Tvorba modelu akumulátoru tepla s fázovou přeměnou v softwaru OpenModelica

Marek Belda

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

Abstrakt

Tento článek se zabývá tvorbou modelu akumulátoru tepla s fázovou přeměnou v softwaru OpenModelica. Modelovací jazyk Modelica používaný softwarem OpenModelica má tu výhodu, že se jedná o akauzální, objektově orientovaný modelovací jazyk, tudíž schémata zůstávají přehledná i u složitých problémů. Součástí článku je stručný přehled PCM a konstrukčního řešení experimentálního akumulátoru tepla. Odvození vztahů pro tepelný tok je provedeno za zjednodušujícího předpokladu stejné teploty v celém objemu PCM. Prostup tepla byl řešen jako prostup tepla válcovou trubkou kde již ztuhlé PCM plní roli izolace. Prostup tepla byl rozdělen na 2 části (prostup skrze PCM na vnitřní stěnu trubky a prostup trubkou do vody), aby mezi ně mohla být vložena tepelná kapacita trubek. Při porovnání s experimentem použitým pro naladění modelu je vidět velmi dobrá shoda modelu s měřenými daty. Tato shoda zůstává zachována i pro porovnání modelu s daty z jiného měření, i když zde není tak dobrá jako v prvním případě. Pro porovnání jsem vybral z mého pohledu nejdůležitější veličiny, tj. průběh teplot, průběh výstupních výkonů a relativní chybu výkonu.

Klíčová slova: PCM; akumulátor tepla; fázová změna; prostup tepla; OpenModelica

1 Úvod do problematiky

1.1 Software OpenModelica

OpenModelica je open-source modelovací a simulační prostředí pro komerční i akademické využití založené na modelovacím jazyce Modelica. Tento software je možno použít pro simulaci a optimalizaci složitých problémů např. pro optimalizaci elektráren,

v letectví, v automotive nebo pro zpracování signálu [1]. Modely vytvořené v softwaru OpenModelica jsou při spuštění simulace automaticky zkontrolovány, zjednodušeny a zkompilovány do jazyka C nebo C++, ve kterém probíhá samotné řešení. Řešení je zobrazeno ve formě okamžitých hodnot proměnných a grafů, zobrazujících jejich vývoj v čase. OpenModelica umožňuje řešení systémů popsaných algebraickými a obyčejnými diferenciálními rovnicemi s časovou derivací. Řešení parciálních diferenciálních rovnic nebylo implementováno a jazyk Modelica ani není přizpůsoben pro řešení problémů popsaných PDR numericky (MKP, MKO, ...). K tomuto účelu jsou vyvinuté jiné programy speciálně k tomu určené (Ansys, Abaqus, ...).

Výhodou modelovacího jazyka Modelica, na kterém je OpenModelica založena, je akauzální (deklarativní) zápis modelů, který značně usnadňuje tvorbu a úpravy modelu. Modelica umožňuje vizuální hierarchické uspořádání modelů, přičemž struktura modelu odráží strukturu modelované fyzikální reality [2], [3].

1.2 PCM materialy

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

PCM lze rozdělit do několika skupin v závislosti na porovnávaném parametru. Lze je dělit podle teploty fázové změny, latentního tepla nebo podle chemického složení. Zpravidla se využívá dělení podle chemického složení. Základním dělením podle chemického složení je dělení na materiály organické a anorganické. Hlavním rozdílem mezi nimi, kromě chemické podstaty, je, že anorganické PCM mají cca 2x větší objemovou hustotu latentního tepla než organické (250–400 kJ/dm³ u anorganických oproti 128–200 kJ/dm³ u organických) [4], [5].



Obr. 1. Dělení PCM podle chemického složení [4], [5]



Obr.2. Dělení PCM podle teploty a entalpie tání [4]

1.3 Design akumulátoru

Experimentální akumulátor tepla je navržen jako výměník, kde je v trubkách umístěno PCM a tyto trubky jsou v osovém směru obtékány vodou. Existují však i jiná technická řešení. Zvolené technické řešení, tvar, umístění a pozicování akumulátoru je v praxi dáno zástavbovými prostory. V případě experimentálního akumulátoru, pro nějž je tvořen model rozebíraný v tomto článku, se jedná o válcový akumulátor výše zmíněné konstrukce uložený nastojato, s vodou protékající shora dolů.



