

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2024

Ing. Natália Hrušková



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Natália Hrušková

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

**Numerická simulácia fázových prechodov pri viacfázovom modeli
transportu tepla**

Na získanie akademického titulu **doktor**
(„**philosophiae doctor**“, v skratke „**PhD.**“)
v študijnom odbore Strojárstvo
v študijnom programe Energetické stroje a zariadenia

Žilina 2024

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedre energetickej techniky.

Predkladateľ: Ing. Natália Hrušková
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra energetickej techniky

Školiteľ: doc. Ing. Richard Lenhard, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra energetickej techniky

Oponenti: 1. prof. Ing. Mária Čarnogurská, PhD. TU Košice
2. prof. Ing. Róbert Olšiak, PhD. STU Bratislava
3. doc. Ing. Andrej Kapjor, PhD. ŽU v Žiline

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 26.8.2024 o 10:30 hod. v miestnosti BC309 na Sjf, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenu odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Energetické stroje a zariadenia, vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

S dizertačnou prácou je možné sa oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu Sjf, UNIZA, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

prof. Ing. Jozef Jandačka, PhD.
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

Obsah

ÚVOD	5
1 Numerický model viacfázového prúdenia	5
2 Realizácia merania viacfázového prúdenia v uzatvorenom priestore	6
2.1 Metodika merania.....	7
2.2 Analýza získaných experimentálnych dát	8
3 Numerická simulácia viacfázového prúdenia	9
3.1 Implementácia dát z meraní a kalibrácia modelu	10
3.2 3D model experimentálnej zostavy	11
3.3 Vyhodnotenie výsledkov numerickej simulácie a laboratórneho merania	13
ZÁVER	15
Prínos pre vedecko-výskumnú oblasť	15
Prínos pre technickú prax.....	15
Prínos pre pedagogickú činnosť	16
Zoznam použitej literatúry	16
RESUME	21
SUMMARY	21

ÚVOD

Viacfázové prúdenia, prítomné v širokom spektre priemyselných a prírodných procesov, sú kľúčové pre mnohé technologické aplikácie. Ich výskum je nevyhnutný pre optimalizáciu procesov, zvýšenie energetickej účinnosti a zaistenie bezpečnosti. S rastúcimi nárokmi na presné predpovede správania týchto systémov sa numerické simulácie stávajú dôležitým nástrojom. Dvojfázové prúdenie, vrátane procesov vyparovania a kondenzácie, zohráva významnú úlohu v priemyselných aplikáciách. Pre presné modelovanie týchto procesov je nevyhnutné hĺbkové pochopenie a presné nastavenie korelačných koeficientov v numerických modeloch. Táto dizertačná práca sa zameriava na skúmanie korelačných koeficientov v Lee modeli v programe ANSYS Fluent a ich vplyv na presnosť simulácií fázových prechodov pri vyparovaní a kondenzácii. Výskum kombinuje teoretickú analýzu fyzikálnych princípov s laboratórnym meraním na experimentálnej zostave. Cieľom je získať spoľahlivé údaje o korelačných koeficientoch a overiť ich validitu porovnaním s experimentálnymi výsledkami. Výsledky tejto práce prispievajú k hlbšiemu pochopeniu viacfázových prúdení a zlepšia presnosť ich modelovania, čo bude mať pozitívny dopad na rôzne priemyselné odvetvia a technologické aplikácie.

Ciele dizertačnej práce

Dizertačná práca sa zaoberá numerickou simuláciou fázových prechodov vyparovania a kondenzácie v uzavretých priestoroch s využitím výpočtovej dynamiky tekutín (CFD) v programe ANSYS Fluent. Cieľom je optimalizácia numerického modelu medzifázového transportu hmoty a zvýšenie presnosti CFD simulácií v porovnaní s reálnymi meraniami.

Práca analyzuje súčasný stav riešenia viacfázových prúdení, pričom sa zameriava na Lee model a jeho korelačné koeficienty, ktoré sú kľúčové pre presnosť simulácií fázových premien v programe ANSYS Fluent. Keďže štandardné hodnoty týchto koeficientov často nezodpovedajú reálnym podmienkam, práca sa snaží experimentálne stanoviť ich optimálne hodnoty pre dané podmienky a následne ich využiť na presnejšie prispôsobenie CFD simulácií reálnym procesom.

K splneniu cieľa práce bolo potrebné naplniť nižšie uvedené čiastkové úlohy:

- Zhodnotenie súčasného stavu a analýza transportu tepla pri fázových prechodoch
- Numerické modely viacfázového prúdenia s vyparovaním a kondenzáciou v ANSYS Fluent
- Optimalizácia numerického modelu medzifázového transportu hmoty v uzavretom priestore
- Návrh a realizácia experimentálneho merania kondenzácie a vyparovania v uzatvorenom priestore
- Vyhodnotenie výsledkov numerickej simulácie a experimentálneho merania

Očakávané výsledky práce prispievajú k zlepšeniu presnosti numerických simulácií fázových prechodov, čo má význam pre praktické aplikácie v rôznych odvetviach priemyslu, ako napríklad v oblastiach chladenia, klimatizácie a optimalizácie priemyselných procesov.

1 Numerický model viacfázového prúdenia

Lee model v programe ANSYS Fluent je fyzikálne založený model, ktorý simuluje prenos hmoty medzi kvapalnou a plynnou fázou, konkrétne procesy vyparovania a kondenzácie. Je kompatibilný s rôznymi viacfázovými modelmi a umožňuje modelovanie v rôznych teplotných režimoch. Model

využíva Hertz-Knudsenovu formuláciu z kinetickej teórie plynov na výpočet toku vyparovania a kondenzácie, pričom zohľadňuje tlak, teplotu, molárnu hmotnosť a prispôbovací koeficient. Clausius-Clapeyronova rovnica sa používa na výpočet tlaku nasýtenej pary.

Empirické koeficienty v modeli je potrebné upraviť (kalibrovať) na základe experimentálnych dát, pretože teoretické výrazy sú založené na zjednodušeníach a často neznámych parametroch, ako sú priemer bubliny a prispôbovací koeficient. V rámci tejto dizertačnej práce bol vyparovací koeficient určený priamo z merania viacfázového prúdenia na experimentálnej zostave, zatiaľ čo kondenzačný koeficient bol nastavený na hodnotu 1, čo je v súlade s teoretickými predpokladmi a bežnou praxou pri modelovaní kondenzácie. Tento prístup umožnil priame porovnanie výsledkov numerických simulácií s experimentálnymi údajmi a overenie presnosti a spoľahlivosti Lee modelu pri simulácii fázových prechodov.

Celkovo Lee model poskytuje užitočný nástroj na simuláciu komplexných procesov vyparovania a kondenzácie v rôznych viacfázových systémoch, ale vyžaduje starostlivé nastavenie a validáciu na základe experimentálnych údajov.

2 Realizácia merania viacfázového prúdenia v uzatvorenom priestore

Dr. T. Alty [14] vo svojej štúdií z roku 1933 využil Hertz-Knudsenov vzťah, ktorý popisuje maximálnu rýchlosť vyparovania do vákua, na experimentálne určenie tzv. vyparovacieho koeficientu f . Tento koeficient kvantifikuje odchýlku medzi experimentálne nameranými hodnotami a teoretickými predpokladmi. Altyho prístup, ktorý kombinuje teoretické základy s experimentálnym overením, bol inšpiráciou k podobnému postupu pri skúmaní korelačných koeficientov Lee modelu aj v tejto práci. Rovnako ako Alty, aj v tomto prípade ide o snahu experimentálne overiť a kalibrovať teoretický Lee model, tak aby sa dosiahli presnejšie a spoľahlivejšie predpovede fázových premien v uzavretých priestoroch.

Výpočet vyparovacieho koeficientu f , ktorý vyjadruje pomer molekúl, ktoré sa pri dopade na povrch kvapaliny udržia a nekondenzujú späť do plynnej fázy, je opísaný nižšie.

$$f_{exp} = \frac{\dot{m}}{43,75 \cdot 10^{-6} \cdot (P - p) \cdot \sqrt{\frac{M}{T}}} \quad (1)$$

kde \dot{m} je hmotnostný prietok pary [kg/s], P je tlak nasýtených pár [Pa], p je tlak v systéme [Pa], M je molárna hmotnosť plynu [kg/kmol] a T je absolútna teplota [K].

