásobníku lze docílit až násobného zvětšení hodnoty součinitelů tepelné vodivosti a tím zvětšit rychlost nabíjení / vybíjení systému a jeho celkovou účinnost.

6 Modelování tavení materiálů

Další kapitoly této práce budou věnovány modelování dějů probíhajících v látce při jejím ohřívání a následném tání. Budou popsány základní zákony, které se používají při modelování tohoto modelu. Praktická část bude vypracována v komerčním softwaru Ansys Fluent a pro stanovení správnosti modelu budou výsledky porovnány s grafy získanými z vědeckých prací.

6.1 Volná konvekce

Na počátku modelování tavení materiálu musíme pochopit základní fyzikální principy, kterými jsou řízeny jevy probíhající při ohřátí materiálu. Podle fyzikálních zákonů při nehomogenním ohřátí plynu nebo kapaliny vzniká v látce volná konvekce.

Probereme volnou konvekci tenké vrstvy tekutiny nad ohřátým horizontálním povrchem. Tento děj prokazuje v tepelně nevyváženém tekutém médiu tvorbu vlastních organizačních struktur – buněk. Na počátku 20. století byl tento děj experimentálně popsán v pracích Benarda, poté v roce 1916 Rayleigh teoreticky vysvětlil vznik buněk nestabilitou, jejíž příčinou je působení vztlakové síly na ohřátou kapalinu, která se nachází u ohřívajícího povrchu. K tomu stanovil bezrozměrové podobnostní číslo, které definuje režim toku tekutiny – laminární nebo turbulentní, a její schopnost k volné konvekci:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T d^3}{\nu\alpha}, \quad (6.1)$$

kde g – tíhové zrychlení, β – součinitel objemové roztažnosti, d – tloušťka vrstvy kapaliny, α – součinitel teplotní vodivosti, ν – kinematická viskozita. Toto podobnostní číslo lze popsat jako koeficient splnění podmínky $\frac{\beta T' \rho l^4 g}{\nu \alpha d} \gg 1$, která je rozepsanou nerovností pro čas $\tau_T \geq \tau$, kde τ_T – je čas, za který se teplota vybraného pohyblivého elementu vyrovná s teplotou celé tekutiny, τ – je čas pohybu elementu ve směru vztlakové síly do horní části vrstvy tekutiny. Čas τ_T je přímo úměrný podílu čtverce charakteristické délky elementu k součiniteli teplotní vodivosti $\tau_T \sim l^2/\alpha$, vyjádřené pomocí rovnice vedení tepla $\frac{\partial T'}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T'$, v níž T' – je rozdíl teploty elementu a okolí. Pro čas τ platí poměr $\tau \sim d/V \sim \nu d / (T' \beta \rho l^2 g)$, kde rychlost V je výsledkem porovnání vztlakové síly podle Archimedova zákona $F_{vz} \sim \beta T' \rho l^3 g$ a odporové síly podle Stokesova zákona $F_{od} \sim \rho \nu l V$. Kromě toho uvažujeme, že charakteristický rozměr l elementu odpovídá tloušťce vrstvy tekutiny d . [37]

Pro lepší představu samotného jevu předpokládejme konstantní teploty na povrchu a dně tekutiny. Při malém rozdílu teplot, teplo je přenašeno vedením a tekutina zůstává v klidu. Když teplotní gradient dosáhne své kritické hodnoty, tekutina se začne makroskopicky pohybovat. To probíhá v důsledku změny hustoty s teplotou v tíhovém poli. Ohřáté oblasti tekutiny se rozšiřují, tím zmenšují svou hustotu a pohybují se směrem vzhůru, tam vychladnou a znovu klesají na dno.

Tento pohyb je přesně uspořádan, lze pozorovat tvary válce nebo šestiúhelníky. Když se teplotní gradient dále zvyšuje, objevují se nové jevy a ve válcích začíná vlnitý pohyb podél jejich os. [39]

Cílem následující úlohy je modelování této Benardovy-Rayleighove konvekce ve dvourozměrném případě. Při definování základních rovnic uvažujeme Boussinesgovu aproximaci, kde je hustota tekutiny závislá jen na teplotě se zanedbáváním vlivu tlaku $\rho(T) = \rho_0(1 - \beta\theta)$. Pro tuto aproximaci mají hlavní rovnice mechaniky tekutin tvar, převzaty z [40] a [41]:

- 1) Navier-Stokesova rovnice

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \nu \Delta \vec{v} - \beta \theta \vec{g}, \quad (6.2)$$

- 2) Rovnice vedení tepla

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \theta = \alpha \Delta \theta; \quad (6.3)$$

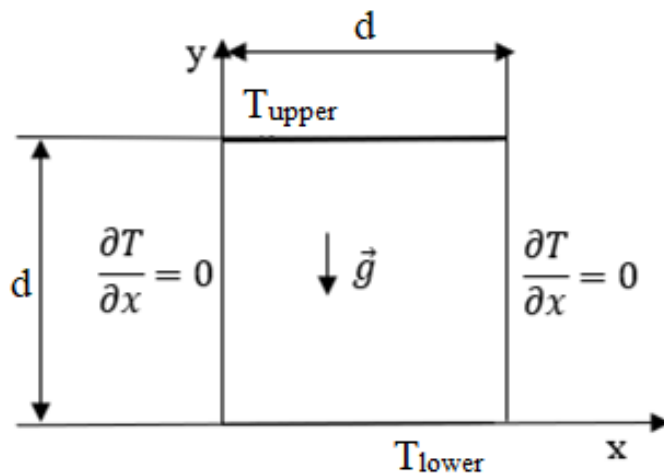
- 3) Rovnice kontinuity

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0, \quad (6.4)$$

kde \vec{v} – rychlost tekutiny, g – tíhové zrychlení, β – součinitel objemové roztažnosti, α – součinitel teplotní vodivosti, ν – kinematická viskozita, θ – rozdíl teplot ($T - T_0$).

Zvolený model představuje čtvercovou plochu vyplněnou tekutinou s konstantní teplotou ohřivaným dnem a s konstantní teplotou ochlazeným horním povrchem. Uvažovanou látkou je vzduch s Prandtlovým číslem 0,71. Modelování se provádí pro Rayleighovo číslo v rozsahu $1 \cdot 10^4$ až $1 \cdot 10^6$.

Na obrázku Obr. 6.1 je uvedeno schéma modelu, který byl použit pro přípravu výpočtu v simulačním komerčním softwaru.



Obr. 6.1. Schéma modelu

Návrh vycházel z předem stanovených Rayleighových čísel $1 \cdot 10^4$, $1 \cdot 10^5$, $1 \cdot 10^6$. Pro tato čísla bylo nutno spočítat tloušťky vrstvy tekutiny. K tomu byl použit vzorec číslo (6.5) vyjádřený z definice Rayleighova čísla (6.1). Ostatní hodnoty potřebné k výpočtu jsou představeny v tabulce číslo Tab. 6.1. Tyto parametry byly stanoveny pro vzduch při teplotě 20 °C.

$$d = \sqrt[3]{\frac{\nu \alpha Ra}{g \beta \Delta T}}, \quad (6.5)$$

kde g – tíhové zrychlení, β – součinitel objemové roztažnosti, d – tloušťka vrstvy kapaliny α – součinitel teplotní vodivosti, ν – kinematická viskozita.

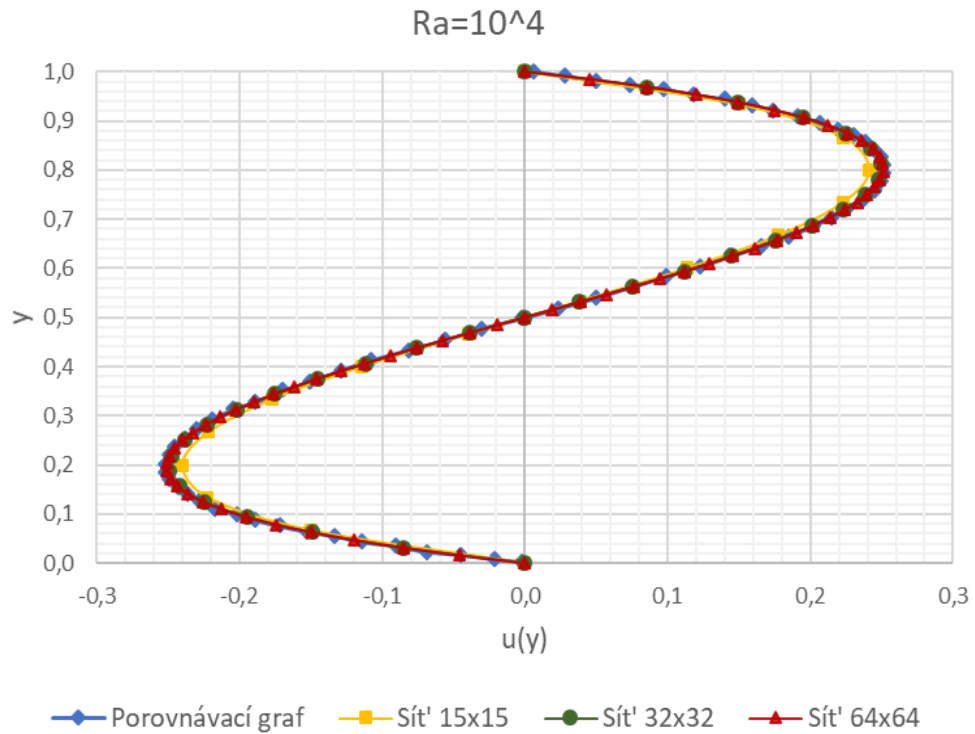
N _o	Ra	ν [m ² /s]	g [m/s ²]	k [W/mK]	β [1/K]	ΔT [K]	α [m ² /s]	d [m]
1	$1 \cdot 10^4$	$1,516 \cdot 10^{-5}$	9,81	$2,514 \cdot 10^{-2}$	$3,43 \cdot 10^{-3}$	70	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
2	$1 \cdot 10^5$	$1,516 \cdot 10^{-5}$	9,81	$2,514 \cdot 10^{-2}$	$3,43 \cdot 10^{-3}$	70	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$
3	$1 \cdot 10^6$	$1,516 \cdot 10^{-5}$	9,81	$2,514 \cdot 10^{-2}$	$3,43 \cdot 10^{-3}$	70	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$

Tab. 6.1. Fyzikální vlastnosti vzduchu při teplotě 20 °C

Při nastavení parametrů výpočtu byla zapnuta energetická rovnice a laminární proudění tekutiny s uvažovaným tíhovým zrychlením. Pro numerická výpočtová schémata byla použita výchozí schémata softwaru s ohledem na jednoduchou geometrii, to znamená spojení tlaku a rychlosti schématem Simple, metoda nejmenších čtverců pro výpočet gradientu, standardní schéma pro výpočet tlaku a Upwind druhého řádu pro rovnice energie a pohybové rovnice, které byly pro konvergenci daného výpočtu postačujícími. Při modelování vzduchu byla pro hustotu nastavena Bussinesqova aproximace, pro okrajové podmínky platí nastavení nulového přenosu tepla pro levou a pravou hranici čtverce, horní teplota je nastavena na konstantní hodnotu $T_{upper} = 230$ K, dolní teplota je taky konstantní $T_{lower} = 300$ K.