Obr.3. Schéma části akumulátoru v příčném řezu



Obr.4. Schéma akumulátoru v osovém řezu

2 Tvorba modelu v OpenModelice

2.1 Závislosti sdílení tepla

Pro řešení akumulátoru tepla s fázovou přeměnou není v softwaru OpenModelica předprogramována vhodná třída. Musíme proto vytvořit vlastní třídu, která bude zohledňovat vlastnosti látky tuhnoucí při klesající teplotě, jako je výrazná proměnnost měrné tepelné kapacity v průběhu změny fáze. Pro tuto část tvorby modelu jsou velmi důležité závislosti pro velikost sděleného tepla při ohřívání nebo ochlazování látek uvedené níže.

První termodynamický zákon pro entalpii:

$$\partial Q = dH + dW_t = dH - V \cdot dp \tag{1}$$

Pro náš případ, kde předpokládáme stálý tlak akumulační látky (PCM) platí:

$$dp = 0 \tag{2}$$

$$\partial Q = dH \tag{3}$$

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

$$dH = c_n \cdot m \cdot dT \tag{4}$$

Pro velikost změny entalpie při fázové změně platí vztah:

$$dH = l_t \cdot dm_l \tag{5}$$

Po přechodu do měrných jednotek a krátkém odvození se dostaneme ke vztahům:

$$dh = c_{pl}\zeta dT + c_{ps}(1-\zeta)dT + l_t \frac{\partial\zeta}{\partial T}dT = = c_p \cdot dT$$
(6)

$$c_p = c_{pl} \cdot \zeta + c_{ps}(1 - \zeta) + l_t \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial T}$$
(7)

Odtud již snadno za předpokladu stejného časového průběhu teploty v celé hmotě PCM určíme vztah pro tepelný tok do zásobníku tepla jako:

$$\dot{Q} = c_p \cdot m \cdot \frac{dT}{dt} \tag{8}$$

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

2.2 Termodynamické vlastnosti látky tuhnoucí při klesající teplotě

Pro termodynamické vlastnosti látek při změně fáze je velmi důležitým fenoménem hystereze. V jejím důsledku se látka chová jinak při tání a jinak při tuhnutí. Toto je také třeba v modelu zásobníku tepla zohlednit. PCM, jako všechny látky, taje při mírně vyšší teplotě, než při které tuhne, což je dáno podmínkami uskutečnění děje (musí platit $dg < 0; g = h - T \cdot s$, kde g je měrná Gibbsova entalpie a s je měrná entropie). V rovnovážném stavu soustavy nabývá Gibbsova entalpie vždy svého minima. V případě jakékoli změny podmínek tím pádem nastane zvýšení Gibbsovy entalpie a tím vznikne spád dg, který je zodpovědný za změnu stavu. Stav se mění ve směru klesající Gibbsovy entalpie. Soustava samovolně spěje k dosažení nového rovnovážného stavu, charakterizovaného novým minimem Gibbsovy entalpie, tudíž v rovnovážném stavu musí platit dg = 0. Proto je nutné, aby nastala změna stavu, vychýlit systém z rovnováhy. V našem případě je toho dosaženo změnou teploty na teplotu jinou než rovnovážnou (teplotu likvidu) [6].



Obr.5. Změna volné entalpie s teplotou [6]

Nyní tedy stačí získat závislosti $\zeta(T)$ a $\frac{\partial \zeta(T)}{\partial T}$ a můžeme přistoupit k vytvoření modelu zásobníku s fázovou změnou. Získání závislostí $\zeta(T)$ a $\frac{\partial \zeta(T)}{\partial T}$ není snadné, vyžaduje to mnoho naměřených dat a použití nelineární interpolace pro jejich proložení správnou křivkou, která bude splňovat všechny termodynamické podmínky. Pro některá PCM (např. pro RT35HC, které bylo použito v tomto experimentálním akumulátoru) lze určit, že závislost $\zeta(T)$ odpovídá lineární kombinaci dvou distribučních funkcí Gumbelova rozdělení pravděpodobnosti a závislost $\frac{\partial \zeta(T)}{\partial T}$ tím pádem odpovídá stejné lin. kombinaci hustot pravděpodobnosti pro tato rozdělení.