Cieľom merania viacfázového prúdenia v uzatvorenom priestore bolo získať dáta ako napríklad množstvo vzniknutého kondenzátu, tlak a teplotu nasýtených pár pracovného média, bez ktorých by nebolo možné analyzovať a spätne vypočítať experimentálny vyparovací koeficient Lee modelu do programu ANSYS Fluent. Tým sa umožnilo porovnať experimentálne výsledky s výsledkami numerických simulácií a poskytol sa ucelený pohľad na presnosť a validitu numerického modelu voči reálnym podmienkam. Takéto porovnania sú dôležité nielen pre overenie správnosti numerických modelov, ale aj pre ich ďalšie vylepšovanie a optimalizáciu voči reálnym podmienkam a potrebám ich aplikácií v praxi.

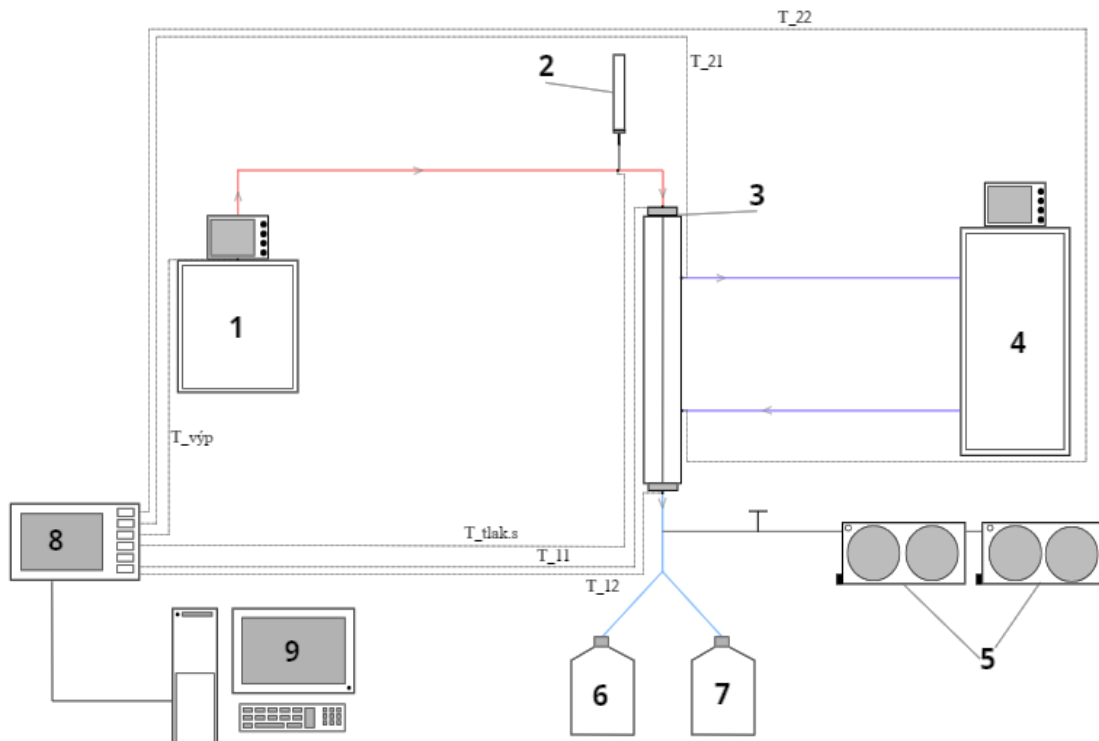
2.1 Metodika merania

Realizácia merania sa začala dôkladným vyčistením a vysušením všetkých komponentov experimentálnej zostavy. Systém bol utesnený a pomocou vákuových výlevov bol vytvorený podtlak na odstránenie vzduchu a iných nežiaducich plynov. Pred samotným experimentom bola vykonaná kalibrácia termočlánkov a tlakového snímača. Pracovné médium (destilovaná voda) bolo ohrievané v termostate na konštantnú teplotu 95 °C. Po dosiahnutí teploty varu sa voda začala vyparovať a prechádzať do ďalších častí zostavy cez adiabatickú časť až ku kondenzátoru, kde nasýtená para skondenzovala a vzniknutý kondenzát stiekol vplyvom gravitácie do zbernej nádoby. Stabilita merania bola dosiahnutá po ustálení konštantnej teploty na všetkých termočlánkoch rozmiestnených na viacerých miestach experimentálnej zostavy, vrátane vstupu a výstupu na kondenzátore, pri tlakovom snímači, na nádobe s destilovanou vodou a pod.

Experiment pozostával z viacerých meraní pri konštantnej teplote ohrevu (95 °C), menila sa len teplota chladiacej vody (70 °C, 60 °C, 50 °C, 40 °C a 25 °C). Cieľom bolo získať dáta z rôznych podmienok prúdenia a poklesov tlaku pre výpočet experimentálneho vyparovacieho koeficientu do Lee modelu.

Pri každom meraní sa po stabilizácii systému zaznamenávali teploty, tlak a množstvo vzniknutého kondenzátu. Získané údaje boli následne analyzované a hmotnostný prietok bol vypočítaný z údajov o hmotnosti kondenzátu a času merania. Tieto údaje poslúžili na overenie a validáciu Lee modelu, ako aj na určenie jeho empirických koeficientov.

Na obr. 1 je znázornená schéma zapojenia experimentálnej zostavy: 1 – Cirkulačný termostat Julabo; 2 – Tlakový snímač; 3 – Kondenzátor; 4 – Chladiaci termostat Julabo; 5 – Sériovo zapojené vývevy; 6 – Stabilizačná nádoba; 7 – Nádoba na odber kondenzátu; 8 – Ústredňa; 9 – PC.



Obr. 1 Schéma zapojenia experimentálnej zostavy

2.2 Analýza získaných experimentálnych dát

Získané výsledky z experimentu ukazujú, že so zvyšujúcou sa teplotou chladenia sa zvyšuje aj teplota varu destilovanej vody a tlak v systéme. Toto je v súlade s očakávaniami, pretože vyššia teplota chladenia vedie k vyššiemu tlaku nasýtených pár, čo následne zvyšuje teplotu varu. Konkrétne hodnoty sú nasledovné:

- Pri teplote chladenia 25°C bola teplota varu 46,75°C a tlak 10 502 Pa.
- Pri teplote chladenia 40°C bola teplota varu 49,32°C a tlak 11 941 Pa.
- Pri teplote chladenia 50°C bola teplota varu 55,40°C a tlak 16 072 Pa.
- Pri teplote chladenia 60°C bola teplota varu 63,50°C a tlak 23 448 Pa.
- Pri teplote chladenia 70°C bola teplota varu 71,83°C a tlak 33 804 Pa.

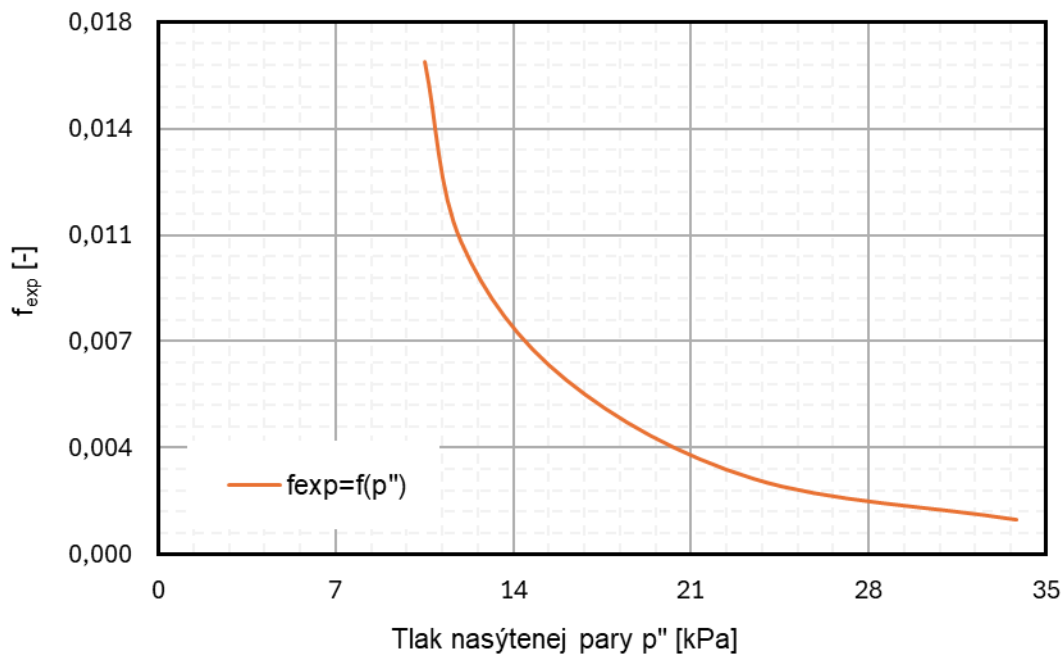
Naopak, zvýšenie teploty chladenia malo za následok zníženie hmotnostného prietoku a množstva vzniknutého kondenzátu. Tento jav je spôsobený tým, že vyššia teplota chladenia znižuje teplotný rozdiel medzi parou a chladiacim médiom, čo vedie k menej efektívnej kondenzácii. Konkrétne hodnoty hmotnostného prietoku a množstva kondenzátu sú nasledovné:

- Pri teplote chladenia 25°C bol hmotnostný prietok $1,9263 \cdot 10^{-4}$ kg/s a vzniklo 0,347 kg kondenzátu.
- Pri teplote chladenia 40°C bol hmotnostný prietok $1,3046 \cdot 10^{-4}$ kg/s a vzniklo 0,235 kg kondenzátu.
- Pri teplote chladenia 50°C bol hmotnostný prietok $1,1431 \cdot 10^{-4}$ kg/s a vzniklo 0,206 kg kondenzátu.
- Pri teplote chladenia 60°C bol hmotnostný prietok $9,737 \cdot 10^{-5}$ kg/s a vzniklo 0,175 kg kondenzátu.
- Pri teplote chladenia 70°C bol hmotnostný prietok $7,5139 \cdot 10^{-4}$ kg/s a vzniklo 0,135 kg kondenzátu.