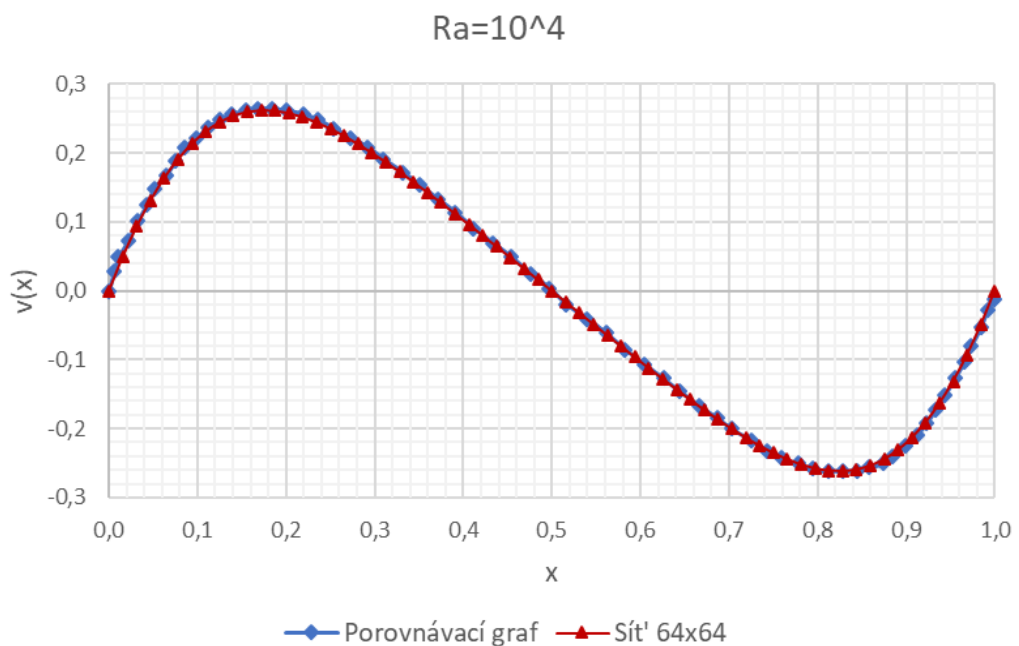
Pro ověření správnosti nastavení výpočtů byly porovnány výstupní hodnoty vodorovné a vertikální rychlosti $u(y)$ a $v(x)$, které byly určeny pro středovou souřadnici $x = 0,5$ a $y = 0,5$ s referenčním grafem uvedeným v práci [42]. Graf byl zkonstruován z hodnot numerického řešení matematických rovnic. Pro porovnání bylo potřebné stanovit hodnotu rychlosti bezrozměrné, k čemuž byla použita charakteristická rychlost $U_{char} = \sqrt{g\beta\Delta TL}$, odvozená pomocí poměru podobnostního Richardsonova čísla pro konvekci $Ri = \frac{Gr}{Re^2}$, polohové souřadnice byly stanovené bezrozměrně jako poměr aktuální délky k celkové délce strany uvažované čtvercové plochy d/d_{celk} .

Při modelování prvního případu pro $Ra = 1 \cdot 10^4$ a délkou strany čtverce 11 mm byly vyzkoušeny tři velikosti sítě 15×15 , 32×32 a 64×64 , aby zajistily postačující velikost pro přesnou aproximaci. Na Obr. 6.2 jsou grafy rychlostí ve směru osy x pro výše uvedené počty elementů sítě, které jsou porovnány s referenčním grafem. Blíže k okrajům plochy rychlost nabývá své maximální hodnoty. Dále lze také vidět, že počet elementů aproximace 15×15 nebyl dostačující, protože odpovídající žlutá čára se docela liší od ostatních čar popisujících změnu rychlosti tekutiny. Tvary grafu pro sítě 32×32 a 64×64 se od sebe moc neliší a dokonce docela přesně odpovídají referenčnímu grafu. Proto byla pro další aproximace zvolena síť s počtem elementů 64×64 s ohledem na další výpočet pro větší plochy.



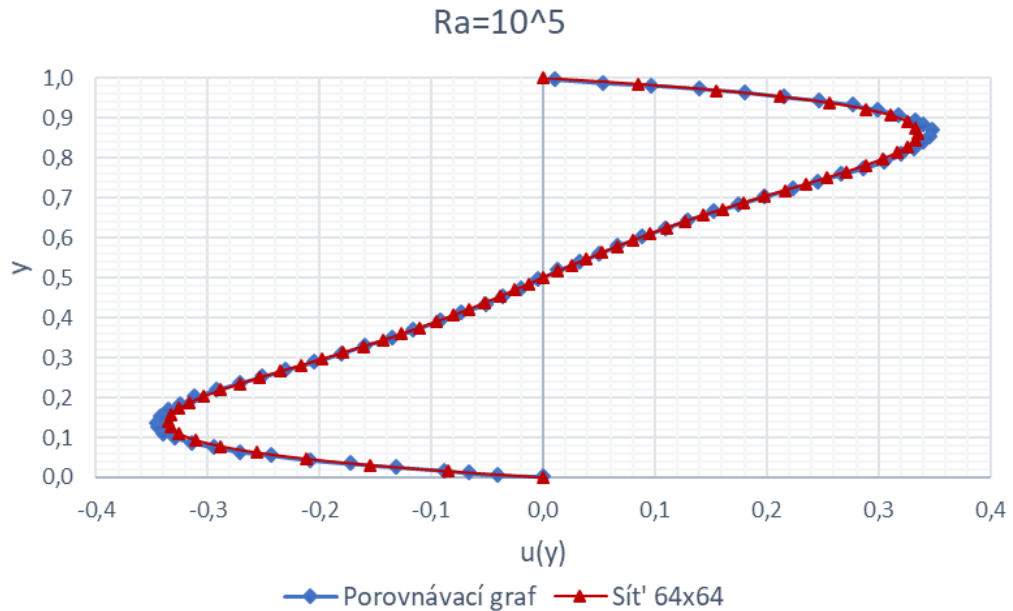
Obr. 6.2. Změna vodorovné rychlosti $u(y)$ pro $Ra = 1 \cdot 10^4$

Na následujícím obrázku jsou vyobrazeny čáry změny rychlosti ve směru y v závislosti na souřadnici x pro aproximační síť 64×64 a čára popisující referenční hodnoty. Stejně jako v předchozím grafu Obr. 6.2 je vidět, že rychlost nabývá své maximální hodnoty blíže k okrajům plochy a uprostřed čtverce se tekutina vůbec nepohybuje. Graf získaný z modelů vytvořených ve Fluentu odpovídá zvolenému referenčnímu grafu, z čehož lze usoudit, že nastavení řešiče bylo správné.

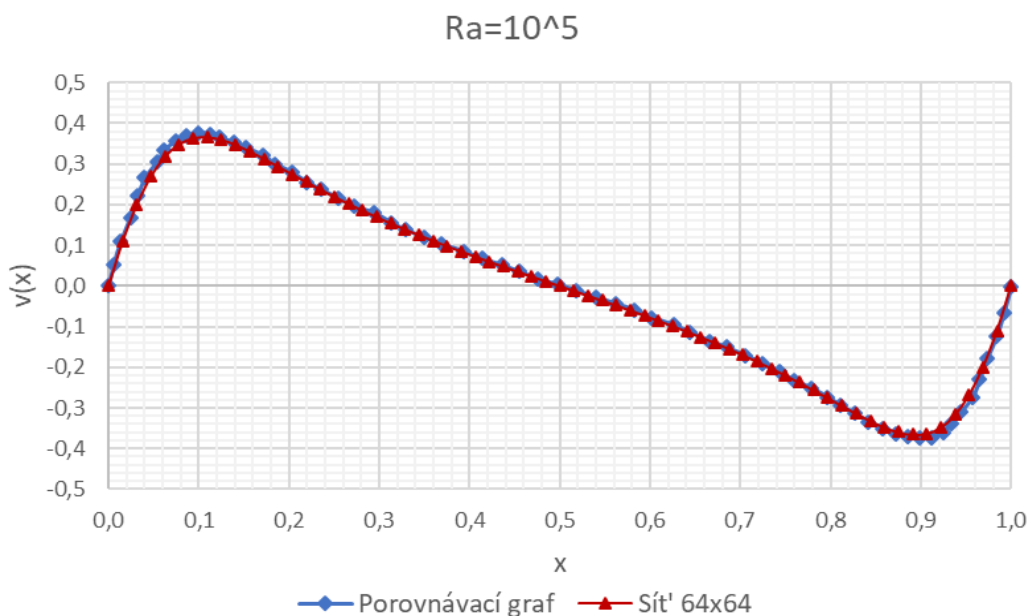


Obr. 6.3. Změna horizontální rychlosti $v(x)$ pro $Ra = 1 \cdot 10^4$

Pro další Rayleighovo číslo $Ra = 1 \cdot 10^5$ délka strany čtverce odpovídá 23 mm. K aproximačnímu výpočtu byla použita síť 64×64 . Pro porovnání s referenčními hodnotami byly nakresleny analogické grafy rychlostí, kde výsledky skoro odpovídají očekávaným hodnotám. Na grafech zobrazených na Obr. 6.4 a Obr. 6.5 lze vidět, že došlo ke zvětšení amplitudy rychlosti a posunu maximální hodnoty blíž k okrajům modelované plochy.



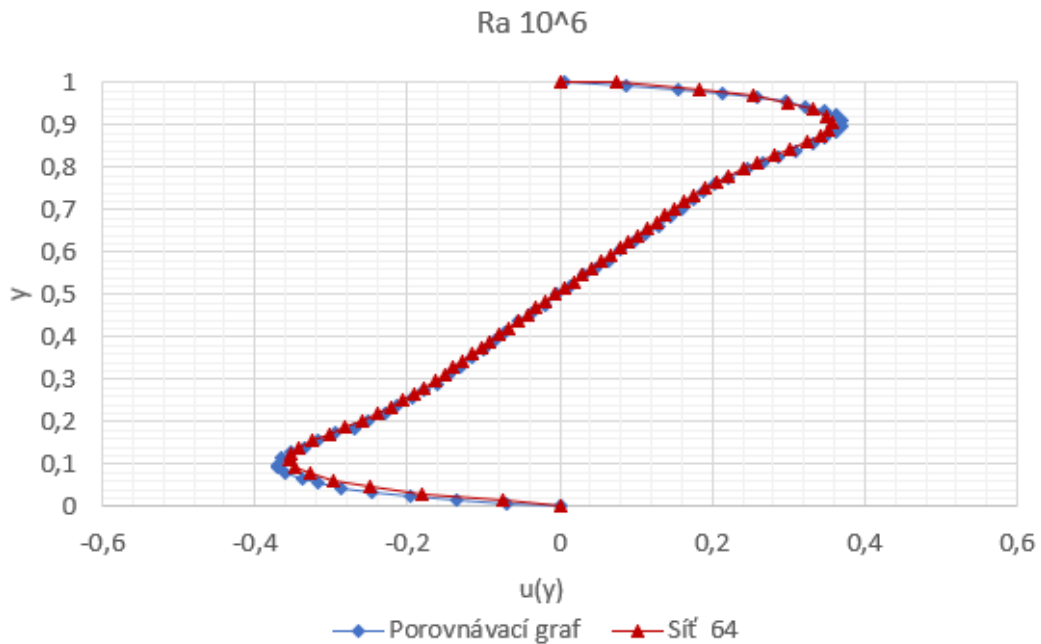
Obr. 6.4. Změna vodorovné rychlosti $u(y)$ pro $Ra = 1 \cdot 10^5$



