

doc. Ing. Lubomír Klimeš, Ph.D.

Energetický ústav

Fakulta strojního inženýrství

Vysoké učení technické v Brně

Oponentní posudek dizertační práce

Autor práce: **Ing. Libor Kudela** z EÚ, FSI, VUT v Brně

Školitel: **doc. Ing. Jiří Pospíšil** z EÚ, FSI, VUT v Brně

Název práce: **Optimalizace simulací komponent teplotních soustav**

Aktuálnost tématu dizertační práce

Předložená dizertační práce se zabývá výpočtovým modelováním teplotních rozvodů. Hlavním cílem práce je vytvoření originálního modelu advekce teplotní tekutiny v rozvodném potrubí, který bude zahrnovat vliv několika souvisejících jevů. Model pak bude možné následně použít pro predikci charakteristických veličin a odezvy teplotního rozvodu na dynamické stavy v tomto rozvodu. Téma dizertační práce lze z tohoto pohledu považovat za aktuální a velmi perspektivní. Důvodem je skutečnost, že efektivní využívání energetických zdrojů, zvyšování energetické účinnosti a snižování energetické závislosti ČR na zahraničních zdrojích jsou v současné době velmi diskutovaná témata. Toto potvrzuje také na konci roku 2022 oznámený záměr vlády ČR o výstavbě horkovodu z JE Dukovany do města Brna a s tím související problematika, která je úzce provázaná s předkládanou dizertační prací.

Splnění stanoveného cíle dizertační práce

Autor vymezil hlavní cíl své dizertační práce v kapitole 4, který je formulován spíše obecně jako studium matematického modelování proudění v horkovodech se zaměřením na přechodové jevy. K tomuto obecnému cíli je ale ve stejné kapitole vytyčeno 12 dílčích cílů (kroků), které jsou již formulovány jednoznačně a dostatečně konkrétně. Současně jsou také formulovány dvě vědecké otázky a k nim pracovní hypotézy, které autorovi slouží jako nástroj pro zodpovězení položených otázek. V následující obsáhlé kapitole 5 pak autor postupně rozebírá a navrhuje řešení jednotlivých dílčích cílů a kroků, které pak dále detailněji analyzuje a porovnává. V kapitole 6 pak následuje prezentace a rozbor výsledků konkrétních úloh. V této části je také uvedena validace vyvinutého vlastního modelu proudění v teplotním rozvodu pomocí experimentálních dat, které byly převzaty od organizace IBPSA. Na základě informací uvedených v kapitolách 5 a 6 je možné konstatovat, že autor všechny vytyčené dílčí cíle splnil, a tedy splnil i hlavní cíl dizertační práce.

Postup řešení problému a výsledky dizertační práce

Autor nejdříve provedl rešerši způsobů modelování proudění v teplotních rozvodech a kriticky zhodnotil publikované práce, které se tímto tématem zabývají. Na základě této rešerše pak navrhnul koncepci vlastního modelu proudění teplotního média v teplotním rozvodu, kterou implementoval do podoby výpočtového modelu. Následně pak tento model rozšířil o další důležité jevy, které ovlivňují chování teplotního rozvodu. Mezi tyto jevy patří šíření teplotní fronty (skoková změna teploty teplotního média na vstupu do rozvodu) se zohledněním axiální difúze, tepelná interakce média s potrubím zahrnující akumulaci tepelné energie do samotného potrubí (“ohřátí” či “ochlazení” potrubí podle teploty proudícího média), zahrnutí vlivu izolace (resp. vícevrstvého složení potrubí) a tepelná interakce potrubí se zemí, do které je potrubí uloženo. Autor se také zaměřil na řešení inverzní úlohy, tj. na stanovení parametrů teplotní tekutiny na vstupu do rozvodu na základě požadovaných parametrů této tekutiny v určitém místě uvnitř rozvodu. Jednotlivé jevy zahrnuté do modelu jsou podrobně analyzovány a porovnány s dalšími dostupnými informacemi. Způsob zohlednění některých těchto dílčích jevů a jejich integrace do modelu lze považovat za originální a původní. Autor rovněž své myšlenky až na výjimky dobře formuluje a dobře zdůvodňuje svá tvrzení a závěry. Z prezentovaných výsledků v kapitole 6 jednoznačně vyplývá, že vytvořené modely lze celkově považovat za originální a ve výkonnostních parametrech (přesnost, rychlost) překonávající modely publikované v literatuře.