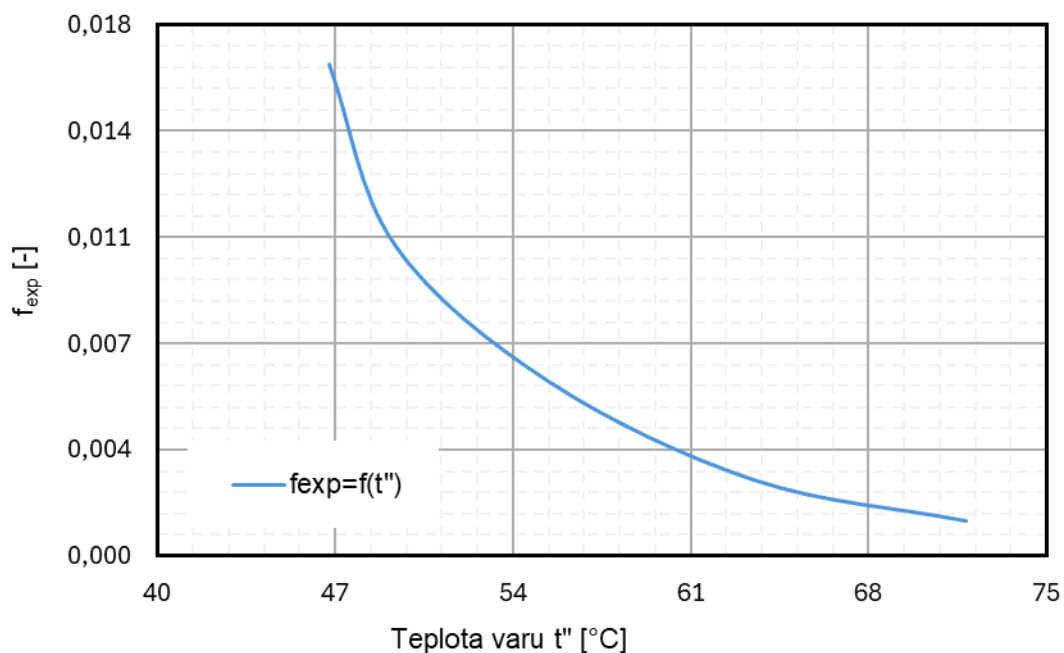
Zvýšenie teploty chladenia malo za následok zvýšenie teplôt na vstupe a výstupe kondenzátora (T_{11} a T_{12}). Zároveň sa so zvyšujúcou teplotou a tlakom znižovala experimentálne stanovená hodnota vyparovacího koeficientu f_{exp} .

- Pri teplote chladenia 25 °C $f_{exp} = 0,01666$
- Pri teplote chladenia 40 °C: $f_{exp} = 0,01055$
- Pri teplote chladenia 50 °C: $f_{exp} = 0,00590$
- Pri teplote chladenia 60 °C: $f_{exp} = 0,00257$
- Pri teplote chladenia 70 °C: $f_{exp} = 0,00118$

Vo všetkých meraniach sa teploty a tlak v systéme udržiavali stabilné s miernymi odchýlkami, čo naznačuje dosiahnutie rovnovážneho stavu a spoľahlivosť získaných údajov. Vykonané laboratórne merania poskytujú cenné informácie o vplyve teploty chladenia na proces fázovej premeny pracovného média. Získané výsledky ukazujú, že teplota chladenia má významný vplyv na teplotu varu, tlak v systéme, hmotnostný prietok kondenzátu, teploty v kondenzátore a vyparovací koeficient. Tieto poznatky môžu byť využité na optimalizáciu procesu vyparovania a kondenzácie a zlepšenie ich ďalšej účinnosti. Na obr. 2 je zobrazená Závislosť korelačného koeficientu od tlaku nasýtenej pary a na obr. 3 Závislosť korelačného koeficientu od teploty nasýtených pár a množstva vzniknutého kondenzátu.



Obr. 2 Závislosť korelačného koeficientu od tlaku nasýtenej pary



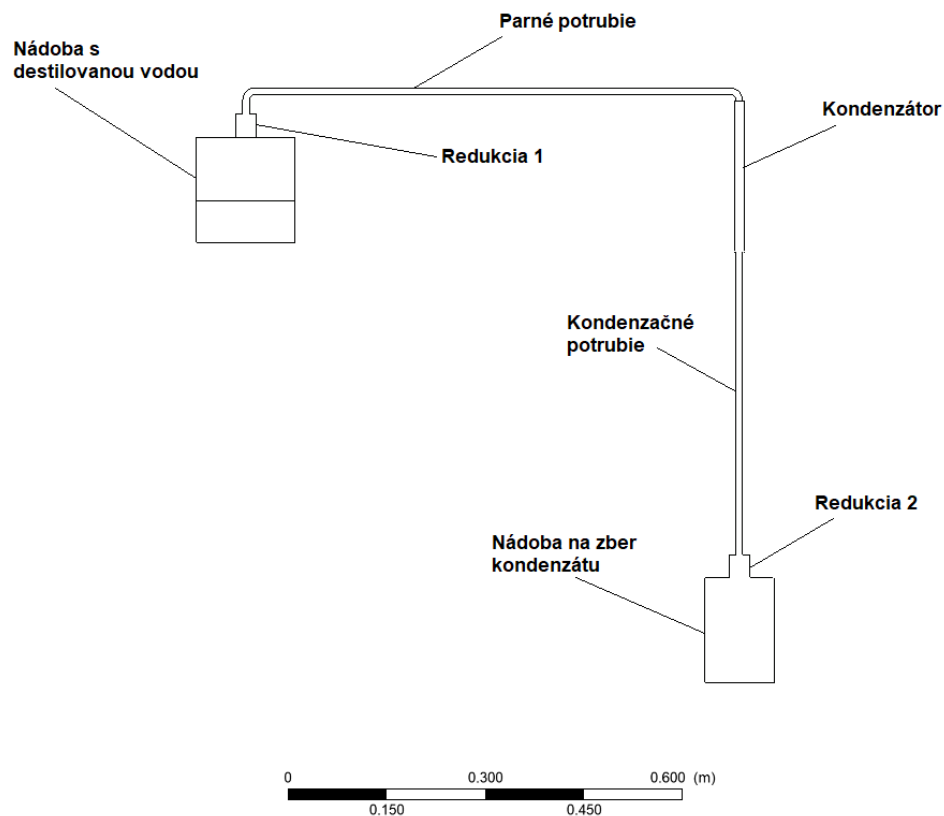
Obr. 3 Závislosť korelačného koeficientu od teploty nasýtených pár a množstva vzniknutého kondenzátu

3 Numerická simulácia viacfázového prúdenia

Práca sa zamerala na vývoj a validáciu 2D modelu gravitačnej tepelnej trubice. V úvodnej fáze bola overená aplikovateľnosť nastavení parametrov z predchádzajúcej štúdie Lenharda a kol. [46] na odlišnú geometriu. Za týmto účelom bol vytvorený 2D model experimentálnej zostavy a simulovaný po dobu 10 sekúnd s použitím nastavení parametrov z ich štúdie. Cieľom bolo overiť, či sa dosiahne

podobný priebeh fázových procesov v uzavretom priestore ako pri zjednodušenej geometrii ich tepelnej trubice.