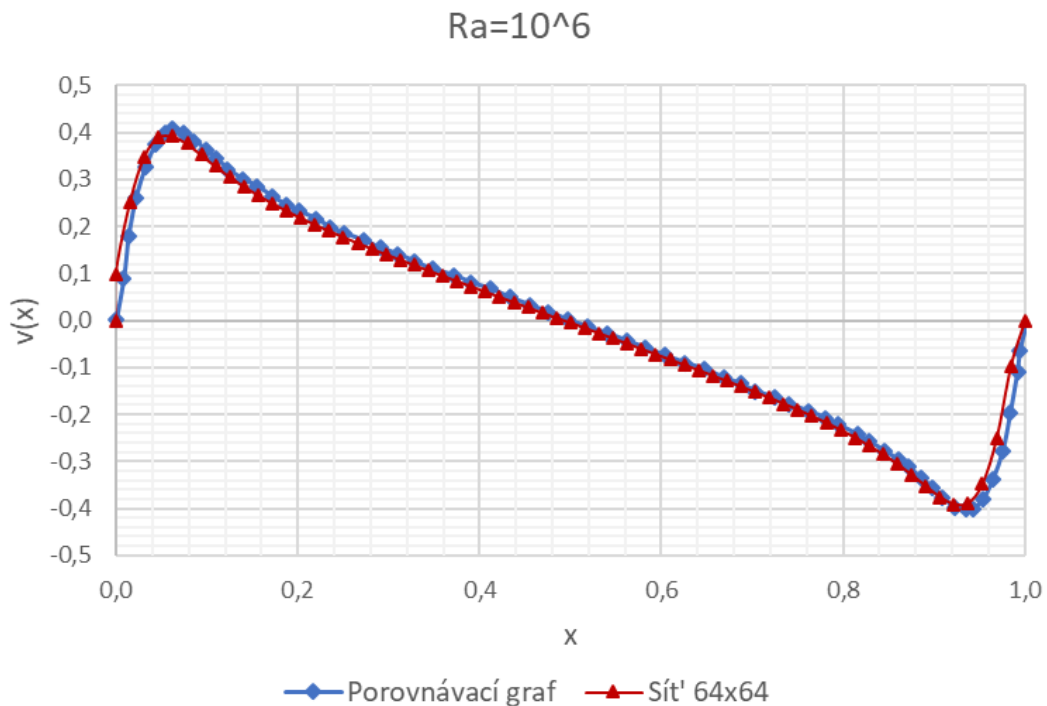
Obr. 6.5. Změna horizontální rychlosti $v(x)$ pro $Ra = 1 \cdot 10^5$

Obdobným způsobem bylo nalezeno řešení volné konvekce vzduchu pro tloušťku vrstvy 50 mm odpovídající $Ra = 1 \cdot 10^6$. Zobrazený výsledek aproximace na Obr. 6.6 a Obr. 6.7 se jen málo liší od referenčního grafu. Lze vidět, že v polovině plochy je zase nulová rychlost, také je vidět posun polohy maximální hodnoty ještě blíže k okrajům plochy. Při porovnání všech třech

modelů lze stanovit, že s rostoucím Rayleighovým číslem se zvětšuje rychlostní amplituda a zároveň poloha maximální rychlosti se posouvá k okrajům plochy, což poukazuje na nárůst vztlačové síly a vznik vírů.

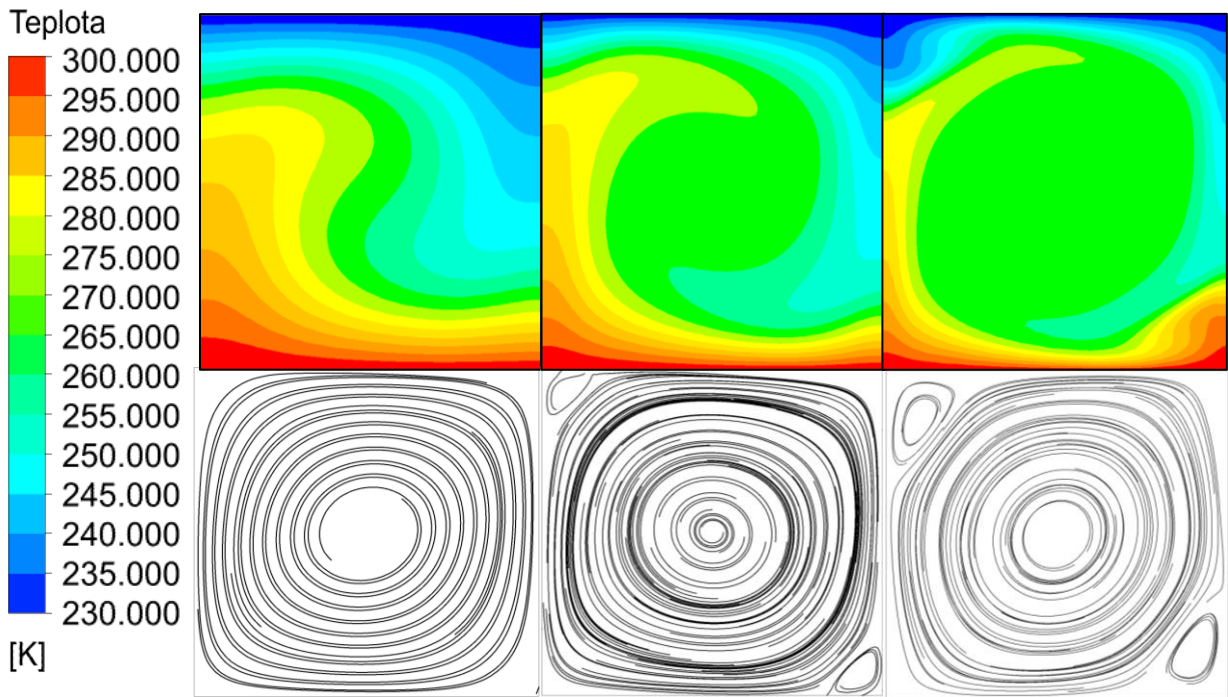


Obr. 6.6. Změna vodorovné rychlosti $u(y)$ pro $Ra = 1 \cdot 10^6$



Obr. 6.7. Změna horizontální rychlosti $v(x)$ pro $Ra = 1 \cdot 10^6$

Vznik víru jasně ukazuje následující obrázek. Na Obr. 6.8 jsou uvedeny kontury rozložení teplot a proudnice nakreslené pro různá Ra čísla. Je vidět, že s rostoucím Rayleighovým číslem se konvekční síly stávají intenzivnějšími, konkrétně s Ra rovným $1 \cdot 10^5$ začíná konvektivní pohyb tekutiny a vznikají sekundární víry, které se také zvětšují s rostoucím Ra . Taktéž je patrné, že pro $Ra = 1 \cdot 10^6$ jsou sekundární víry větší a zřetelnější.

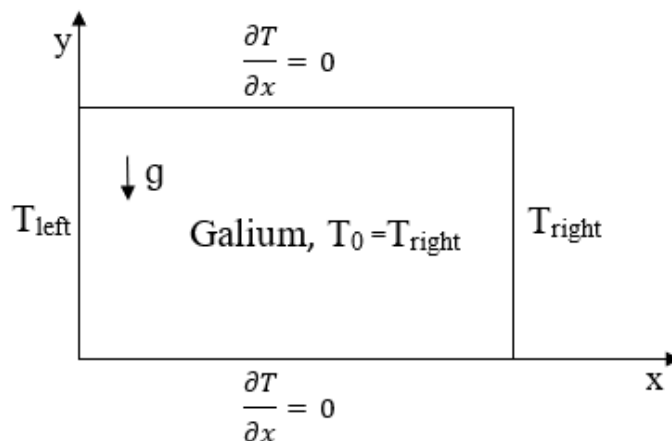


Obr. 6.8. Rozložení teplot a proudnice pro $Ra = 1 \cdot 10^4$, $Ra = 1 \cdot 10^5$, $Ra = 1 \cdot 10^6$

Jako závěr lze uvést, že čím je vyšší teplotní rozdíl a výraznější změna hustoty s teplotou, a čím je nižší viskozita a tepelná difuzivita tekutiny, tím je intenzivnější konvektivní proudění. Při modelování volné konvekce se běžně používá Boussinesqova aproximace s uvažováním tíhového zrychlení.

6.2 Tavení galia

Další úlohou je modelování fázové změny materiálu z pevného na tekutý stav. Pro studium modelu tavení byla zvolena práce Röslera, F. a Brüggemanna, D. [43], která je věnována návrhu latentního zásobníku tepla s tavením galia. Model, zobrazený na Obr. 6.9, představuje obdélníkovou plochu ($88,9 \times 63,6$) mm naplněnou galiem. Levá stěna je ohřáta na $T_{left} = 311,15$ K, pravá stěna má teplotu $T_{right} = 301,45$ K, horní a dolní stěny jsou adiabatické, počáteční teplota galia je shodná s teplotou chladnější stěny.



Obr. 6.9. Schéma modelu plochy vyplněné galiem

Výpočet je založen na energetické rovnici, kde nejdůležitější člen odpovídající fázovému přechodu je entalpie [43]:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \text{div}(\rho u h) = \text{div}(k \cdot \text{grad}T), \quad (6.6)$$

kde u – rychlost ve směru x , ρ – hustota, pro niž je platná Bussinesqova aproximace v tíhovém poli, h – měrná entalpie, k – tepelná vodivost, T – teplota.

Měrná entalpie podle obecné definice je integrálem měrné tepelné kapacity podle teploty.

$$h = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \quad (6.7)$$

Tuto skutečnost využijeme pro stanovení celkové energie potřebné k ohřátí a změně fázi materiálu za pomoci metody Efektivní tepelné kapacity:

$$c_p = \begin{cases} c_{p,solid}, & T < T_{solid} \\ \frac{L}{T_{liquid} - T_{solid}} + c_p, & T_{solid} \leq T \leq T_{liquid}, \\ c_{p,liquid}, & T > T_{liquid} \end{cases} \quad (6.8)$$

kde $c_{p,solid}$ a $c_{p,liquid}$ jsou měrné tepelné kapacity pro pevnou a tekutou fázi, které jsou v případě galia totožné a rovnají se 381,5 J/kgK, $L = 80\,160$ J/kg je měrné latentní teplo, $T_{solid} = 302,75$ K teplota pevné fáze, $T_{liquid} = 303,15$ K teplota tekuté fáze, T je aktuální teplota v kelvinech. Daná funkce byla vložena do řešiče Fluent ve formě skriptu v jazyce C jako UDF soubor, kód skriptu je znázorněn níže.

```

DEFINE_SPECIFIC_HEAT(my_user_cp, T, Tref, h, yi)
{
    real cp;
    real cpfaz;
    real Tm=(302.75+303.15)/2.;
    real Cps=381.5;
    real Cpl=381.5;
    real Ts=302.75;
    real Tl=303.15;
    L=80160;
    cpfaz = Cps+L/(Tl-Ts); /* hodnota měrné tepelné kapacity při fázovém přechodu
*/
    if (T < Ts)
    {
        cp = Cps;
        *h = cp*(T-Tref); }
    else if ((T >=Ts) && (T <= Tl))
    {
        cp=cpfaz;
        *h = Cps*(Ts-Tref)+cpfaz*(T-Ts); }
    else
    {
        cp = Cpl;
        *h = Cps*(Ts-Tref)+cpfaz*(Tl-Ts)+cp*(T-Tl); }
    return cp;
}