Slabším místem zpracování dizertační práce je přehled současného stavu poznání, který je poměrně stručný, zahrnuje pouze malé množství výzkumných prací (celkový počet zdrojů uvedených v dizertační práci bez vlastních prací autora je pouze 21) a zaměřuje se pouze na způsoby modelování proudění v rozvodech. Zcela jsou v rešerši pominuty výzkumné práce, které se zaměřují např. na modelování interakce potrubí se zemí, řešení inverzních úloh nebo na praktické využití modelů např. pro návrh či optimalizaci potrubí v teplotní síti. Detailnější přehled současného stavu poznání a jeho kritická analýza by pak umožnily autorovi detailnější srovnání výsledků, zobecnění výsledků a také identifikaci dalšího potenciálního využití modelu. V textu se rovněž vyskutují některá tvrzení či informace, která jsou příliš stručná a strohá a by bylo vhodnější více vysvětlit, rozebrat do detailu či je podložit (např. faktor 10^3 uvedený ve vztahu (5.28) nebo způsob řešení redukovaného modelu uvedeného na obrázku 37).

Význam pro praxi nebo rozvoj oboru

Jak je již uvedeno výše, autor dizertační práce výsledky získané prostřednictvím svých modelů srovnal s porovnatelnými výsledky, které byly publikovány v literatuře a rovněž s experimentálními daty, které byly poskytnuty organizací IBPSA. Porovnání těchto výsledků a dat jednoznačně ukazuje, že modely vyvinuté autorem dizertační práce jsou velmi přesné a rychlejší (výpočtově efektivnější) než modely publikované v literatuře. Z tohoto pohledu lze tedy vyvinuté modely považovat za nástroje, který mají velký potenciál jak k rozvoji oboru, tak i v praktickém využití. Zejména výpočtová efektivita s relativním výpočtovým časem výrazně menším než 1 skrývá potenciál pro využití těchto modelů pro návrh, (real-time) řízení a (real-time) optimalizaci rozsáhlých teplotních rozvodů.

Konkrétní přínos doktoranda

Z výše uvedeného již vyplývá, že konkrétním přínosem doktoranda jsou vlastní výpočtové modely pro komplexní řešení proudění a tepelného chování teplotnosné tekutiny v rozvodném potrubí teplotrenské sítě. Tyto modely ve výkonostních parametrech (přesnost, rychlost) překonávají současné modely publikované v literatuře.

Autor dizertační práce jejich zpracováním prokázal, že je schopen řešit multidisciplinární problém, navrhnout a implementovat postupy pro jeho řešení, provádět analýzu získaných výsledků a vyvozovat z nich závěry. Z dizertační práce vyplývá, že autor se velmi dobře orientuje v problematice teplotrenských sítí, numerické matematice, programování a výpočtovém modelování a simulacích.

Formální úprava dizertační práce a její jazyková úroveň

Z pohledu formální úpravy a jazykové úrovně bohužel dizertační práce trpí mnohými nedostatky. Do značné míry se zřejmě jedná o autorovu neznalost obecně platných zvyklostí a současných směrnic a norem platných na VUT v Brně, které upravují formální požadavky kladené na závěrečné práce. Mezi formální nedostatky patří např. používání anglických popisků v obrázcích, přestože je práce v češtině, chybějící odkazy na obrázky v textu, nesprávné uvádění typu objektu v křížových odkazech (např. "viz Obr. 1" místo správného "viz obr. 1") nebo uvádění popisku tabulky pod tabulkou místo nad tabulkou. Pod rovnicemi se často objevuje text, který je bezdůvodně vysázen menší velikostí fontu než ostatní text, čímž je hůře čitelný. V textu autor používá názvy veličin, které neodpovídají ustálené terminologii a text je tak hůře srozumitelný, některé veličiny jsou dokonce v různých částech práce nazývány jiným termínem (např. "koeficient vedení tepla" na straně 33, "specifická tepelná vodivost" na straně 37, "tepelná vodivost" na straně 46, nikde v práci ale není uveden správný termín "součinitel tepelné vodivosti"). Přestože se v práci vyskytuje velké množství symbolů, práce neobsahuje jejich seznam, ve kterém by bylo možné vyhledávat. Značná část rozměrů jednotlivých veličin není uvedena správně, protože v horních indexech chybí záporné znaménko (např. hustota a součinitel přestupu tepla na straně 33). Název podkapitoly 5.6 "Optimalizace modelu potrubí s izolací" a užívání slova "optimalizace" je v tomto smyslu (alespoň pro oponenta) matoucí, protože se jedná o ladění parametrů modelu na základě konkrétních experimentálních dat. V prohlášení a poděkování v úvodní části práce je odkazováno na pojednání, přestože se jedná o dizertační práci. Název práce na titulním listu se liší od názvu uváděném v citaci na straně 3 a v nadpisu na straně 4. V citaci práce na straně 3 je uveden chybný rok. V dizertační práci se rovněž nachází větší množství gramatických chyb.