Na 2D model bola aplikovaná výpočtová sieť s 59 185 bunkami, ktorá bola vybraná na základe predchádzajúcej štúdie nezávislosti siete. Sieť pozostávala zo štvorcových buniek s minimálnou veľkosťou 0,001 m a bola cielene zhustená na stenách nádoby a na rozhraní medzi kvapalnou a parnou fázou. Na obr. 4 je zobrazený 2D model experimentálnej zostavy.



Obr. 4 2D model experimentálnej zostavy

Výsledky simulácie ukázali rýchlejší proces vyparovania tekutiny v porovnaní so zjednodušenou geometriou, čo naznačilo potrebu kalibrácie koeficientov Lee modelu pre presnejšie predpovedanie správania sa tekutiny.

Následne bola vykonaná validácia numerického modelu prostredníctvom porovnania výsledkov simulácií s reálnymi údajmi získanými z meraní na 2D modeli experimentálnej zostavy. Kľúčovým parametrom pre porovnanie bola objemová frakcia vody, nakoľko kondenzát vznikajúci v zbernej nádobe je v kvapalnej fáze.

3.1 Implementácia dát z meraní a kalibrácia modelu

2D model experimentálnej zostavy bol ďalej analyzovaný s implementáciou dát z meraní, ktoré boli realizované s cieľom získať experimentálne hodnoty vyparovacích koeficientov Lee modelu. Model mal zmenené hodnoty teplôt stien, operačných podmienok a korelačných koeficientov Lee modelu. Kondenzačný koeficient bol stanovený na konštantnú, rovnovážnu hodnotu 1. Pre každé nastavenie

riešiteľa v ANSYS Fluent bol z realizovaných meraní individuálne stanovený počet časových krokov. Počas simulácií bola sledovaná vznikajúca hladina kondenzátu, ktorá bola následne porovnávaná s hladinou v nádobe na zber kondenzátu z experimentu. Výsledky časov, kedy bolo dosiahnuté totožné množstvo kondenzátu v simulácii a experimente, sú zhrnuté v tab. 1.

Tab. 1 Porovnanie rýchlostí fázových zmien v 2D simuláciách s experimentom

Meranie	Výška kondenzátu v nádobe [mm]	Čas simulácie [s]	Merací čas v experimente [s]
95°C – 25°C	40,16	535	1800
95°C – 40°C	27,19	310	1800
95°C – 50°C	23,85	185	1800
95°C – 60°C	20,30	160	1800
95°C – 70°C	15,66	130	1800

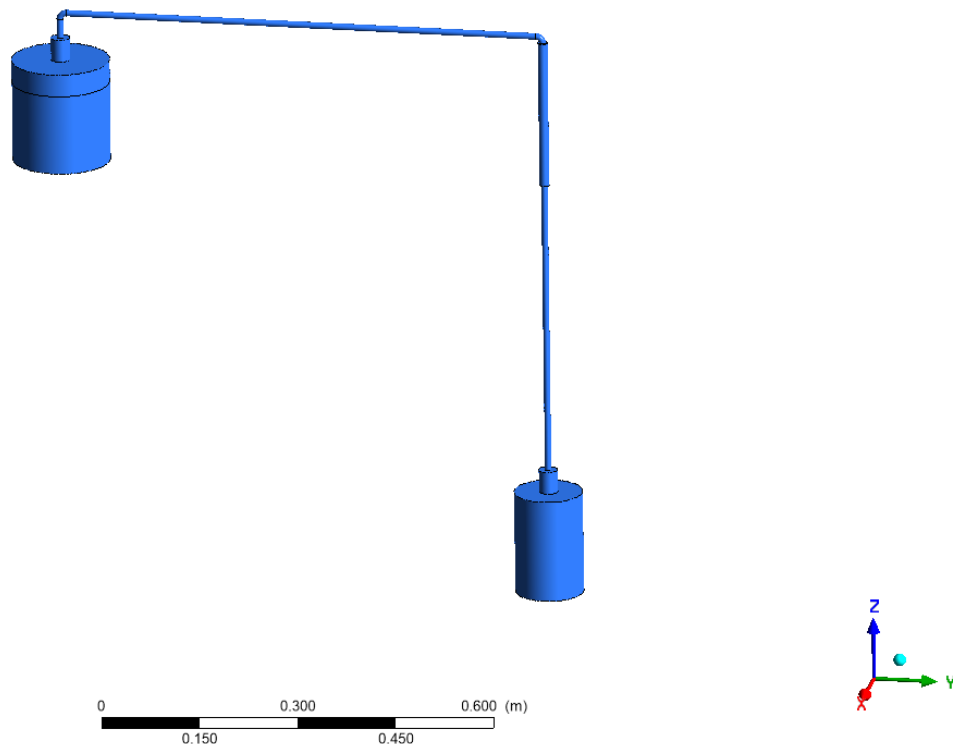
Rýchlosti vyparovania a kondenzácie v 2D modeloch experimentálnych zostáv sú obmedzené zjednodušením geometrie a neposkytujú úplne verný obraz komplexných procesov prebiehajúcich v reálnych zariadeniach. Tieto modely zanedbávajú vplyv trojrozmerného priestoru na prenos tepla a hmoty, čo môže viesť k významným odchýlkam od skutočných hodnôt. Preto je nevyhnutné overiť a optimalizovať korelačné koeficienty Lee modelu, ktoré riadia tieto procesy, na 3D modeloch, ktoré čo najpresnejšie reprezentujú reálne situácie v zariadeniach.

3.2 3D model experimentálnej zostavy

V rámci práce sa ako referenčné meranie vybralo meranie s teplotným spádom 95°C – 60°C, nakoľko pri týchto teplotách došlo k rýchlej stabilite systému a k optimálnemu vyparovaniu a kondenzácii pracovného média. Získané dáta z merania boli implementované do vytvoreného 3D modelu experimentálnej zostavy. Tento model slúžil hlavne na validáciu korelačných koeficientov Lee modelu v trojrozmernom priestore, ktorý najlepšie reprezentuje reálne situácie.

Vyparovací koeficient bol získaný z merania na experimentálnej zostave $f_{exp} = 0,002566$ a kondenzačný koeficient bol nastavený na rovnovážnu hodnotu 1, po tom, čo sa otestovalo viacero hodnôt tohto koeficientu na riešenú geometriu a nastavenia 3D modelu experimentálnej zostavy. Pre získanie presnej hodnoty koeficientu kondenzácie by bolo potrebné vykonať ďalšie meranie, ktorého cieľom by bolo získať dodatočné parametre potrebné pre jeho výpočet.

Numerická simulácia bola zameraná hlavne na analýzu a porovnanie rýchlosti vyparovania a kondenzácie medzi výsledkom z merania 95°C – 60°C a z numerickej simulácie 3D modelu experimentálnej zostavy, nastaveného podľa experimentálnych dát. Okrem toho bolo zamerané aj na porovnanie množstva vzniknutého kondenzátu v oboch prípadoch za merací čas 30 minút. Týmto spôsobom bolo možné validovať korelačné koeficienty Lee modelu, ich schopnosť predikovať dynamické správanie v reálnych podmienkach a ich vplyv na rýchlosť fázových procesov v uzatvorenom priestore. Na obr. 5 je zobrazená 3D geometria experimentálnej zostavy vytvorená v DesignModeleri programu ANSYS Fluent.



Obr. 5 3D model experimentálnej zostavy

Najskôr bola na model aplikovaná štandardná sieť s lokálnym zahustením v oblastiach stien, prechodov medzi jednotlivými časťami experimentálnej zostavy a fázových rozhraní medzi kvapalinou a parou. Počiatočnú výpočtovú sieť tvorilo 7 266 510 tetrahedrálnych buniek.

Takýto počet výpočtových buniek predstavuje značnú výpočtovú záťaž a vyššie nároky na výpočtové zdroje. Z tohto dôvodu bola výpočtová sieť prevedená na sieť polyhedrickú. Jej princíp spočíva v spájaní susedných buniek do mnohostenov – polyhedrov, pričom zachováva presnosť numerickej simulácie. Umožňuje efektívnu manipuláciu a spracovanie takto rozsiahlych výpočtových sietí, v neposlednom rade optimalizuje výpočtový proces a znižuje nároky na hardvér. Po jej aplikácii bol výsledný 3D model tvorený z 5 707 071 výpočtových polyhedrálnych buniek.

Na simuláciu medzifázového prenosu hmoty a tepla bol použitý ako aj v predchádzajúcich numerických simuláciách sub-model Evaporation – Condensation (vyparovanie-kondenzácia). Okrajové podmienky boli nastavené na základe merania pri teplotách 95°C – 60°C. Výparníková časť, tvorená v 3D geometrii nádobou s destilovanou vodou, bola nastavená na konštantnú teplotu 80,67 °C. Kondenzačná časť, ktorú tvoril kondenzátor, mala nastavenú teplotu chladenia 60°C a adiabatická časť bola zaizolovaná, aby sa predišlo tepelným stratám do okolia. Prevádzkové podmienky zahŕňali tlak 23 448 Pa, teplotu varu destilovanej vody 63,50°C a určenie smeru gravitácie. Boli definované materiálové vlastnosti vzduchu, vody, pary a zmesi, vrátane ich hustôt, tepelných kapacít, tepelných vodivostí, dynamických viskozít, molárnych hmotností, entalpií a pod.