```

Fig. 6.1. Skript definující efektivní tepelnou kapacitu galia

Kromě vyjádření závislosti změny měrné tepelné kapacity na teplotě je nutno omezit pohyb neroztavené části galia. Toto se řeší způsobem doplnění pohybové rovnice o zdrojový člen odvozený z Carmanova-Kozeneho rovnice odporu porézního média:

$$S_p = -C \frac{(1 - \gamma)^2}{\gamma^3 + \varepsilon} v, \quad (6.9)$$

kde C je konstanta ($\cong 10^4 - 10^7 \text{ kg/m}^3\text{s}$), která se určuje porovnáním výpočtu a experimentu, v dané práci je zvolena jako $C = 1,6 \cdot 10^6$; $\varepsilon = 0,001$ konstanta, která zabraňuje dělení nulou; γ – poměr roztavené látky v materiálu, který se pro tekutou fázi rovná 1, pro pevnou 0, pro mezní stav se rovná podílu rozdílů teplot $\frac{T - T_{solid}}{T_{liquid} - T_{solid}}$. [43], [44]

Tyto podmínky byly vloženy do řešiče ve tvaru UDF-souboru v oddílu Source Terms jako zdrojový člen pro rychlosti pohybu látky ve směru x a y . Programový kód pro rychlost ve směru x ukázán na obrázku Fig. 6.2. Zcela analogicky vypadá kód pro rychlost ve směru y s drobnou změnou

- cell_x_source \rightarrow cell_y_source
- A*C_U(cell,thread) \rightarrow A*C_V(cell,thread)

```

DEFINE_SOURCE(cell_x_source, cell, thread, dS, eqn) /* omezení proudění ve směru osy x
*/
{
  real source;
  real A;
  real Y;
  real Ts=302.75;
  real Tl=303.15;
  if (C_T(cell,thread) < Ts)
    { A=-1.6*pow(10.,6.)*(pow((1.-0.),2.)/(0.+0.001)); /* výpočet konstanty odporu
pro podíl kapalně fáze Y=0 */
      source = A*C_U(cell,thread);
      dS[eqn] = A; }
  else if ((C_T(cell,thread) >= Ts) && (C_T(cell,thread) <= Tl))
    { Y= (C_T(cell, thread)-Ts)/(Tl-Ts);
      A=-1.6*pow(10.,6.)*(pow((1.-Y),2.)/(pow(Y,3.)+0.001)); /* výpočet konstanty
odporu pro podíl kapalně fáze Y = poměru teplot fázových změn */
      source = A*C_U(cell,thread);
      dS[eqn] = A; }
  else
    { Y= 1;
      A=-1.6*pow(10.,6.)*(pow((1.-Y),2.)/(pow(Y,3.)+0.001)); /* výpočet konstanty
odporu pro podíl kapalně fáze Y = 1 */
      source = A*C_U(cell,thread);
      dS[eqn] = A; }
  return source;
}

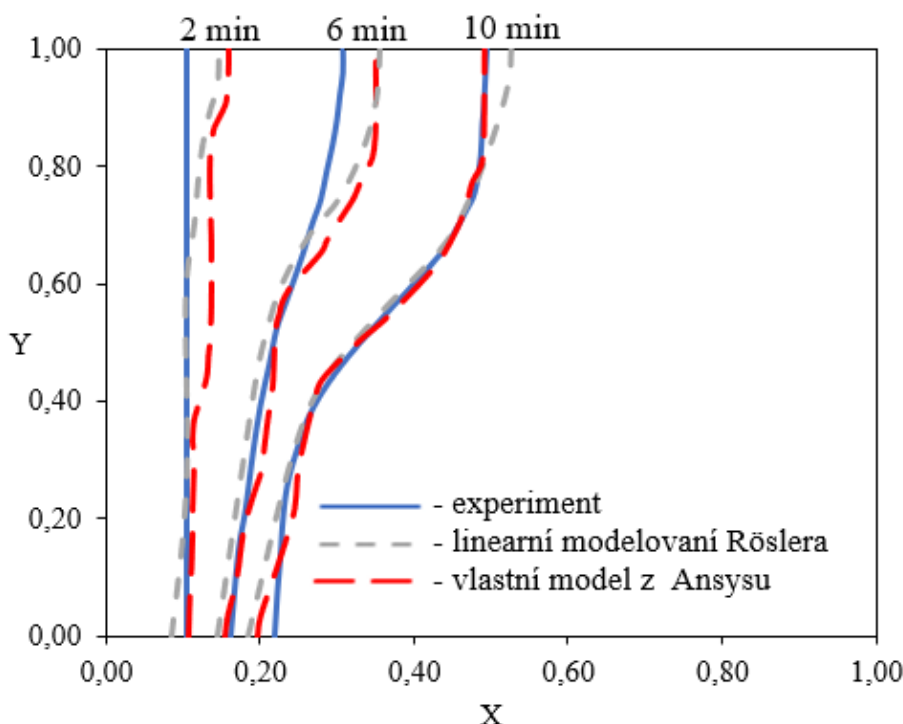
```

Fig. 6.2. Skript pro omezení proudění pevné frakce galia

V tomto případě probíhal výpočet pro nestacionární děj, byla zapnuta energetická rovnice a uvažováno laminární proudění roztaveného materiálu. Při nastavení výpočtu bylo použito

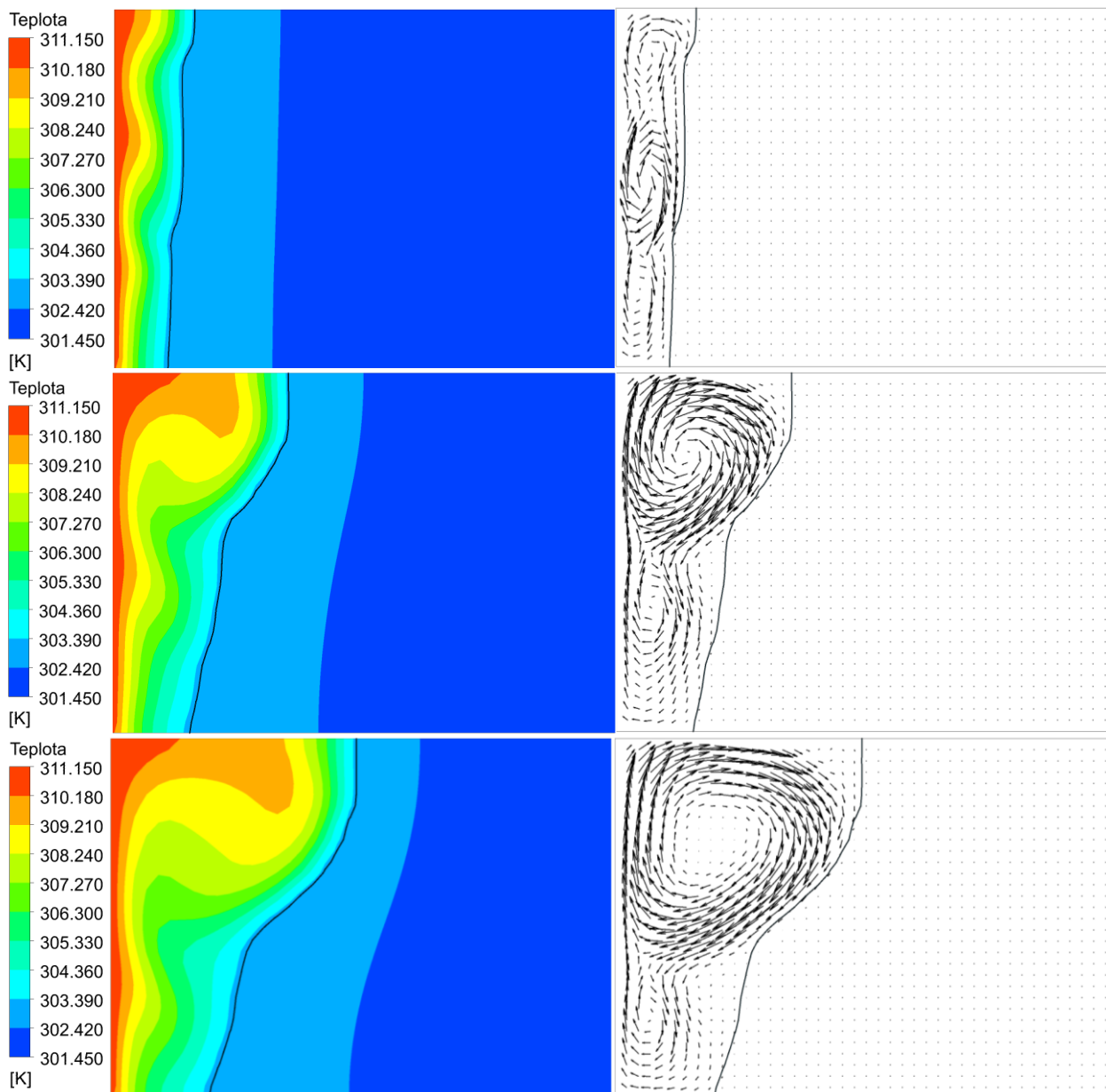
schéma spojování tlaku a rychlosti PISO, které zajišťuje rychlejší konvergenci pro neustálé toky [45]. Výpočet je založen na tlaku, a proto pro tlak byla zvolena metoda PRESTO! podle doporučení z manuálu Ansys pro modelování volné konvekce. Pro diskretizaci rovnic energie a pohybové rovnice bylo zvoleno schéma Upwind druhého řádu. Po zahájení výpočtu iterací se počítal pro časový krok 0,01 s, postupně po výpočtu několika minut výpočtu se tento krok zvyšoval do 0,5 s.

Na níže uvedeném obrázku Obr. 6.10 je vidět porovnání čáry rozhraní pevné a tekuté fáze s hodnotami stanovenými z experimentu a numerické simulaci z již zmíněné práce [43] po dobu aproximace 2, 6 a 10 minut. Výsledky docela odpovídají předpokladům. K tomu je vidět, že na začátku děje je teplo přenášeno pouze vedením (zejména podle čáry experimentu), a dál po roztavení nějaké části galia je teplo přenášeno volnou konvekcí.



Obr. 6.10. Graf porovnání simulace čáry rozhraní fází s referenčními hodnotami

Na následujícím obrázku Obr. 6.11 jsou zobrazeny kontury rozložení teploty materiálu pro doby aproximace 2, 6 a 10 minut a vektorové pole pohybu roztavené látky. Černá čára zohledňuje fázové rozhraní pevné a tekuté frakce. Je patrné, že v roztavené části materiálu vznikají víry způsobené volnou konvekcí. Teplejší částice směřují nahoru, chladnější částice kvůli rozdílu hustot směřují dolů. Lze vidět, že na začátku tavení vznikají 3 víry rotující ve směru hodinových ručiček neboli ve směru působení teplotního gradientu. V horní části plochy probíhá tavení rychleji v důsledku většího množství ohřátých částic, čím více molekul se ohřívá, tím méně z nich klesá na dno, a tak postupně narůstá horní vír, až se spojí se středním.