Přestože se v práci vyskytuje celá řada formálních chyb a nedostatků, tyto chyby a nedostatky nikterak nesnižují vědeckou úroveň a kvalitu dizertační práce a výsledků v ní uvedených.

Otázky a dotazy k rozpravě a diskuzi

- V kapitole 5.4 jsou uvedeny výsledky řešení proudění pomocí simulačního CFD softwaru, ze kterých vyplývá, že zohlednění nebo nezohlednění gravitace má poměrně velký vliv na tvar postupující teplotní fronty a axiální disperze v potrubí. Považuje autor tento vliv za důležitý z hlediska návrhu a optimalizace rozvodné teplotrenské sítě, tj. je

zapotřebí tento vliv do stávajícího modelu rovněž zaintegrovat? Nebo lze vliv gravitace považovat pro tyto účely jako nevýznamný?

- Na stranách 36 a 37 je popsán způsob modelování vícevrstvého potrubí a odvozeny vztahy pro výpočet tepelných kapacit jednotlivých uzlů. V textu je uvedeno, že tepelné kapacity uzlů lze stanovit ze vztahu (5.22) za předpokladu lineárního průběhu teploty v elementech. Dále je uvedeno, že průběh teplot v cylindrickém systému je ale logaritmického charakteru a pro přesnější stanovení tepelné kapacity je zapotřebí použít vztah (5.23). V textu ale chybí zdůvodnění, proč je tepelná kapacita elementu závislá na průběhu teploty a také chybí podrobnější odvození vztahu (5.23) nebo podložení jeho znění uvedením zdroje (citací). Během obhajoby by měl autor práce detailněji tuto část vysvětlit.
- V podkapitole 5.9 je vysvětlena koncepce redukováného modelu pro vedení tepla mezi potrubím a zemínou, do které je toto potrubí uloženo. Obrázek 37 ale není okomentován detailně a chybí v něm popisky nebo popis jednotlivých elementů. Během obhajoby by měl autor práce obsah obrázku detailněji vysvětlit. Zvažoval autor práce pro snížení výpočtové náročnosti konečně-prvkového modelu využití metod a algoritmů strojového učení (machine learning) a tzv. meta-modelů (surrogate models), např. neuronových sítí? Pokud ano, jaké důvody vedly k použití koncepce uvedené v dizertační práci?
- V dizertační práci je uvedeno, že výpočetní efektivitu (rychlost) vyvinutého modelu by bylo možné dále zvýšit paralelizací. Velký potenciál pro tento účel nabízí grafické karty (označované jako GPU) ve spojení se vhodným běhovým prostředím (např. CUDA). Bylo by možné tento přístup a grafické karty použít pro paralelizaci vyvinutého modelu?

Závěrečné hodnocení a stanovisko oponenta

Doktorand Ing. Libor Kudela předloženou dizertační prací prokázal tvůrčí schopnosti v dané oblasti výzkumu a rovněž prokázal, že je schopen samostatně a na potřebné odborné úrovni řešit vědecký problém. Z dizertační práce rovněž vyplývá, že se její autor velmi dobře orientuje v problematice teplotních sítí, numerické matematice, programování a výpočtovém modelování a simulacích. Získané výsledky lze považovat za původní a originální, které přispívají k poznání a dalšímu rozvoji v dané oblasti. Výsledky své tvůrčí činnosti v oblasti dizertační práce publikoval ve 2 publikacích v časopisech s impaktním faktorem (IF). Kromě toho autor také publikoval dalších 5 článků v časopisech s IF, které se týkaly dalšího jiného výzkumu. Dizertační práce splňuje podmínky uvedené v § 47, odstavci 4 zákona č. 11/1998 Sb. o vysokých školách, a proto ji doporučuji k obhajobě před komisí.

V Brně dne 24. května 2023.

doc. Ing. Lubomír Klimeš, Ph.D.

oponent dizertační práce