Nastavenie riešiteľa v programe ANSYS Fluent bolo ako v predchádzajúcich numerických simuláciách, veľmi dôležité bolo nastaviť riešenie s dvojnásobnou presnosťou, ktoré zabezpečuje vyššiu

presnosť výpočtov, čo je kľúčové pre simulácie fázových premien, ako je vyparovanie a kondenzácia. Zvýšená presnosť umožňuje lepšie zachytiť jemné detaily a zmeny v teplotných a tlakových poliach, čo vedie k presnejším výsledkom simulácie. Toto nastavenie je obzvlášť dôležité pri modelovaní zložitých fyzikálnych javov, kde malé odchýlky môžu mať významný vplyv na celkové správanie systému.

Modelu bol nastavený na nestacionárne prúdenie, ktoré umožňuje simulovať dynamické zmeny v čase, ako sú fázové prechody, kolísanie teplôt a prúdov. Laminárne prúdenie predpokladá usporiadané a hladké prúdenie, kde viskózne sily dominujú nad inerciálnymi, čo je typické pre prúdenie v tepelných trubiciach s nízkymi rýchlosťami a malými priermi. Použil sa model zmesi (MIXTURE) pre simuláciu viacfázového prúdenia s fázami, ktoré sú navzájom premiešané. Bol založený na tlaku s použitím schémy SIMPLE, ktorá je vhodná pre širokú škálu prúdení. Podrelaxačné faktory boli upravené tak, aby sa zabezpečila stabilita a konvergencia numerického riešenia, čo bolo dôležité pre dosiahnutie presných výsledkov simulácie. Časové kroky boli priebežne upravované, nakoľko nebolo možné vopred presne odhadnúť, kedy nastanú fázové prechody v 3D modeli experimentálnej zostavy.

3.3 Vyhodnotenie výsledkov numerickej simulácie a laboratórneho merania

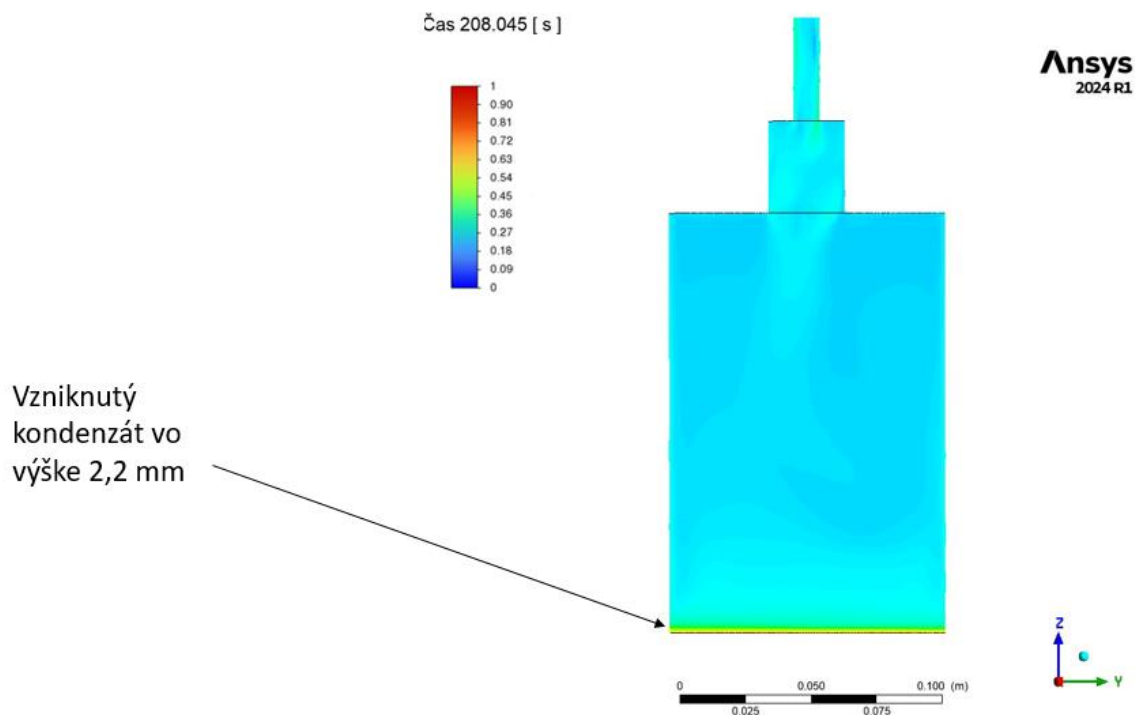
V tejto časti sú odprezentované výsledky numerickej simulácie 3D modelu experimentálnej zostavy a ich porovnanie s laboratórnym meraním. Referenčné parametre pre vyhodnotenie simulácie boli stanovené na základe experimentálnych údajov získaných z merania 95°C – 60°C. 3D numerické modely, vzhľadom na komplexnosť skúmaných javov, sú výpočtovo veľmi náročné. Simulácia, ktorej výsledky sú analyzované, vypočítala vzhľadom na výpočtovú časovú náročnosť prvých 208 sekúnd. Napriek tomu, je už v tomto štádiu možné pozorovať vznik hladiny kondenzátu, ktorá je po uplynutí 208 sekúnd vo výške 2,2 mm, čo predstavuje objem 19,05 ml.

Počas merania vzniklo v zbernej nádobe za 1800 sekúnd (30 minút) 175 ml kondenzátu, čo predstavovalo výšku hladiny v zbernej nádobe 20,3 mm. Nakoľko numerická simulácia vykazuje známky stabilizácie a konverencie, v dôsledku správne nastaveného riešiteľa modelu spolu so správne nastavenými podrelaxačnými faktormi a korelačnými koeficientami Lee modelu, je možné predpokladať, že po uplynutí 1800 sekúnd simulácie sa v zbernej nádobe kondenzátu dosiahne podobná hodnota výšky ako v experimente, konkrétne 19,04 mm, čo predstavuje objem 164,87 ml kondenzátu. Na obr. 6 je zobrazený detail zbernej nádoby, v ktorej už je 19,05 ml vzniknutého kondenzátu s výškou hladiny 2,2 mm.

Vyparovací koeficient mal hodnotu 0,002566 a kondenzačný koeficient hodnotu 1. Pri týchto hodnotách a teplotnom spáde 95°C – 60°C vznikla 5,8 % odchýlka numerickej simulácie od laboratórneho merania. Odchýlky medzi numerickej simuláciou a laboratórnym meraním môžu byť spôsobené viacerými faktormi. Mohlo to byť spôsobené zjednodušením 3D modelu oproti reálnej zostave, pretože reálne rozmery a tvary súčiastok sa môžu líšiť od ideálnych hodnôt v dôsledku výrobných tolerancií a rôznych drsností materiálu. V numerickej modeli bolo nutné zjednodušiť výpočtovú sieť experimentálnej zostavy, aby sa znížila výpočtová náročnosť. Tieto zjednodušenia mohli viesť k odchýlkam od skutočnosti, pretože mohli ovplyvniť prúdenie a prenos tepla, a tým aj výsledky numerickej simulácie.

Numerickej simulácie sa však využívajú práve preto, aby sa predišlo nákladným a časovo náročným experimentom a umožnilo skúmanie komplexných javov a procesov. Je dôležité si však uvedomiť, že numerickej simulácia je len aproximáciou reality a jej výsledky treba vždy interpretovať s ohľadom na použité zjednodušenia a možné zdroje chýb.

Napriek týmto možným odchýlkam, vytvorený 3D model experimentálnej zostavy je správne odladený a funkčný pre daný teplotný spád $95^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$. Simulácia presne predikuje vznik hladiny kondenzátu a jej objem v počiatočných fázach experimentu, čo potvrdzuje, že numerická simulácia môže byť užitočným nástrojom na predpovedanie dynamického správania sa reálnych systémov a optimalizáciu ich parametrov ešte pred samotnou výrobou a testovaním. Tento model je možné využiť na štúdium a optimalizáciu procesov vyparovania a kondenzácie v rôznych priemyselných aplikáciách, ako sú napríklad tepelné výmenníky, klimatizačné systémy a iné.