Obr. 6.11. Kontury rozložení teplot a vektorové pole po době výpočtu 2, 6 a 10 minutách

7 Modelování trubkového akumulátoru tepla

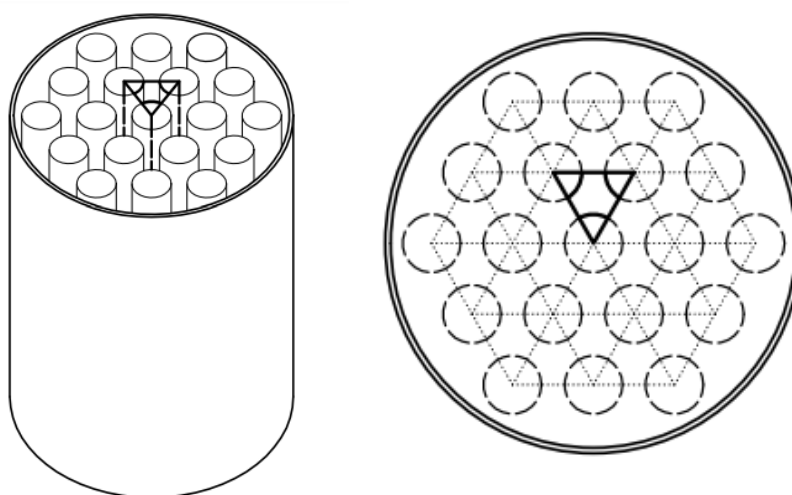
7.1 Návrh modelu

Hlavní úlohou této diplomové práce bylo modelování části tepelného zásobníku. Tvar zásobníku představuje dlouhou trubku, uvnitř které jsou zabudované tenké trubice naplněné materiálem PCM a mezi nimi proudí přenosné médium – v daném případě voda. Materiálem pro akumulaci tepelné energie byl zvolen parafín RT69HC od výrobce Rubitherm [46] s teplotou tání 69 °C a poměrně velkým latentním teplem ve srovnání s jinými parafíny a menší objemovou expanzí. Jeho vlastnosti jsou uvedeny v tabulce níže.

	Rozsah bodů tavení [°C]	Rozsah bodů tuhnutí [°C]	Tepelná akumulční kapacita [kJ/kg]	Měrná tepelná kapacita [kJ/kgK]	Tepelná vodivost [W/mK]	Objemová expanze [%]
RT69HC	68–70	69–67	230	2	0,2	10

Tab. 7.1. Vlastnosti parafínu RT69HC [46]

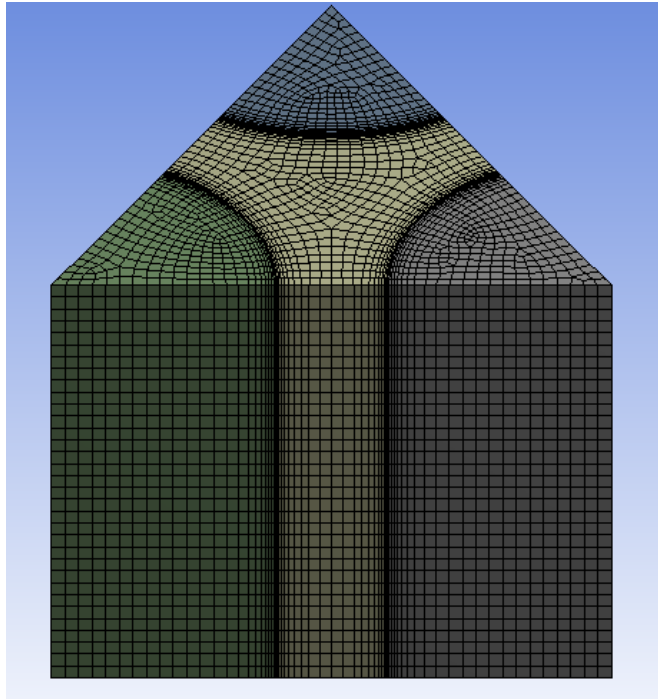
Za účelem snadného modelování a menší výpočtovou náročnost byl pro modelování zvolen řez z průřezu trubkového systému ve tvaru rovnostranného trojúhelníku, který byl následně protažen o zvolenou délku. V úhlech trojstranného hranolu jsou umístěny trubice s akumulčním médiem, mezi kterými proudí voda. Tato geometrie byla zvolena v důsledku jednoduché rekonstrukce celého systému cestou postupného skládání daných trojúhelníků. Na Obr. 7.1 je představeno schéma mnohotrubkového výměníku s označením zvoleného modelu.



Obr. 7.1. Schéma trubkového zásobníku tepla

7.2 Popis podmínek výpočtu

Při prvním modelování byla zvolena velikost délky strany trojúhelníku 35 mm, poloměr trubice 14 mm, výpočtová délka části trubice 30 mm. Při síťování byl kladen důraz na hustší síť v okolí hraničního povrchu styku trubice a vody, pro zajištění přesnějšího výpočtu mezní vrstvy. Výsledek síťování lze vidět na obrázku Obr. 7.2.



Obr. 7.2. Síťování zvoleného modelu

Řešení probíhalo v závislosti na čase. K řešení problému přenosu tepla byla zapojena energetická rovnice, výpočet probíhal v tíhovém poli za použití Boussinesqovy aproximace. Pohyb tekutin je považován za laminární. Pro stanovení měrné tepelné kapacity vosku byla použita metoda efektivní tepelné kapacity vložená do řešiče ve formě UDF souboru napsaného v jazyce C, obdobná jako při řešení případu tavení galia.

```

DEFINE_SPECIFIC_HEAT(my_user_cp, T, Tref, h, yi)
{
  real cp;
  real cpfaz;
  real Cps=1800;
  real Cpl=2400;
  real Ts=341.15;
  real Tl=343.15;
  real Tm=(Ts+Tl)/2.;
  real Cp=2000;
  real L=141600;
  cpfaz = Cps+L/(Tl-Ts); /* hodnota měrné tepelné kapacity při fázovém přechodu */
  if (T < Ts)
  {
    cp = Cps;
    *h = cp*(T-Tref); }
  else if ((T >= Ts) && (T <= Tl))
  {
    cp=cpfaz;
    *h = Cps*(Ts-Tref)+cpfaz*(T-Ts); }
  else
  {
    cp = Cpl;
    *h = Cps*(Ts-Tref)+cpfaz*(Tl-Ts)+cp*(T-Tl); }
  return cp;
}

```

Fig. 7.1. Skript definující efektivní tepelnou kapacitu pro parafín RT69HC

Stejně jako v případě řešení tavení galia, při použití modelu konvekce pro tekutou látku nutno omezit proudění pevné části materiálu, který ještě nebyl roztaven. K tomu byly taky využity UDF soubory, pro omezení proudění ve třech směrech x, y, z neboli pro rychlosti ve směrech u, v, w. Tento kód je ukázán níže pro rychlost ve směru x; pro směr y a z platí drobná změna kódu:

- cell_x_source → cell_y_source, cell_z_source,
- A*C_U(cell,thread) → A*C_V(cell,thread), A*C_W(cell,thread)

```

DEFINE_SOURCE(cell_x_source, cell, thread, dS, eqn) /* omezení proudění ve
směru osy x */
{
  real source;
  real A;
  real Y;
  real Ts=341.15;
  real Tl=343.15;
  if (C_T(cell,thread) < Ts)
  {
    A=-1.6*pow(10.,8.)*(pow((1.-0.),2.)/(0.+0.001)); /* výpočet konstanty
odporu pro podíl kapalně fáze Y=0 */
    source = A*C_U(cell,thread);
    dS[eqn] = A; }
  else if ((C_T(cell,thread) >= Ts) && (C_T(cell,thread) <= Tl))
  {
    Y= (C_T(cell, thread)-Ts)/(Tl-Ts);
    A=-1.6*pow(10.,8.)*(pow((1.-Y),2.)/(pow(Y,3.)+0.001)); /* výpočet
konstanty odporu pro podíl kapalně fáze Y = poměru teplot fázových změn */
    source = A*C_U(cell,thread);
    dS[eqn] = A; }
  else
  {
    Y= 1;
    A=-1.6*pow(10.,8.)*(pow((1.-Y),2.)/(pow(Y,3.)+0.001)); /* výpočet
konstanty odporu pro podíl kapalně fáze Y = 1 */
    source = A*C_U(cell,thread);
    dS[eqn] = A; }
  return source;
}

```

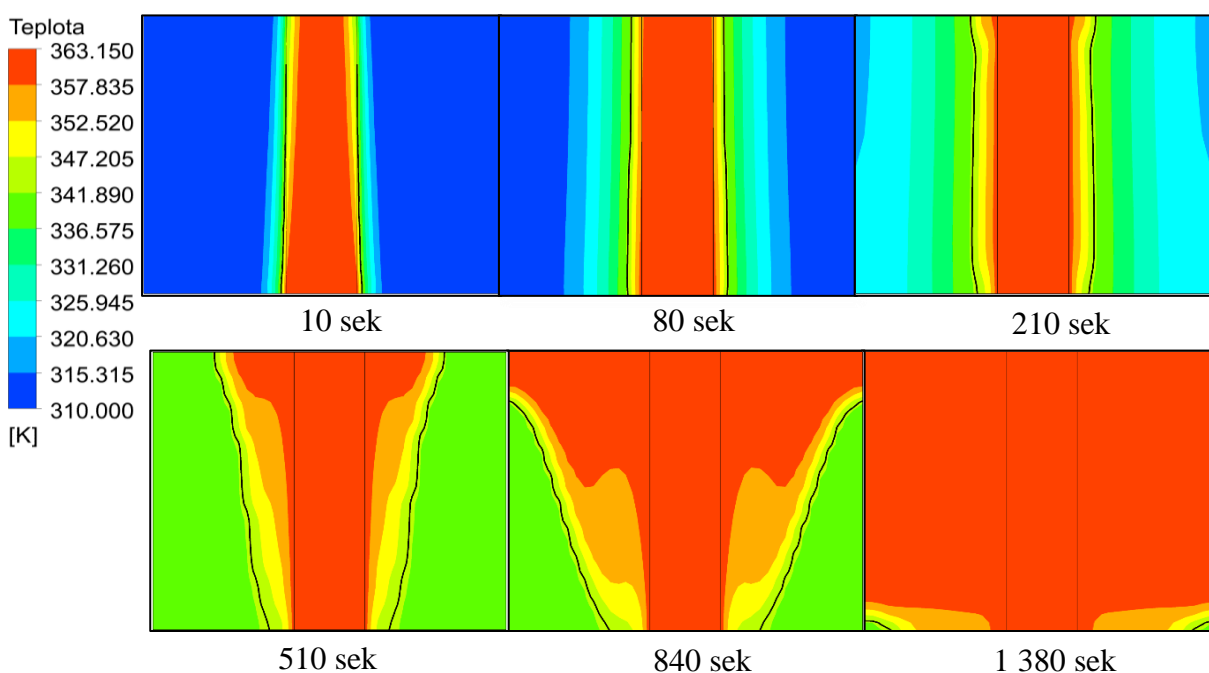
Fig. 7.2. Skript pro omezení proudění pevné frakce parafínu RT69HC

Dalším nezbytným krokem modelování je stanovení okrajových podmínek. Hraniční stěny styku dvou látek pro každou trubici jsou definovány typem oboustranná zeď – Coupled, tj. mají propojené okrajové podmínky a řešič automaticky počítá přenos tepla přímo z roztoku v sousedních buňkách do druhé strany stěny. [47] Nádoba, kterou jsou materiály od sebe odděleny, je z aluminia a má tloušťku 1 mm. Shora i zdola modelu trubic (naplněných voskem) je definován nulový přenos tepla. Pro vodu platí nastavení rychlostního vstupu a tlakového výstupu. Nastavená teplota na vstupu je 70 °C, rychlost byla spočítána pro Re = 500 a má hodnotu 0,009 m/s. Zbylé stěny trojstranného hranolu jsou definovány jako symetrické plochy. Aproximační metody řešení numerických rovnic byly nastaveny stejně jako v případě modelování tavení galia.