Vzhledem k tomu, že pro naši aplikaci předpokládáme ζ pouze jako funkci teploty, můžeme místo parciální derivace psát derivaci obyčejnou.

$$\zeta_i(T) = 1 - \exp\left[-\exp\left(\frac{T - \mu_i}{\beta_i}\right)\right] \tag{9}$$

$$\frac{d\zeta_i}{dT} = \frac{1}{\beta_i} \cdot \exp\left(\frac{T-\mu_i}{\beta_i}\right) \cdot \exp\left[-\exp\left(\frac{T-\mu_i}{\beta_i}\right)\right] \quad (10)$$

$$\zeta = w_1 \cdot \zeta_1 + (1 - w_1) \cdot \zeta_2 \tag{11}$$

$$\frac{d\zeta}{dT} = w_1 \cdot \frac{d\zeta_1}{dT} + (1 - w_1) \cdot \frac{d\zeta_2}{dT}$$
(12)

Popis pomocí Gumbelova rozdělení se však hodí pouze pro látky, které tají a tuhnou ve velmi úzkém rozsahu teplot. Pro jiné látky poskytuje tato interpolace nepřesné (nebo i zcela zjevně nesmyslné) výsledky.

2.3 Řešení prostupu tepla

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

Moje úvaha byla taková, že drtivá většina tepla uvolněného při ochlazování PCM se uvolní při fázové změně. Proto prostup tepla PCM popíši jako prostup tepla silnostěnnou válcovou trubkou s proměnným vnitřním poloměrem. Pro účely odvození poloměru fázového rozhraní řeknu, že tepelný tok podstavami je nulový => PCM tuhne pouze radiálně, tuhnutí u podstav se neuvažuje => délka části trubky, v níž je přítomno kapalné PCM je konstantní a je rovna počáteční délce trubky. Jelikož uvažujeme tuhnutí PCM pouze radiálně, můžeme při dalším zjednodušení tím, že budeme rychlost tuhnutí PCM uvažovat po délce trubky konstantní určit poloměr fázového rozhraní jako funkci ζ.

$$R_{int} = (R-s) \cdot \sqrt{1 - \frac{(1-\zeta) \cdot \rho_l}{\rho_s}}$$
(13)



Obr.6. Tvar fázového rozhraní použitý pro odvození Rint

Pro samotné řešení prostupu tepla použijeme přesnější model zahrnující tuhnutí v blízkosti podstav. Tento model nebyl použit pro odvození poloměru fázového rozhraní, protože jeho použití nepřináší výraznou změnu *R*_{int} v porovnání s výše uvedeným modelem, naopak výrazně zvyšuje výpočetní náročnost modelu a přináší problémy s výběrem správného kořene implicitní funkce.

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

$$\dot{Q} = \frac{2\pi \cdot l \cdot n}{\frac{1}{\alpha_{PCM} \cdot R_{int}} + \frac{\ln\left(\frac{R_0}{R_{int}}\right)}{\lambda_{PCM}}} \cdot \Delta T + \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{PCM}} + \frac{2\pi \cdot n \cdot R_{int}^2}{\lambda_{PCM}}} \cdot \Delta T$$
(14)

Tepelný tok skrze trubky do vody je

$$\dot{Q} = \frac{2\pi \cdot l \cdot n}{\frac{1}{\alpha_{voda} \cdot R} + \frac{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)}{\lambda_{tr}}} \Delta T + \frac{2\pi \cdot n \cdot R^2}{\frac{1}{\alpha_{voda}} + \frac{s}{\lambda_{tr}}} \Delta T$$
(15)