Obr. 6 Detail so vzniknutým kondenzátom v zbernej nádobe

ZÁVER

Dizertačná práca sa zaoberá zložitou problematikou viacfázových prúdení so zmenou fázy, so špecifickým zameraním na procesy vyparovania a kondenzácie v dvojfázovom prúdení. Zdôrazňuje význam presných matematických modelov a numerických simulácií pre pochopenie a predikciu správania týchto systémov.

Práca analyzuje súčasný stav riešenej problematiky a detailne popisuje numerické modely dostupné v programe ANSYS Fluent. Z nich bol vybraný model Mixture so sub-modelom Evaporation-Condensation, ktorý využíva Lee model. Tento model obsahuje dva empirické korelačné koeficienty, ktorých hodnoty ovplyvňujú rýchlosť fázových premien.

Na rozdiel od väčšiny štúdií, ktoré sa spoliehajú na prednastavené hodnoty týchto koeficientov, táto práca prináša experimentálne overenie a validáciu týchto koeficientov na experimentálnej zostave fungujúcej na princípe gravitačnej tepelnej trubice. Kombináciou teoretického rozboru a merania parametrov fázových prechodov sa dosahuje hlbšie porozumenie fyzikálnych procesov a zvýšenie presnosti simulácií. Experimentálne získané dáta boli implementované do 2D a 3D modelov experimentálnej zostavy. Zatiaľ čo 2D model neposkytol dostatočne presné výsledky, 3D model s experimentálne určeným vyparovacím koeficientom a teoretickým kondenzačným koeficientom 1 preukázal dobrú zhodu s laboratórnymi meraniami.

Táto práca prináša významný prínos pre vedecko-výskumnú oblasť, technickú prax a pedagogickú činnosť. Prehľbuje chápanie fázových premien, zvyšuje presnosť numerických simulácií, umožňuje lepšie navrhovanie tepelných zariadení a slúži ako cenný zdroj informácií pre výučbu a ďalší výskum.

Prínos pre vedecko-výskumnú oblasť

Práca prehľbuje chápanie komplexných javov fázových premien v uzavretých priestoroch, najmä procesov vyparovania a kondenzácie. Experimentálne overenie a následná validácia korelačných koeficientov v Lee modeli zvyšujú presnosť a spoľahlivosť numerických simulácií viacfázových prúdení. Stanovenie validovaných a optimalizovaných hodnôt korelačných koeficientov Lee modelu pre špecifický teplotný spád prispieva k presnejšej predikcii správania sa viacfázových systémov, čo má ďalekosiahle implikácie pre výskum a vývoj v tejto oblasti. Okrem toho, táto práca demonštruje dôležitosť kombinácie teoretického a experimentálneho prístupu pri riešení komplexných javov. Experimentálne overenie a kalibrácia numerických modelov sú nevyhnutné pre ich validáciu a zabezpečenie ich spoľahlivosti. Táto práca tak môže slúžiť ako inšpirácia pre ďalšie výskumné projekty, ktoré budú klásť dôraz na experimentálne overovanie teoretických modelov.

Prínos pre technickú prax

Práca umožňuje lepšie navrhovať a optimalizovať tepelné zariadenia, ako sú tepelné trubice, výmenníky tepla a chladiace systémy. Presnejšie modelovanie a predikcia správania sa viacfázových systémov prispeje k zvýšeniu efektivity a bezpečnosti v rôznych priemyselných odvetviach, ako je energetika, chemický priemysel či potravinárstvo, čo môže viesť k úsporám energie, zníženiu emisií a zlepšeniu celkovej výkonnosti technologických procesov.

V neposlednom rade, využitie presných simulácií a overených korelačných koeficientov môže výrazne skrátiť čas a znížiť náklady spojené s vývojom a testovaním nových tepelných trubíc. Namiesto zdĺhavého a nákladného vytvárania prototypov a testovania môžu inžinieri využiť simulácie na rýchle a efektívne overenie rôznych návrhov a optimalizácií.

Prínos pre pedagogickú činnosť

Práca slúži ako cenný zdroj informácií pre aktualizáciu a doplnenie učebných materiálov v oblasti termomechaniky a viacfázových prúdení. Demonštráciou praktického využitia numerických simulácií pri riešení komplexných inžinierskych problémov inšpiruje študentov a pedagógov k využívaniu moderných metód vo výučbe a výskume. Má potenciál významne obohatiť pedagogickú činnosť v oblasti termodynamiky, mechaniky tekutín a numerických simulácií. Práca predstavuje komplexný prístup k riešeniu problému, kombinujúci teoretický rozbor s experimentálnym overením a kalibráciou modelu. Tento prístup môže slúžiť ako vzor pre študentov a odborníkov, ktorí sa chcú naučiť, ako aplikovať teoretické poznatky v praxi a ako overovať a zlepšovať svoje modely. Naučiť sa, ako identifikovať možné zdroje chýb a nepresností, ako porovnávať výsledky rôznych modelov a ako vyvodzovať závery na základe dostupných údajov.

Okrem toho, táto práca môže slúžiť ako zdroj inšpirácie pre študentské projekty a záverečné práce. Študenti môžu nadviazať na výsledky tejto práce a skúmať ďalšie aspekty modelovania fázových prechodov v tepelných trubiciach, napríklad vplyv rôznych pracovných médií, geometrie tepelnej trubice alebo prevádzkových podmienok. Tým sa podporí rozvoj ich vedecko-výskumných schopností a prispeje sa k ďalšiemu pokroku v tejto oblasti.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Nichita, R.T.B.A. A level set method and a heat transfer model implemented into FLUENT for modeling of microscale two phase flows. AVT-178 Specialists' Meeting on System Level Thermal Management for Enhanced Platform Efficiency, Bucharest, Romania, 2010.
- [2] Sun, D., Xu, J., Wang, L. Development of a vapor–liquid phase change model for volume-of-fluid method in FLUENT. *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 39 (2012) 1101–1106.
- [3] Schrage, R.W. (1953): *A Theoretical Study of Interphase Mass Transfer*, Columbia University Press, New York, Chichester, West Sussex.
- [4] Tanasawa, I. (2008): "Advances in Condensation Heat Transfer," Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106, Japan. Available online 30 May 2008.
- [5] Lee, W. H. A Pressure Iteration Scheme for Two-Phase Flow Modeling. In: Veziroglu, T. N. (ed.), *Multiphase Transport Fundamentals, Reactor Safety, Applications*, Hemisphere, Washington, DC, 1980.
- [6] Alizadehdakhel, A., Rahimi, M., Alsairafi, A. A. CFD Modeling of Flow and Heat Transfer in a Thermosyphon. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, vol. 37, pp. 312–318, 2010.
- [7] Fadhl, B., Wrobel, L. C., Jouhara, H. (2013): "Numerical modelling of the temperature distribution in a two-phase closed thermosyphon," *Applied Thermal Engineering*, October 2013, vol. 60(1-2), pp. 122-131. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.06.044.
- [8] Asmaie, L., Haghshenasfard, M., Mehrabani-Zeinabad, A., Nasr Esfahany, M. (2013): Thermal performance analysis of nanofluids in a thermosyphon heat pipe using CFD modeling, *Heat Mass Transfer*, vol. 49, pp. 667–678.
- [9] Xu, Z., Zhang, Y., Li, B., Huang, J. (2016): Modeling the phase change process for a two-phase closed thermosyphon by considering transient mass transfer time relaxation parameter, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 101, pp. 614–619.