7.3 Výsledky řešení

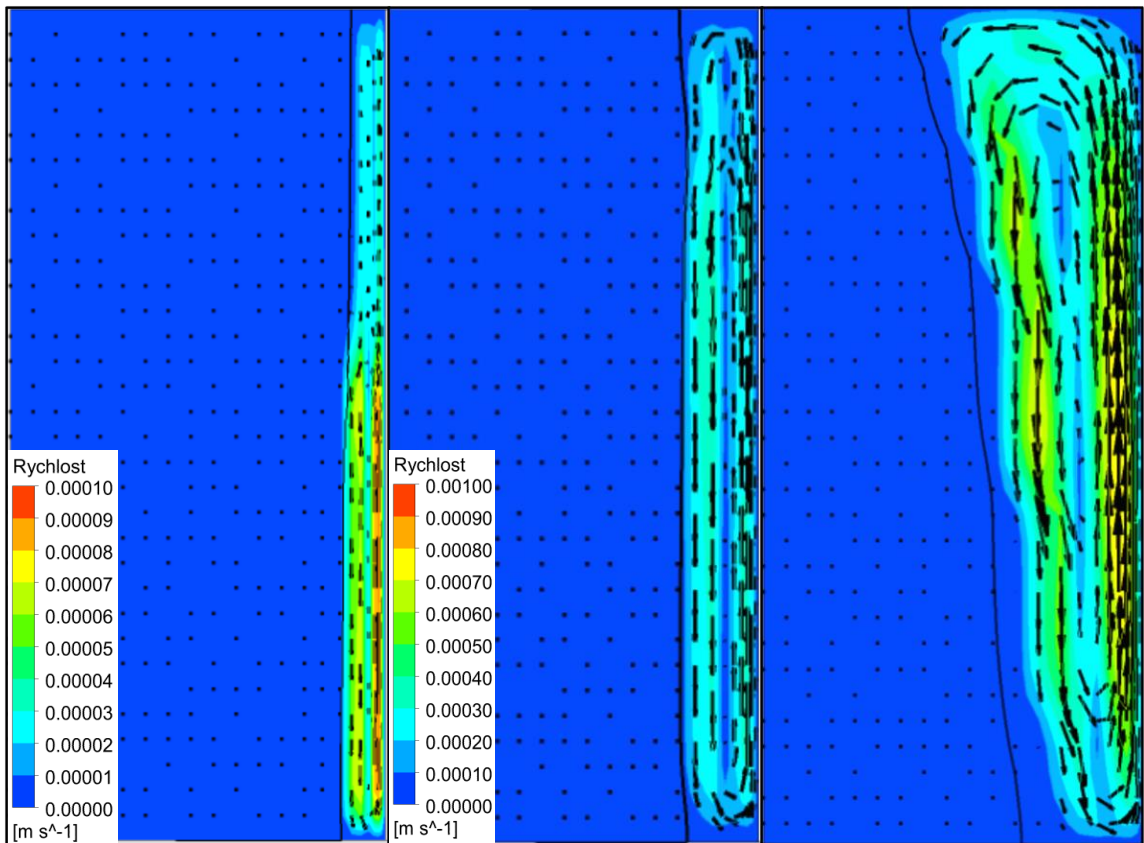
Výpočet tohoto modelu na počítači s 2 jádrovým procesorem a operační pamětí 8 GB s frekvencí 2 133 MHz trval 2 dny. Na počátku výpočtu byl časový krok zvolen 0,01; dále v průběhu výpočtu byl navýšen až na 0,7 sekundy. Tím lze odůvodnit volení krátké délky modelu zásobníku. K úplnému roztavení vosku v daném objemu došlo za 1 475 sekund.

Na obrázku Obr. 7.3 lze sledovat kontury teplot při postupném ohřátí materiálu. Na začátku děje teplo se přes aluminiovou stěnu předává kondukcí, dále po ohřátí na teplotu změny fáze části parafínu začíná konvektivní pohyb, a kvůli tomu je v horní části tekutina ohřívána rychleji. Černou čarou je označena hranice rozdílu dvou fází materiálu.

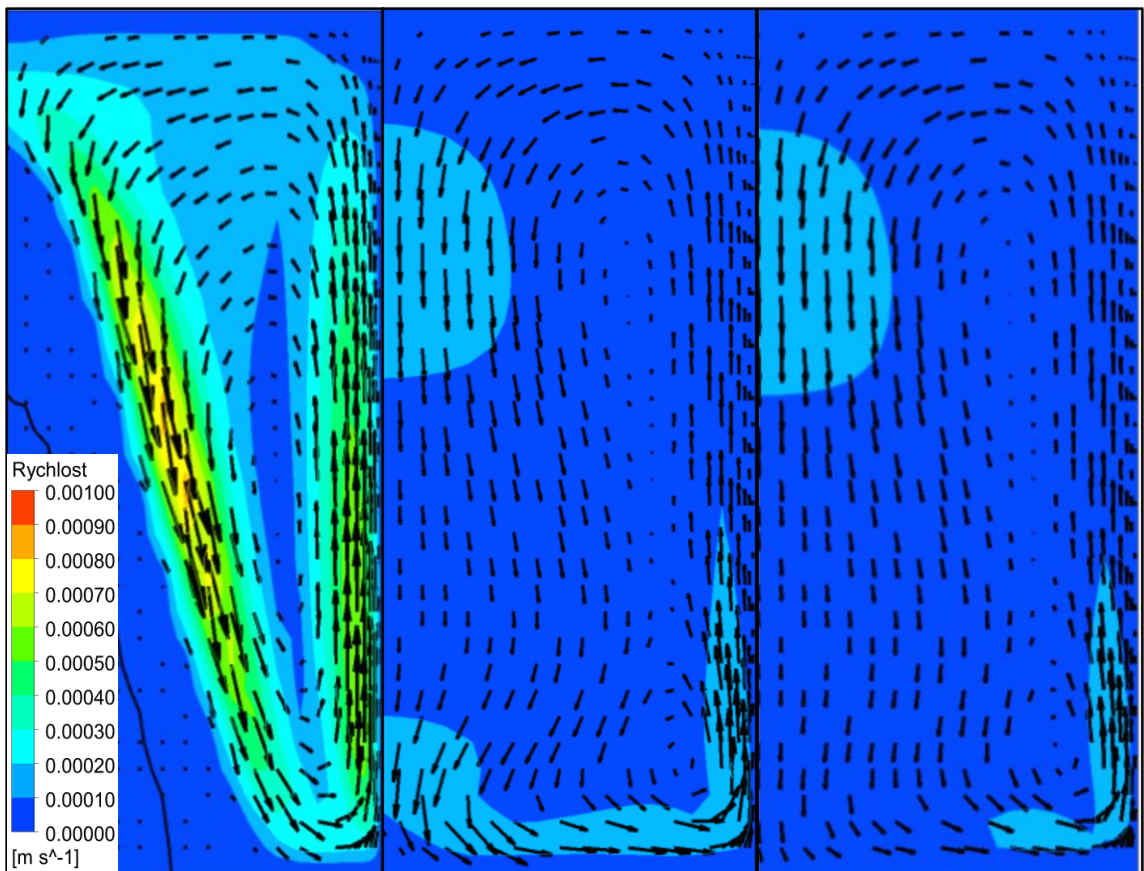


Obr. 7.3. Kontury teploty v souvislosti s časem tavení materiálu

Na dalších obrázcích Obr. 7.4 a Obr. 7.5 je podrobněji popsán konvektivní děj pomocí zobrazení vektorových polí rychlosti roztavené látky v závislosti na čase na příkladu strany jedné trubice. Po uplynutí 80 sekund lze vidět jen malý pohyb tekuté vosku. V dolní části se začíná tvořit vír a postupně se protahuje do horní části vrstvy materiálu. Po 210 sekundách už je vidět, jak část ohřátých částic postupuje do nejvyššího horního bodu, a potom v důsledku rozdílu hustot klesá dolů, k tomu část o trochu chladnějších částic neodchází do horní teplejší vrstvy, ale začíná klesat dolů silou tíhy už v 4/5 své cesty, tím vznikají dva víry. Na následujícím obrázku odpovídajícímu 510 sekundám aproximace je už vidět obrysy 4 vírů, které vznikají tím, že některé teplejší částice neodchází do dolního chladnějšího bodu tekutiny a směřují vzhůru dřív. Tím se zvětšuje objem poměrně teplé tekutiny. Pro čas 1 380 sekund platí, že většina materiálu už je v tekuté fázi, a proto se zmenšila rychlost pohybu tekutiny, ale lze ještě vidět vír u neroztavené části látky. Na obrázku pro čas 1 435 sekund je zobrazen pohyb uvnitř trubice pro zcela roztavený vosk, na kterém je vidět méně výrazné víry, přispívající k dalšímu ohřátí vosku na teplotu vody v potrubí.



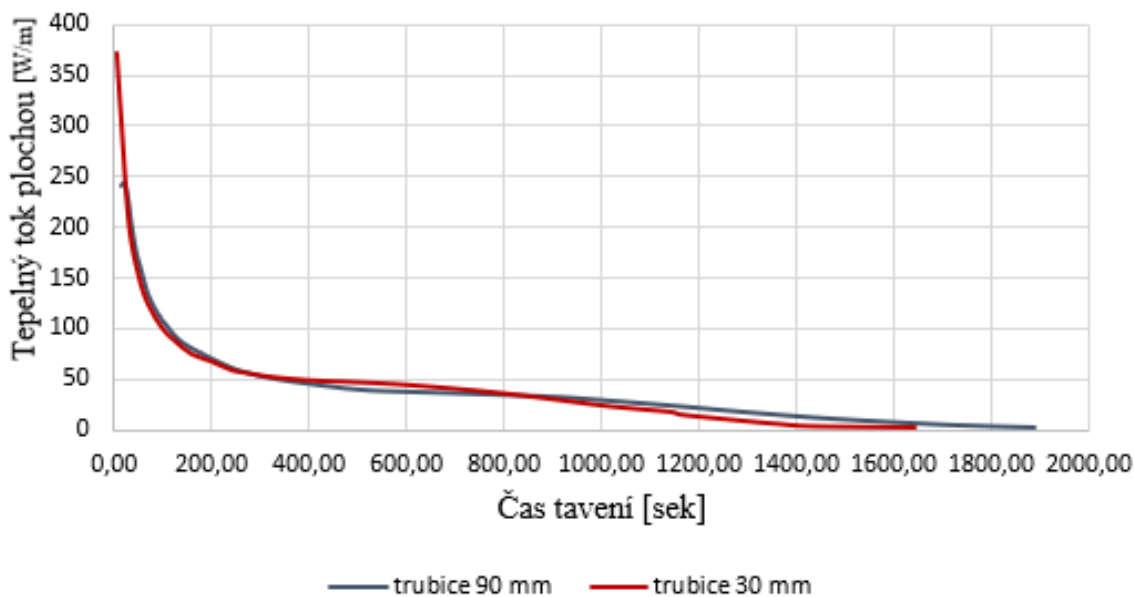
Obr. 7.4. Vektorové pole pro 80, 210 a 510 sekund výpočtu