Obr.7. Tvar fázového rozhraní použitý pro řešení prostupu tepla

Rozdělení prostupu tepla na dvě části bylo provedeno proto, aby mezi ně mohla být vložena tepelná kapacita trubek. Zanedbání tepelné kapacity trubek by do modelu vnášelo zbytečné chyby. Tepelná kapacita trubek je snadno definovatelná jako

$$C_{tr} = m_{tr} \cdot c_{ptr} \cdot n \tag{16}$$

V řešení prostupu tepla vystupuje součinitel α_{PCM} , jehož velikost nejsme schopni měřit ani vypočítat. Jeho velikost jsem proto odhadl na 2000 W m⁻² K⁻¹, ale porovnáním výsledků simulace s měřením jsem zjistil, že jeho velikost na simulaci nemá zásadní vliv, pokud je volena rozumně (ve vysokých stovkách až nízkých tisících W m⁻² K⁻¹). Tento odhad byl volen na základě mých znalostí termodynamiky s ohledem na to, že při skupenských změnách nabývají součinitele přestupu tepla obvykle značných hodnot (při tání v nízkých tisících, při kondenzaci par až v desetitisících W m⁻² K⁻¹).

Způsob určení α_{voda} je čistě z geometrie akumulátoru a platí pouze pro laminární proudění. Při jeho odvození se vychází ze schématu viz Obr.3. Průtočná plocha jednoho kanálu

$$S = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot a^2 - \pi \cdot \frac{R^2}{2} \tag{17}$$

Smočený obvod jednoho kanálu

$$o = 3 \cdot \frac{\pi}{3}R = \pi \cdot R \tag{18}$$

Celkový průtočný průřez činné části akumulátoru

$$S_C = 2 \cdot n \cdot S \tag{19}$$

Hydraulický průměr

$$D_h = \frac{4 \cdot S}{o} = \frac{\sqrt{3} \cdot a^2}{\pi \cdot R} - 2 \cdot R \tag{20}$$

Nusseltovo číslo a součinitel přestupu tepla α_{voda}

$$Nu = 3,66 + 4,12 \left(\frac{D_h}{R} - 0,205\right)^{0,569}$$
(21)

$$\alpha_{voda} = \frac{Nu}{R} \cdot \lambda_{voda} \tag{22}$$

Vztah (21) platí pouze pro laminární proudění.

$$\bar{u} = \frac{\hat{m}}{\rho_{voda} \cdot S_C}$$
(23)

$$Re = \frac{\bar{u} \cdot D_h}{v} < 2300 \tag{24}$$

3 Srovnání modelu s měřením

Srovnání modelu s měřenými hodnotami lze provést z mnoha hledisek. Pro praktickou aplikaci modelu je nejvíce vypovídající srovnání z hlediska výstupní teploty, tepelného toku a celkového sděleného tepla. Tyto hodnoty jsou totiž určující pro reálnou použitelnost akumulátoru. Příliš nízká výstupní teplota omezuje využitelnost tepla neseného vodou, příliš nízký výkon zase omezuje praktickou použitelnost celého akumulátoru. Celkové sdělené teplo je měřítkem množství uložené energie, jeho časový průběh je pak měřítkem energie, kterou lze do určitého času od náběhu výměníku uvolnit. Celkové sdělené teplo je časovým integrálem tepelného toku.

Vzhledem k možnému použití matematického modelu pro předpovězení chování jiného akumulátoru než toho, na kterém byla provedena měření nás spíše, než absolutní chyba zajímá chyba relativní. Výjimkou je chyba teploty, kde je obtížné definovat, k jaké hodnotě budeme chybu vztahovat. Relativní chybu jsem počítal tak, že jsem absolutní chybu vztáhl k měřeným hodnotám, protože je pokládám za zatížené menší chybou než hodnoty vypočtené. Vzhledem k relativní blízkosti naměřených a vypočtených hodnot nebude mít přílišný vliv, ke kterým hodnotám bude absolutní chyba za účelem vypočtení relativní chyby vztažena. Pro použití modelu při návrhu akumulátoru by mohlo být vhodné vztahovat při výpočtu relativní chyby absolutní chvbu k vypočteným hodnotám, protože měřené hodnoty nebudeme mít k dispozici a vztažení k vypočteným hodnotám nám v takovémto případě poskytne ucelenější obrázek.