- [10] De Schepper, S. C. K., Heynderichx, G. J., Marin, G. B. Modeling the Evaporation of a Hydrocarbon Feedstock in the Convection Section of a Steam Cracker. *Comput. Chem. Eng.*, vol. 33, pp. 122–132, 2009.
- [11] Yang, Z., Peng, X. F., Ye, P. Numerical and Experimental Investigation of Two Phase Flow during Boiling in a Coiled Tube. *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 51, pp. 1003–1016, 2008.
- [12] Wang, P. T., Sun, H. W., Wong, P. Y., Fukuda, H., Ando, T. Modeling of Droplet-Based Processing for the Production of High-Performance Particulate Materials Using the Level Set Method. *Numer. Heat Transfer A*, vol. 61, pp. 401–416, 2012
- [13] Jouhara, H., Merchant, H. (2011): "Experimental investigation of a thermosyphon based heat exchanger used in energy efficient air handling units," Nuclear Engineering Department, Atomic Energy Commission
- [14] Alty, T. (2009): "The maximum rate of evaporation of water," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science: Series 7*, Published online: 03 Apr 2009.
- [15] Peng, J., Chen, D., Xu, J., Hu, L., Liu, H. CFD simulation focusing on void distribution of subcooled flow boiling in circular tube under rolling condition. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 156, 119790. ISSN 0017-9310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119790.
- [16] Saleem, A., Farooq, S., Karimi, I. A., Banerjee, R. Wall superheat at the incipient nucleate boiling condition for natural and forced convection: A CFD approach. *Computers & Chemical Engineering*, 2020, 134, 106718. ISSN 0098-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.compchemeng.2019.106718.
- [17] Pothukuchi, H., Kelm, S., Patnaik, B. S. V., Prasad, B. V. S. S. S., Allelein, H.-J. CFD modeling of critical heat flux in flow boiling: Validation and assessment of closure models. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 150, 651–665. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.01.030.
- [18] Wang, X., Wang, Y., Chen, H., Zhu, Y. A combined CFD/visualization investigation of heat transfer behaviors during geyser boiling in two-phase closed thermosyphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 121, 703–714. ISSN 0017-9310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.005.
- [19] Soleimani, A., Sattari, A., Hanafizadeh, P. Thermal analysis of a microchannel heat sink cooled by two-phase flow boiling of Al₂O₃ HFE-7100 nanofluid. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, 20, 100693. ISSN 2451-9049. Dostupné z: doi:10.1016/j.tsep.2020.100693.
- [20] Zhang, R., Cong, T., Tian, W., Qiu, S., Su, G. Effects of turbulence models on forced convection subcooled boiling in vertical pipe. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 80, 293–302. ISSN 0306-4549. Dostupné z: doi:10.1016/j.anucene.2015.01.039.
- [21] Iloiev, A., Samigulin, M., Ustinenko, V., Kucherova, P., Tentner, A., Lo, S., Splawski, A. Advances in the modeling of cladding heat transfer and critical heat flux in boiling water reactor fuel assemblies. *Proceedings - 12th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH-12*, 2007.
- [22] Wallis, G. B. *One-dimensional Two-phase Flow*. McGraw-Hill Book Co., 1969.
- [23] Hewitt, G., Hall Taylor, N. S. *Annular Two-phase Flow*. Pergamon Press, Oxford, 1970.
- [24] Collier, J. *Convective Boiling and Condensation*. McGraw Hill, London, 1972.
- [25] Govier, G. W., Aziz, K. *The Flow of Complex Mixtures in Pipes*. Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1972.
- [26] Ishii, M. *Thermally Induced Flow Instabilities in Two-phase Mixture in Thermal Equilibrium*. Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 1971.
- [27] Kocamustafaogullari, G. *Thermo-fluid Dynamics of Separated Two-phase Flow*. Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 1971.

- [28] Tong, L.S., Tang, Y.S. Boiling Heat Transfer And Two-Phase Flow. Taylor & Francis, 1997. Second Edition. ISBN 1-56032-458-6.
- [29] Stehlík, P. Two-Phase Flow. Ústav procesního inženýrství VUT v Brně, 30. říjen 2016.
- [30] Akhtar, M. W., Kleis, S. J. Boiling Flow Simulations on Adaptive Octree Grids. *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 53, pp. 88–99, 2013.
- [31] Blejchař, T. Návody do cvičení „modelování proudění“ - CFX. Ostrava, Technická univerzita, 2009, 138 s.
- [32] Drábková, S. Mechanika tekutin. Ostrava: Editní středisko VŠB – TUO, 2007. 257 s. ISBN 978-80-248-1508-4.
- [33] Fang, C., David, M., Rogacs, A., Goodson, K. Volume of Fluid Simulation of Boiling Two-Phase Flow in a Vapor-Venting Microchannel. *Frontiers Heat Mass Transfer*, vol. 1, pp. 1–11, 2010.
- [34] Ganapathy, H., Shooshtari, A., Choo, K., Dessiatoun, S., Alshehhi, M., Ohadi, M. Volume of Fluid-based Numerical Modeling of Condensation Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics in Microchannels. *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 65, pp. 62–72, 2013.
- [35] Guo, D. Z., Sun, D. L., Li, Z. Y., Tao, W. Q. Phase Change Heat Transfer Simulation for Boiling Bubbles Arising from a Vapor Film by VOSET Method. *Numer. Heat Transfer A*, vol. 59, pp. 857–881, 2011.
- [36] Hirt, C. W., Nichols, B. D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundary. *J. Comput. Phys.*, vol. 39, pp. 201–225, 1981.
- [37] Huang, M., Wu, L. L., Chen, B. A Piecewise Linear Interface-Capturing Volume-of-Fluid Method Based on Unstructured Grids. *Numer. Heat Transfer B*, vol. 61, pp. 412–437, 2012.
- [38] Incropera, F. et al. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6 vyd. United States of America: Library of Congress Cataloging-in. 2007. ISBN-10: 0-471-45728-0.
- [39] Jaščúr, M., Hnatič, M. Úvod do termodynamiky. Košice: Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, 2013. ISBN 978-80-8152-045-7.
- [40] Jayanta, S. Condensation and Its Modes. [Online] [Dátum: 26. 4. 2019.] <http://www.engineeringenotes.com/thermal-engineering/condensation/condensation-and-its-modes-heat-transfer-thermal-engineering/30500>.
- [41] Jeon, S. S., Kim, S. J., Park, G. C. Numerical Study of Condensing Bubble in Subcooled Boiling Flow Using Volume of Fluid Model. *Chem. Eng. Sci.*, vol. 66, pp. 5899–5909, 2011.
- [42] Juráš, F. Kondenzátor páry. [Online] 2017. [Dátum: 12. 3. 2019.] https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=150432.
- [43] Kozubková, M. Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2011. 174 s. ISBN 978-80-248-2491-8.
- [44] Mao, W. B. Numerical Simulation of Vapor-Liquid Phase Change Heat Transfer and Micromixing in Microfluidic Systems. Master's thesis, GuangZhou Institute of Energy Conversion Chinese Academy of Sciences, China, 2009.
- [45] Mířek, R. Výpočty kondenzátorů páry. [Online] 2013. [Dátum: 2. 2. 2019.] https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65399.
- [46] Nemeč, P., Malcho, M., Lenhard, R. Využitie tepelných trubíc pri chladení a ohreve v technike. Žilina : EDIS - vydavateľské centrum Žilinskej univerzity, 2015. ISBN 978-80-554-1075-3.
- [47] ANSYS Fluent theory guide, (2023) dostupné na: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v232/en/flu_th/flu_t_h.html
- [48] Osher, S., Sethian, J. A. Fronts Propagating with Curvature Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations. *J. Comput. Phys.*, vol. 79, pp. 12–49, 1988.

- [49] Osher, S., Fedkiw, R. P. Level Set Methods: An Overview and Some Recent Results. *J. Comput. Phys.*, vol. 169, pp. 463–502, 2001.
- [50] Pan, L. M., Tan, Z. W., Chen, D. Q., Xue, L. C. Numerical Investigation of Vapor Bubble Condensation Characteristics of Subcooled Flow Boiling in Vertical Rectangular Channel. *Nuclear Eng. Des.*, vol. 248, pp. 126–136, 2012.
- [51] Prakash, C. Two phase model for binary liquid-solid phase change: Parts I and II. *Numerical Heat Transfer*. 18(2), 131-167, 1990.
- [52] Rose, J. W. Condensation of a pure vapor. [Online] 9. Február 2011. [Dátum: 17. 2. 2019.] <http://www.thermopedia.com/content/652/>.
- [53] Rusnáková, A. Numerická simulácia prenosu tepla pri vyparovaní a kondenzácii v uzavretom priestore. [Online] 19. Máj 2016. [Dátum: 26. 4. 2019.] <https://opac.crzp.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=A86BEDB9942C84EDDA96358BE596>.
- [54] Sazima, M. Sdílení tepla. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1993. 720 s. ISBN 80-03-00675-9.
- [55] Stephan, K. Heat and mass transfer. Berlin: Springer, 2006. 668 s. ISBN 3-540-63695-1.
- [56] Szturc, P., Vomočil, Z. Aplikace technologie horkých trubíc k využití odpadního tepla ve valcovnách, kovárnách a slévárnách – teoretický rozbor. Dostupné na internete http://www.forsteel.cz/ForSTEEL_HL_4_2008.pdf.
- [57] Timár, P. Modelovanie prestupu tepla v stekajúcom filme. [Online] 26. Máj 2013. [Dátum: 25. 3. 2019.] <https://opac.crzp.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=B4445163FE48F42C5651E84577B7>.
- [58] VDI heat atlas: Verein Deutscher Ingenieure, VDI- Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) ed. – 2nd ed.- Heidelberg: Springer, 2010.
- [59] Vypařování, var, sublimace. [Online] [Dátum: 6. 5 2019.] www.zakovska-havirov.cz/files/VyparVarSubl.doc.
- [60] Wallis, G. B. One-dimensional Two-phase Flow. McGraw-Hill Book Co., 1969.
- [61] Welch, S. W. J., Wilson, J. A Volume of Fluid Based Method for Fluid Flows with Phase Change. *J. Comput. Phys.*, vol. 160, pp. 662–682, 2000.
- [62] Wu, H. L., Peng, X. F., Ye, P., Gong, Y. Simulation of Refrigerant Flow Boiling in Serpentine Tubes. *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 50, pp. 1186–1195, 2007.
- [63] Youngs, D. L. Time-Dependent Multi-Material Flow with Large Fluid Distortion. In: K. W. Morton and M. J. Baines (eds.), *Numerical Method for Fluid Dynamics*, pp. 273–285, Academic Press, New York, 1982.
- [64] heatpipe.nl 2021. Dutch knowledge center for heat pipe technology. Dostupné na internete: <http://www.heatpipe.nl/index.php?page=heatpipe&lang=EN>
- [65] ANSYS Theory Guide: Dostupné na internete: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v241/en/flu_th/flu_th.html