Obr. 7.5. Vektorové pole pro 540, 1 380 a 1 435 sekund výpočtu

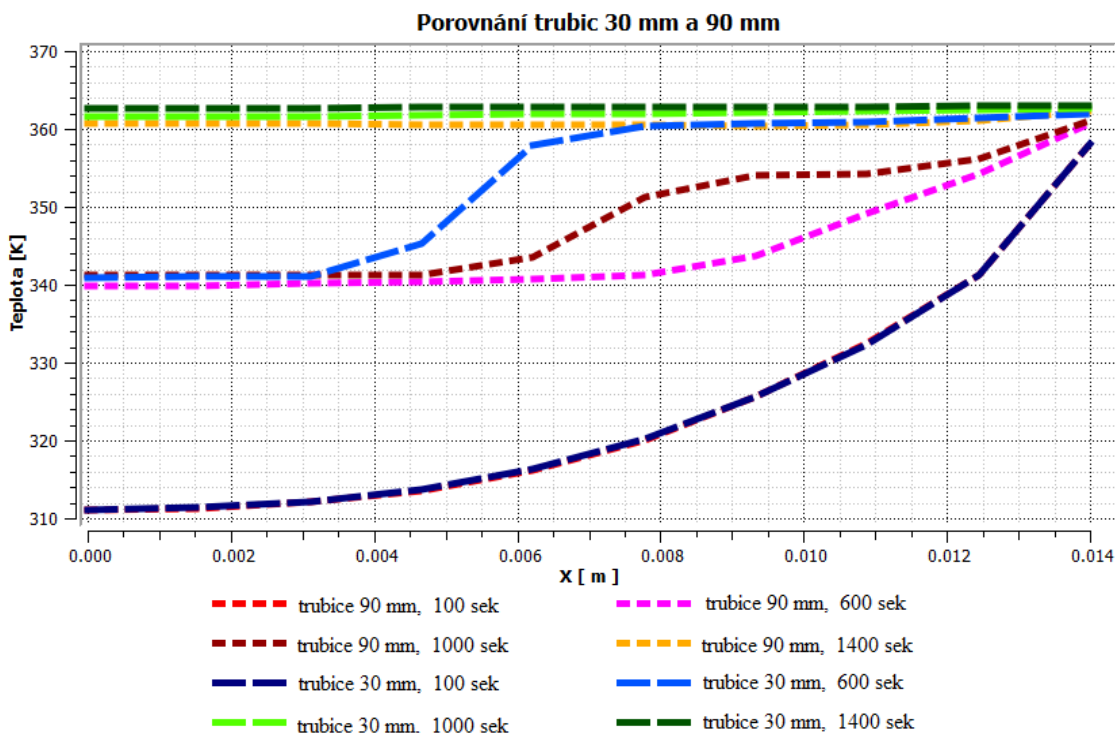
Pro ověření použitelnosti napočítaných hodnot v závislosti na délce trubice byl spočítán model s délkou 90 mm. Jeho počítání trvalo 3,5 dní. K úplnému roztavení látky došlo za 1 855 sekund.

Níže je nakreslen graf tepelného toku plochou, který můžeme považovat za akumulované teplo, tímto modelem konkrétně vztaženého na jednotku délky. Přenesený tepelný tok byl získán cestou integrace tepelného toku na stěně. Modrou čarou jsou označeny hodnoty napočítané pro délku trubice 90 mm, červenou čarou jsou označeny hodnoty pro délku 30 mm. Abychom zjistili akumulované teplo celými třemi trubicemi délkou vybraného modelu, musíme hodnotu v grafu vynásobit šesti.



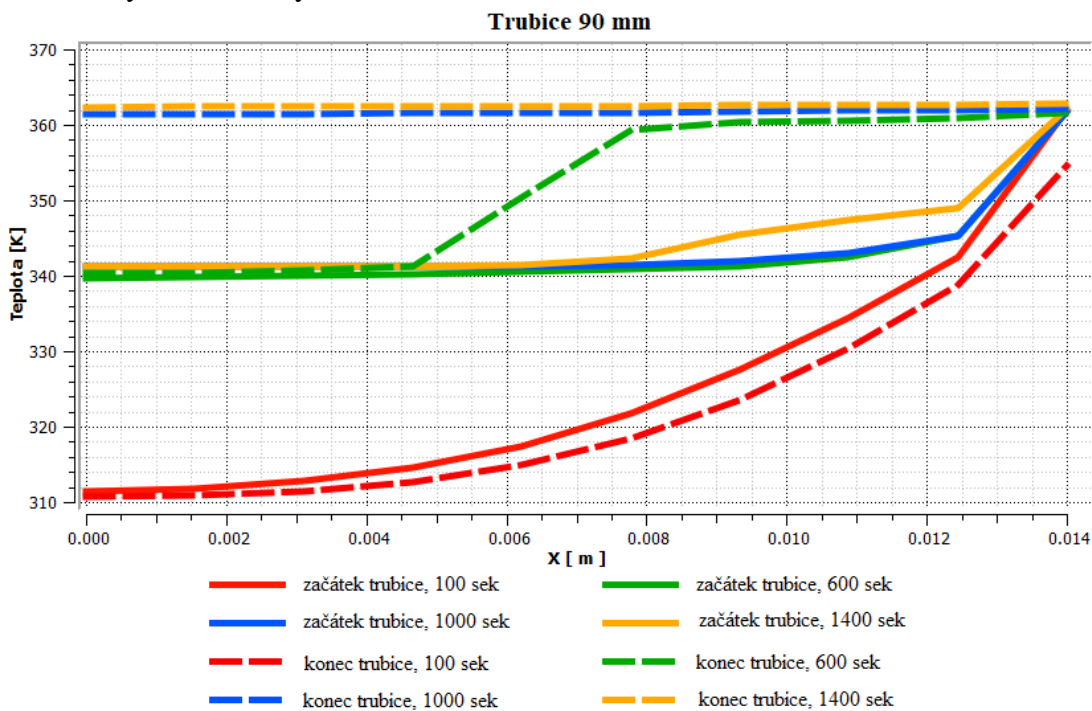
Obr. 7.6. Závislost tepelného toku plochou vztaženého na jednotku délky a čas

Podle výsledků je vidět, že se čáry od sebe trochu liší, to je dáno různou mírou ohřátí trubice za určitý čas pro různé délky. Tento rozdíl lze pozorovat na grafu porovnání rozložení teploty po poloměru v různých časech pro oba modely se stanovenou vzdáleností od začátku trubice 30 mm. Přerušované hodnoty vykazují změnu teploty v horní části modelu s délkou 30 mm, tečkované jsou hodnoty patřící modelu 90 mm. Po dobu 100 sekund (na začátku děje) není vidět žádný rozdíl, avšak po nějaké době je vidět, že v krátké trubici v horní části je již zcela ohřátá tekutina, zatímco pro dlouhou trubici k úplnému roztavení na vzdálenosti 30 mm dochází pomaleji. Takže lze říci, že délka modelu 30 mm není dostačující pro další vyhodnocení parametrů.



Obr. 7.7. Graf porovnání rozložení teploty podél poloměru ve vzdálenosti 30 mm pro trubici o délce 30 a 90 mm

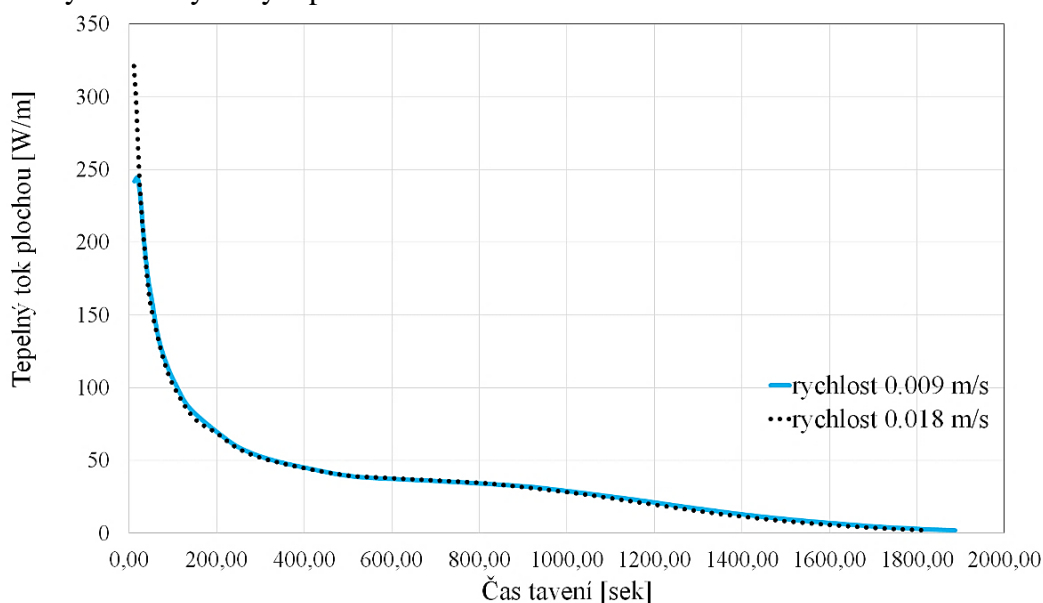
Níže je uveden graf (Obr. 7.8) pro délku 90 mm – rozložení poloměru teplot na začátku trubice (plná čára) a na jejím konci (čerkovaná čára) pro dobu 100, 600, 1 000 a 1 400 sekund. Lze vidět, že na začátku děje se dolní část ohřívá rychleji, avšak po vzniku konvektivního proudění rychleji dochází ke zvýšení teploty v horní části trubice. Obdobné grafy, napočítané pro různé délky, lze používat pro porovnání s experimentem, když v odpovídajících místech trubic budou umístěny termočlánky.



Obr. 7.8. Graf rozložení teploty podél poloměru pro začátek a konec trubice 90 mm

V dalším kroku byl ve Fluentu vypočítán model části výměníku se zvýšenou rychlostí vody, pro sledování jejího vlivu na rychlost přenosu tepla. Zvolená hodnota na počátku děje byla 0,018 m/s odpovídající $Re = 1\ 000$. K úplnému roztavení vosku došlo za 1 819 sekund.

Na obrázku Obr. 7.9 je zobrazen graf tepelného toku kontaktní plochou modelu v závislosti na čase obdobný s Obr. 7.6. Černou tečkovanou čarou je označen tok pro zvýšenou rychlost (model 1), modrou čarou označen tok pro rychlost 0,009 m/s (model 2). Grafy nakresleny v momentu, kdy teplá tekutina (voda) byla v kontaktu s celou plochou. Tekutina z modelu 1 zcela dosáhla horního výstupního bodu za 5 sekund, tekutina z modelu 2 dosáhla výstupního bodu za 11 sekund, přičemž postupně ohřívala stěny. Proto lze vidět, že na začátku děje vykazuje model 1 větší přenos tepla kvůli většímu rozdílu teplot mezi trubkou a vodou. Dále jsou čáry skoro totožné, avšak černá se nachází trochu níže než modrá, což vypovídá o nevýznamném pro nás zvýšení rychlosti výměny tepla.



Obr. 7.9. Závislost vztáženého tepelného toku plochou na čase na jednotku délky pro modely s různými rychlostmi teplotního média

Samozřejmě existuje hodně úloh a směrů, ve kterých lze touto prací pokračovat. Daný model části trubic lze používat pro rychlejší a méně náročný výpočet porovnávacích charakteristik. Například lze dále testovat vliv rychlosti proudění anebo vstupní teplotu vody nebo jiné tekutiny na dobu tavení materiálu, porovnávat vlastnosti různých materiálů s různými tepelnými kapacitami a teplotami tavení, měnit poloměr trubek a jejich vzdálenosti od sebe, měnit materiál a tloušťku stěn úložných trubek s pozorováním vlivu na vedení tepla. Dále lze podle výsledků posuzovat nejvýhodnější způsob z ekonomického a technologického hlediska.

8 Závěr

Úvod této práce je věnován popisu základních rozdělení systémů zásobování teplem podle jejich principů akumulace energie. Následně byly probrány používané materiály pro akumulaci latentního tepla a jejich klíčové vlastnosti. Byly zmíněny výhody použití metody LHTES, což jsou vysoká hustota akumulace, velký výběr materiálů v širokém rozsahu pracovních teplot,

dostupná konstrukce, nízká cena za jednotku energie na výstupu a možnost použití těchto zásobníků na různých vzdálenostech. Dále byly v rešeršní části představeny konstrukce čtyř typů zásobníků tepla a krátký přehled technik zlepšení tepelné vodivosti s uvedenými příklady z vědeckých prací.