3.1 Srovnání s daty použitými pro naladění modelu

Po naladění modelu za použití experimentálních dat je při srovnání modelu s těmito daty vidět, že matematický model převážně podhodnocuje tepelný tok. Celkové sdělené teplo pak podhodnocuje v celém rozsahu simulačního času. Toto jsou důležité závěry, které lze využít pro zlepšení kalibrace modelu a také pro odhad výkonu jiného akumulátoru, na který může být tento model použit (můžeme očekávat mírně vyšší výkon, než ukáže simulace).

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

Moje hypotéza pro vysvětlení tohoto propadu je, že se jedná o důsledek předpokladu konstantní teploty v celém objemu PCM. V reálné trubce s teplotním gradientem dojde k rychlému ochlazení PCM u povrchu trubky, v jehož důsledku začne PCM u stěny tuhnout a uvolňovat značné množství tepla. Toto teplo je rozdílové oproti teplu v modelu a přičte se k teplu odevzdávanému chladnoucí kapalnou fází, se kterým v této časové oblasti model počítá. Tím způsobí vyšší tepelný výkon, z čehož vyplývá i vyšší výstupní teplota vody, než by odpovídalo pouze přenosu tepla při chladnutí kapalné fáze jako v modelových výpočtech. Tento jev je dále podpořen teplotním gradientem po délce trubky, kdy se uplatňuje stejný princip, akorát se jedná o tuhnutí v axiálním směru (začátek trubek je intenzivně ochlazován). Kombinací radiálního a axiálního teplotního gradientu vznikne vliv, který způsobí, že v reálném akumulátoru část PCM již intenzivně tuhne, zatímco v modelu k tuhnutí ještě nedochází kvůli výše zmíněnému předpokladu konstantní teploty v celém objemu PCM. Další (i když dle mého názoru minoritní) vliv může být zanedbání konvektivního přenosu tepla v kapalné fázi. V modelu je uvažováno, že se veškeré teplo uvolňuje na fázovém rozhraní, jehož poloměr v této časové oblasti odpovídá vnitřnímu poloměru trubky. Toto by odpovídalo situaci, kdy je tepelná vodivost kapalné fáze nekonečně velká a prvním odporem proti prostupu tepla je až fázové rozhraní (v této časové oblasti vnitřní stěna trubky) charakterizované koeficientem přestupu tepla α_{PCM} . Vzhledem k výše řečenému se kloním k názoru, že zanedbání odporu proti přenosu tepla v kapalné fázi (zanedbání konvekce) efekt neuvažování teplotního gradientu spíše potlačuje.

Mírné fluktuace na začátku nepovažuji za významné a rozhodující pro platnost modelu v této

oblasti. Srovnání nejdůležitějších veličin je vidět na Obr.8, Obr.9 a Obr.10.

3.2 Srovnání s daty naměřenými při výrazně vyšším hmotnostním toku

Po odeznění přechodového děje, ve kterém mají dominantní vliv jevy naším modelem nezachytitelné je vidět, že model podhodnocuje výstupní teplotu v čase od 240 do 4200 s. Je patrná konzistence s experimentem použitým pro kalibraci, kde model všechny relevantní veličiny též převážně podhodnocoval, příp. se jejich relativní chyba držela v blízkosti nuly. Velké nadhodnocení teploty na počátku je s největší pravděpodobností způsobeno vírovými strukturami před a za činnou částí výměníku a jejich odlišným chováním při výrazně větším průtoku, které tento model nezohledňuje.