Zoznam vlastných vedeckých publikácií

- Zvada, B.; Nosek, R.; Holešová, N.; Klačko, A.; Šavrnoch, Z. Konvenčné spôsoby výroby vodíka z fosílnych palív. 2022. *Technológ, Žilina (Slovensko): Žilinská univerzita v Žiline*. ISSN 1337-8996. ISSN (online) 2730-0501. Roč. 14, č. 1, s. 83-87.

- Holešová, N.; Lenhard, R.; Klačko, A.; Zvada, B. Analýza viacfázových modelov transportu tepla v programe ANSYS Fluent. 2022. Technológ. Žilina (Slovensko): Žilinská univerzita v Žiline. ISSN 1337-8996. ISSN (online) 2730-0501. Roč. 14, č. 1, s. 53-58.
- Lenhard, R.; Holešová, N. Analýza korelačných koeficientov Leeho modelu pri multifázovom prúdení tekutín v tepelnej trubici. 2023. In: Konferencie užívateľů Ansys 2023 sborník konference / Sošková, I. 1. vyd. Praha (Česko): Praha TechSoft Engineering. ISBN 978-80-907196-4-4, s. [1-8].
- Holešová, N.; Lenhard, R.; Patsch, M.; Malcho, M. Vizualizácia prúdenia pri stene zdroja tepla s prenosom tepla do okolia pomocou prirodzenej konvekcie. 2021. In: Alternatívne zdroje energie, 1. vyd. [s.l.] (Slovensko): EnergiaWeb.sk. ISBN 978-80-972992-7-9, s. [1-6].
- Malcho, M.; Jandačka, J.; Martvoňová, L.; Holešová, N. Možnosti využitia odpadového tepla spalín z malých zdrojov tepla pomocou tepelných trubíc na akumuláciu do teplej vody a na zvýšenie účinnosti zdroja tepla. 2023. In: Vykurovanie 2023 , 1. vyd. Bratislava (Slovensko): Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia. ISBN 978-80-8284-006-6, s. 79-85.
- Lenhard, R.; Kaduchová, K.; Holešová, N. The application of experimental and numerical methods in fluid mechanics and energy, 40th Meeting of the departments of fluid mechanics and thermomechanics; 2022. 1. vyd. Žilina (Slovensko): Žilinská univerzita v Žiline. 55 s.. ISBN 978-80-554-1901-5.
- Klačko, A.; Holubčík, M.; Holešová, N.; Zvada, B. Energetické zhodnocovanie komunálneho odpadu na Slovensku. 2022. In: RESpect 2022 , Technická univerzita v Košiciach. ISBN 978-80-553-4123-1, s. 20-23.
- Holešová, N.; Nicolanská, M.; Holubčík, M. Analýza emisií z malých zdrojoch vykurovacích zariadení. 2022. In: RESpect 2022 , 1. vyd. Košice (Slovensko): Technická univerzita v Košiciach. ISBN 978-80-553-4123-1, s. 7-13.
- Holešová, N.; Lenhard, R.; Kaduchová, K.; Holubčík, M. Application of particle image velocimetry and computational fluid dynamics methods for analysis of natural convection over a horizontal heating source. 2023. Energies , Roč. 16, č. 10, s. [1-13]. DOI 10.3390/en16104066
- Klačko, A.; Holubčík, M.; Holešová, N.; Zvada, B. Energetické zhodnocovanie komunálneho odpadu na Slovensku. 2022. Technológ, Žilina (Slovensko): Žilinská univerzita v Žiline. ISSN 1337-8996. ISSN (online) 2730-0501. Roč. 14, č. 1, s. 63-67.
- Nicolanská, M.; Holubčík, M.; Holešová, N. Konceptný návrh bezdrôtového monitorovacieho systému emisií pre vykurovacie zariadenia na tuhé palivá. 2022. Technológ , Žilina (Slovensko): Žilinská univerzita v Žiline. ISSN 1337-8996. ISSN (online) 2730-0501. Roč. 14, č. 1, s. 72-78.
- Holešová, N.; Lenhard, R.; Kaduchová, K.; Malcho, M. Correlation coefficients in Lee's model of multiphase flows. 2022. In: 40th Annual Conference - Meeting of the Departments of Fluid Mechanics and Thermomechanics in the connection with XXIII. International Scientific Conference - The Application of Experimental and Numerical Methods in Fluid Mechanics and Energy , 1. vyd. Les Ulis (Francúzsko): Édition Diffusion Presse Sciences. s. [1-9], DOI 10.1051/mateconf/202236901001
- Holešová, N.; Lenhard, R.; Kaduchová, K. Multifázové modely transportu tepla v ANSYS Fluent. 2022. In: Konferencie a setkání uživatelů Ansys 2022, 1. vyd. Praha (Česko): Praha TechSoft Engineering. ISBN 978-80-907196-3-7, s. [1-7].
- Lenhard, R.; Holešová, N.; Kaduchová, K. Numerical investigation of the influence of size, condensation and evaporation coefficients on the power of the heat pipe. 2023. In: Joint 21st International Heat Pipe Conference and 15th International Heat Pipe Symposium, 1. vyd., Heatpipeaus, 2023, s. [1-7]

RESUME

Táto dizertačná práca sa zaoberá numerickým modelovaním vyparovania a kondenzácie v uzavretom priestore. Hlavným cieľom bolo experimentálne overiť a validovať korelačné koeficienty Lee modelu, ktoré sú kľúčové pre presnú predikciu správania sa týchto systémov. Po úvodnej 2D simulácii a následnej kalibrácii bol vytvorený detailný 3D model experimentálnej zostavy. Na tomto modeli boli vykonané merania na získanie experimentálnych hodnôt vyparovacieho koeficientu, zatiaľ čo kondenzačný koeficient bol stanovený na rovnovážnu hodnotu 1. Výsledky numerickej simulácie 3D modelu boli porovnané s laboratórnym meraním pri teplotnom spáde $95^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$. Simulácia predikovala vznik hladiny kondenzátu a jej objem v počiatočných fázach experimentu, s odchýlkou 5,8%. Práca prináša významný prínos pre vedecko-výskumnú oblasť, technickú prax a pedagogickú činnosť. Experimentálne overenie a validácia korelačných koeficientov v Lee modeli zvyšujú presnosť a spoľahlivosť numerických simulácií viacfázových prúdení. Stanovenie validovaných hodnôt koeficientov pre špecifický teplotný spád prispieva k presnejšej predikcii správania sa viacfázových systémov. V technickej praxi práca umožňuje lepšie navrhovať a optimalizovať tepelné zariadenia, čo vedie k úsporám energie a zlepšeniu výkonnosti technologických procesov.

SUMMARY

This dissertation focuses on the numerical modelling of evaporation and condensation in a closed space. The main objective was to experimentally verify and validate the correlation coefficients of the Lee model, which are crucial for accurate prediction of the behaviour of these systems. After an initial 2D simulation and subsequent calibration, a detailed 3D model of the experimental setup was created. Measurements were performed on this model to obtain experimental values for the evaporation coefficient, while the condensation coefficient was set to an equilibrium value of 1. The results of the 3D model numerical simulation were compared with laboratory measurements at a temperature gradient of $95^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$. The simulation accurately predicted the formation of the condensate level and its volume in the initial phases of the experiment, with a deviation of 5.8%. This work brings significant contributions to scientific research, technical practice, and pedagogical activities. The experimental verification and validation of the correlation coefficients in the Lee model increase the accuracy and reliability of numerical simulations of multiphase flows. The determination of validated coefficient values for a specific temperature gradient contributes to a more accurate prediction of the behaviour of multiphase systems. In technical practice, this work enables better design and optimization of thermal devices, leading to energy savings and improved performance of technological processes.