Druhá část práce se zabývala numerickým modelováním volné konvekce v komerčním softwaru Ansys Fluent. V dané úloze byl sledován vznik konvekčního pohybu pro různá Rayleighova čísla. Model byl vytvořen za použití Boussinesqovy aproximace v tíhovém poli. Pro ověření správnosti byly výsledky porovnány s referenčním řešením vybraného článku. Bylo stanoveno, že s rostoucím Ra číslem se zvyšují síly způsobující konvekční pohyb a vznikají sekundární víry. Následně byl probrán model tavení galia za použití metody efektivní tepelné kapacity s uvažováním volné konvekce v roztavené části galia a omezení proudění v neroztavené části. Podmínky na měrnou tepelnou kapacitu a omezení proudění byly vloženy do řešiče s využitím UDF kódu. Získané výsledky odpovídaly simulovaným a experimentálním výsledkům z vybraného vědeckého článku.

V poslední části práce byla modelována část akumulátoru tepla typu výměník ve tvaru trojúhelníkového rovnostranného hranolu, u jehož hran se protínají trubky naplněné akumulací látkou, mezi kterými proudí voda. Jako akumulací materiál byl uvažován komerční parafin RT69HC. Při modelování byly použity předchozí studie, jako jsou volná konvekce a metoda efektivní tepelné kapacity s omezením proudění v neroztavené látce. Na konci práce byly probrány a diskutovány výsledky prezentované grafy rozložení teplot a rychlosti v závislosti na čase a v podobě porovnávacích grafů rozložení teploty podle poloměru s časem. Také byl porovnán tepelný tok stěnou pro různé rychlosti proudění vody, kde výsledkem bylo zmenšení času tavení materiálu při větší rychlosti teplotního média.

9 Seznam použitých zdrojů

- [1] Zhang, P., Ma, F., Xia, X. Thermal energy storage and retrieval characteristics of a molten-salt latent heat thermal energy storage system. *Applied Energy*. 2016, 173, 255–271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.012>.
- [2] Sarbu, I.; Sebarchievici, C. A. Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. *Sustainability*. 2018, 10(1), 191. DOI: doi:10.3390/su10010191.
- [3] Shrivastava, A., Chakraborty, P. R. Shell-and-Tube Latent Heat Thermal Energy Storage (ST-LHTES). *Advances in Solar Energy Research*. 2018, 395–441. DOI: doi:10.1007/978-981-13-3302-6_13.
- [4] Dincer, I. Thermal energy storage systems as a key technology in energy conservation. *International Journal of Energy Research*. 2002, 26(7), 567–588. DOI: doi:10.1002/er.805.
- [5] Ding, Y., Riffat, S. B. Thermochemical energy storage technologies for building applications: a state-of-the-art review. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2012, 8(2), 106–116. DOI: doi:10.1093/ijlct/cts004.
- [6] High-Temperature Sensible Heat Storage. In: *EERA Joint Program on Energy Storage - SP3 on Thermal Energy Storage* [online]. Belgium, 2018 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://eera-es.eu/wp-content/uploads/2018/08/JPES-SP3-2-High-Temperature-Sensible-Heat-Storage.pdf>
- [7] Connor, N. What is Sensible Heat Storage – SHS – Definition. *Thermal Engineering* [online]. 2019 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.thermal-engineering.org/what-is-sensible-heat-storage-shs-definition/>
- [8] Yan, T., Wang, R. Z., Li, T. X., Wang, L. W., & Fred, I. T. A review of promising candidate reactions for chemical heat storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, 43, 13–31. DOI: doi:10.1016/j.rser.2014.11.015.
- [9] Ervin, G. Solar heat storage using chemical reactions. *Journal of Solid State Chemistry*. 1977, 22(1), 51–61. DOI: doi:10.1016/0022-4596(77)90188-8.
- [10] Cárdenas, B., & León, N. High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013, 27, 724–737. DOI: doi:10.1016/j.rser.2013.07.028.
- [11] Abhat, A. Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. *Solar Energy*. 1983, 30(4), 313–332. DOI: doi:10.1016/0038-092x(83)90186-x.
- [12] Nomura, T., & Akiyama, T. High-temperature latent heat storage technology to utilize exergy of solar heat and industrial exhaust heat. *International Journal of Energy Research*. 2016, 41(2), 240–251. DOI: doi:10.1002/er.3611.
- [13] Robak, C. W., Bergman, T. L., & Faghri, A. Economic evaluation of latent heat thermal energy storage using embedded thermosyphons for concentrating solar power applications. *Solar Energy*. 2011, 85(10), 2461–2473. DOI: doi:10.1016/j.solener.2011.07.006.
- [14] Li, H., Wang, W., Yan, J., & Dahlquist, E. Economic assessment of the mobilized thermal energy storage (M-TES) system for distributed heat supply. *Applied Energy*. 2013, 104, 178–186. DOI: doi:10.1016/j.apenergy.2012.11.010.

- [15] Nie, B., She, X., Du, Z., Xie, C., Li, Y., He, Z., & Ding, Y. System performance and economic assessment of a thermal energy storage based air-conditioning unit for transport applications. *Applied Energy*. 2019, 251, 113254. DOI: doi:10.1016/j.apenergy.2019.05.057.
- [16] Abhat, A.. Short term thermal energy storage. *Revue de Physique Appliquee*. 1980, 15 (3), 477–501. DOI: 10.1051/rphysap:01980001503047700,HAL Id: jpa-00244754.
- [17] Nomura, T., Okinaka, N., & Akiyama, T. Technology of Latent Heat Storage for High Temperature Application: A Review. *ISIJ International*. 2010, 50(9), 1229–1239. DOI: doi:10.2355/isijinternational.50.1229.
- [18] Alva, G., Liu, L., Huang, X., & Fang, G. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 68, 693–706. DOI: doi:10.1016/j.rser.2016.10.021.
- [19] Hawes, D. W., Feldman, D., & Banu, D. Latent heat storage in building materials. *Energy and Buildings*. 1993, 20(1), 77–86. DOI: doi:10.1016/0378-7788(93)90040-2.
- [20] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009, 13(2), 318–345. DOI: doi:10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [21] Vakhshouri, A. R. Paraffin as Phase Change Material. *IntechOpen*. 2019, [online], cit. 2020-06-14], DOI: 10.5772/intechopen.90487. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/online-first/paraffin-as-phase-change-material>
- [22] Sharma, D., Kitano, H., Sagara, K. Phase Change Materials for Low Temperature Solar Thermal Applications. *Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ.* 2004, 29, 31–64.
- [23] What are Phase Change Materials? *Global-e-systems* [online]. Netherlands [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.global-e-systems.com/en/phase-change-materials/what-are-phase-change-materials/>
- [24] Zhang, N., Yuan, Y., Cao, X., Du, Y., Zhang, Z., Gui, Y. Latent Heat Thermal Energy Storage Systems with Solid-Liquid Phase Change Materials: A Review. *Advanced Engineering Materials*. 2018, 20(6), 1700753. DOI: doi:10.1002/adem.201700753.
- [25] Magendran, S. S., Khan, F. S. A., Mubarak, N. M., Vaka, M., Walvekar, R., Khalid, M., Karri, R. R. Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review. *Nano-Structures & Nano-Objects*. 2019, 20, 100399. DOI: doi:10.1016/j.nanoso.2019.100399.
- [26] Zhang, H. On sugar alcohol based heat storage materials: a nanoscale study and beyond. (2017). Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- [27] Solé, A., Neumann, H., Niedermaier, S., Martorell, I., Schossig, P., & Cabeza, L. F. Stability of sugar alcohols as PCM for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2014, 126, 125–134. DOI: doi:10.1016/j.solmat.2014.03.020.
- [28] Kośny, J. PCM-Enhanced Building Components. *Engineering Materials and Processes*. 2015, DOI: doi:10.1007/978-3-319-14286-9.
- [29] Rathod, M. K. (2018). Phase Change Materials and Their Applications. *Phase Change Materials and Their Applications*. DOI: doi:10.5772/intechopen.75923.
- [30] Cabeza, L. F., Inés Fernández, A., Barreneche, C., & Ushak, S. PCM Storage. *Handbook of Clean Energy Systems*. 2015, 1–23. DOI: doi:10.1002/9781118991978.hces144.

- [31] Mehling, H., Cabeza, L.F. Heat and Cold Storage with PCM. An up to Date Introduction into Basics and Applications Springer-Verlag. 2008, Berlin, Germany ISBN 979-3-540-68556-2.
- [32] Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., & Smyth, M. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010, 14(2), 615–628. DOI: doi:10.1016/j.rser.2009.10.015.
- [33] Esen, M., Durmuş, A., & Durmuş, A. Geometric design of solar-aided latent heat store depending on various parameters and phase change materials. *Solar Energy*. 1998, 62(1), 19–28. DOI: doi:10.1016/s0038-092x(97)00104-7.
- [34] Agyenim, F., Eames, P., & Smyth, M. Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array. *Renewable Energy*. 2010, 35(1), 198–207. DOI: doi:10.1016/j.renene.2009.03.010.
- [35] Velraj, R., Seeniraj, R. V., Hafner, B., Faber, C., & Schwarzer, K. heat transfer enhancement in a latent heat storage sysem. Paper presented at the ISES Solar World Congress, Taejon, South Korea, 24–29 August 1997.1. *Solar Energy*. 1999, 65(3), 171–180. DOI: doi:10.1016/s0038-092x(98)00128-5.
- [36] Agyenim, F., Eames, P., & Smyth, M.A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins. *Solar Energy*. 2009, 83(9), 1509–1520. DOI: doi:10.1016/j.solener.2009.04.007.
- [37] Fiedler, T., Öchsner, A., Belova, I.V., Murch, G.E., Thermal Conductivity Enhancement of Compact Heat Sinks Using Cellular Metals. *Defect and Diffusion Forum Vols. 2008* [online], 273-276, 222-226, [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <http://www.scientific.net>
- [38] *Konvektsiya v sloe zhidkosti: strukturyi i prostranstvennyiy besporyadok* [online]. In: . SGU. Saratov [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2015/02/12/yacheyki_benara.pdf
- [39] Haken, H. Synergetics. Springer Series in Synergetics. 1983, DOI: doi:10.1007/978-3-642-88338-5.
- [40] Boussinesq approximation (buoyancy). *Wikipedia* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Boussinesq_approximation_\(buoyancy\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Boussinesq_approximation_(buoyancy))
- [41] Priblizhenie Bussineska. *Wikipedia* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%B1%D0%BB%D0%B8%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%91%D1%83%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0>
- [42] Ouertatani, N., Ben Cheikh, N., Ben Beya, B., & Lili, T. Numerical simulation of two-dimensional Rayleigh–Bénard convection in an enclosure. *Comptes Rendus Mécanique*. 2008, 336(5), 464–470. DOI: doi:10.1016/j.crme.2008.02.004
- [43] Rösler, F., & Brüggemann, D. Shell-and-tube type latent heat thermal energy storage: numerical analysis and comparison with experiments. *Heat and Mass Transfer*. 2011, 47(8), 1027–1033. DOI: doi:10.1007/s00231-011-0866-9
- [44] Jančík, P. Numerické modelování tání a tuhnutí látek. 2020.
- [45] Lecture 5: Solver Settings. *Introduction to ANSYS Fluent* . 2013 ANSYS, Inc.
- [46] PCM RT-LINE. *Rubitherm PCM* [online]. 2020 Rubitherm Technologies GmbH - Imhoffweg 6 - 12307 Berlin
- [47] Wall Boundary Conditions. *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*. ANSYS, Inc. 2009.