Vlivem výrazně (4x) vyššího průtoku dochází k intenzivnímu ochlazování trubek a rychlému tuhnutí PCM, při kterém se mohou projevovat jevy, které model nezachycuje (mají hlubší fyzikální podstatu nebo odporují předpokladům). V tomto případě rychlého tuhnutí může hrát výraznou roli tepelná kapacita již ztuhlého PCM, ze kterého se teplo uvolňuje podstatně blíže ke stěně trubky, než je fázové rozhraní, tudíž dochází k intenzivnějšímu sdílení tepla, protože toto není nuceno překonávat tak silnou vrstvu izolace. V tomto případě vzniká v trubce strmý teplotní gradient, což je v rozporu s předpoklady pro chování PCM (pro odvození sdíleného tepla předpokládáme, že jeho teplota závisí pouze na čase, a ne na souřadnici). Navzdory tomuto model dokáže realitu bez dalších úprav poměrně přesně kopírovat. Srovnání důležitých veličin je vidět na Obr.11, Obr.12 a Obr.13.

Nejzajímavější je srovnání relativních chyb, protože ty můžeme srovnat s měřením použitým pro naladění modelu. Relativní chyba tepelného toku dosahuje pro čas t > 4800 s alarmujících hodnot. Vzhledem k velmi nízkému výkonu v této oblasti (při vztažení na hmotnostní tok více než 4x nižšímu než u prvního experimentu) nemá tato relativní chyba pro praktickou použitelnost modelu příliš velký význam. Je však nutné mít na paměti, že vzhledem k takto vysoké chybě model neumí dobře pracovat se zcela ztuhlým PCM z hlediska prostupu tepla. Pokud vezmeme jako mezní odchylku tepelného toku, pro kterou model ještě vyhoví hodnotu ± 25 % měřené hodnoty, pak lze při tomto hmotnostním toku model označit za platný pro $\zeta \ge 0,02$.

Pokud je pro nás podstatná celková hodnota sděleného tepla, pak model pro rozumně dlouhé simulační časy (≥ 1000 s), velmi dobře odpovídá realitě.

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

Studentská tvůrčí činnost 2021 | České vysoké učení technické v Praze | Fakulta strojní



Obr.8. Průběh výstupní teploty v čase







Obr.10. Relativní chyba tepelného toku

Studentská tvůrčí činnost 2021 | České vysoké učení technické v Praze | Fakulta strojní



výpočet měření — teplotní rozdíl (výpočet - měř Obr.11. Porovnání průběhů teplot při vyšším průtoku







Obr.13. Relativní chyba tep. toku při vyšším průtoku

4 Závěr a komentář

V tomto článku je shrnuto výsledné řešení akumulátoru tepla v softwaru OpenModelica. Bylo provedeno řešení pro vybíjení i nabíjení akumulátoru, přičemž řešení pro vybíjení prošlo i experimentální validací. Z důvodu neprovedení validace experimentem zde není řešení pro nabíjení uváděno. Srovnání s měřením bylo provedeno pro dvě sady měřených dat, jak pro data použitá pro naladění modelu, tak pro data z jiného měření na tomtéž akumulátoru.

Pro účely tohoto porovnání došlo pouze k záměně sady měřených dat, jinak bylo nastavení modelu ponecháno tak, jak bylo naladěno dříve. Porovnání s experimentem ukazuje na dobrou platnost modelu, zvláště za ustálených podmínek s ne příliš vysokým hmotnostním tokem vody. Toto je způsobeno přístupem při odvození modelu, kdy je pro sdělené teplo potřebné pro změnu teploty PCM uvažována stejná teplota v celém objemu PCM, která je rovna rovnovážné teplotě pro dané ζ a tání / tuhnutí, podle aktuálního režimu akumulátoru (nabíjení / vybíjení). Při vzniku teplotního gradientu v trubkách tudíž dochází k odchýlení modelu od reality. Dalším zdrojem nepřesností je řešení prostupu tepla, kdy se uvažuje, že teplota PCM zmíněná výše je teplotou fázového rozhraní a veškeré teplo uvolňované nebo přijímané PCM se předává na tomto rozhraní. Odchylky může také způsobovat nelineární interpolace použitá pro stanovení funkce ζ(T), která je nezbytná pro řešení akumulace a uvolňování tepla. Tato interpolace je provedena z dat výrobce, přičemž způsob jejího provedení a způsob výběru funkce pro proložení daty přesahuje rámec této práce. Použitím numerických metod pro řešení PDR prostupu tepla by se bezpochyby dalo dosáhnout podstatně přesnějších výsledků, což však nebylo cílem práce.

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé práce panu inženýru Petru Jančíkovi za ochotu a trpělivost při vedení této práce. Také bych chtěl poděkovat panu docentu Tomáši Hyhlíkovi, který mě k tomuto tématu přivedl a poskytl mi výsledky své práce, které byly klíčové pro některé části mé práce.

Seznam symbolů

a	vzdálenost os trubek	(m)	
Ctr	tepelná kapacita trubek	(J K ⁻¹)	
c_p	měrná tepelná kapacita pi	ři konstantním	tlaku
	$(J kg^{-1} K^{-1})$		
D	vnější průměr trubky	(m)	
D_h	hydraulický průměr	(m)	
Н	entalpie	(J)	
h	měrná entalpie	(J kg ⁻¹)	
1	délka trubky	(m)	
l_t	entalpie tání	(J kg ⁻¹)	
m	hmotnost	(kg)	
'n	hmotnostní tok	(kg s ⁻¹)	

n	počet trubek	(1)
Nu	Nusseltovo číslo	(1)
0	smočený obvod	(m)
р	tlak	(Pa)
Q	teplo	(J)
Q	tepelný tok	(W)
R	vnější poloměr trubky	(m)
R_0	vnitřní poloměr trubky	(m)
R _{int}	poloměr fázového rozhraní	(m)
Re	Reynoldsovo číslo	(1)
S	plocha	(m ²)
S	tloušťka stěny trubky	(m)
Т	termodynamická teplota	(K)
t	čas	(s)
ΔT	teplotní spád	(K)
\overline{u}	střední objemová rychlost	(m s ⁻¹)
W_t	technická práce	(J)
\mathbf{W}_1	součinitel lineární kombinace	(1)
α	součinitel přestupu tepla	(W m ⁻² K ⁻¹)
β	teplotní rozsah fázové přeměny	(K)
ζ	hmotnostní podíl kapalné fáze	(1)
λ	tepelná vodivost	$(W m^{-1} K^{-1})$
μ	střední teplota fázové přeměny	(K)
ν	kinematická viskozita vody	$(m^2 s^{-1})$
ρ	hustota	(kg m ⁻³)

Literatura

- [1] Introduction. *OpenModelica* [online]. 2021 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: https://www.openmodelica.org/
- [2] SODJA, Anton a Borut ZUPANČIČ. Modelling thermal processes in buildings using an object-oriented approach and Modelica. In: *Simulation Modelling Practice and Theory* [online]. Elsevier, 2009, , s. 1143-1159 [cit. 2021-03-11]. ISSN 1569190X. Dostupné z: doi:10.1016/j.simpat.2009.04.003
- KOFRÁNEK, Jiří, ed. MODELICA. In: *MEDSOFT* 2013 [online]. Krasnojarská 14, 100 00 Praha 10: Creative Connections, 2013, s. 64-68 [cit. 2021-03-11]. ISBN 978-80-904326-7-3. ISSN 1803-8115. Dostupné z: http://www.creativeconnections.cz/medsoft/2013/Medso ft_2013_Kofranek2.pdf
- [4] KRAUSE, Luboš. Akumulace tepelné energie v PCM. Liberec, 2017. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra energetických zařízení. Vedoucí práce Doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
- [5] SHARMA, Atul, V.V. TYAGI, C.R. CHEN a D. BUDDHI. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. Elsevier, 2009, , s. 318-345 [cit. 2021-03-11]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2007.10.005
- [6] STROUHALOVÁ, Michaela. Studium fázových změn v oceli během jejího tuhnutí. Ostrava, 2018. Disertace. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálově-technologická, Katedra metalurgie a slévárenství. Vedoucí práce Doc. Ing. Karel Gryc, Ph.D.