prof. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Studentská 2, 461 17 Liberec
Česká republika

Posudek disertační práce

Ing. Patrik Rapta – Přenos tepla v pístovém kompresoru

Autor práce:	Ing. Patrik Rapta
Název práce:	Heat Transfer in a Reciprocating Compressor / Přenos tepla v pístovém kompresoru
Typ práce:	Disertační práce
Pracoviště:	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav
Školitel:	prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc.
Oponent:	prof. Ing. Václav Dvořák, Ph.D., Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní

1. Aktuálnost tématu disertační práce

Disertační práce Ing. Patrika Rapty se zabývá okamžitým přestupem tepla mezi plynem a vnitřními povrchy válce pístového kompresoru. Téma je aktuální jak z hlediska základního poznání nestacionárního konvekčního přestupu tepla, tak z hlediska zpřesňování nízkorozměrných modelů kompresorů i z hlediska úspor energie. Přestup tepla ovlivňuje teplotu nasávané náplně, objemovou a izoentropickou účinnost i tepelné namáhání jednotlivých částí stroje. Přesto se v systémových výpočtech nadále používají empirické korelace, jejichž okamžitý průběh a přenositelnost mezi různými stroji a pracovními látkami nejsou dostatečně experimentálně doloženy.

Práce proto řeší odborně relevantní problém. Za zvlášť přínosné považuji zaměření na fázově rozlišený lokální tepelný tok, nikoli pouze na integrální teploty a účinnosti. Volba tématu odpovídá současnému směru vývoje fyzikálně věrnějších modelů pístových kompresorů a je vhodná pro disertační práci v oboru strojního a energetického inženýrství.

2. Splnění stanovených cílů

Autor si formuloval tři cíle: identifikovat tepelné toky ve válci pístového kompresoru, určit součinitele přestupu tepla na vybraných površích válce a ověřit bezrozměrné korelace používané k předpovědi přestupu tepla ve válci.

Cíle považuji za podstatně splněné. Časově proměnný tok byl rekonstruován na třech místech a na ventilové desce vznikl použitelný dvousložkový popis součinitele

přestupu tepla. Na vložce válce je však kvalita identifikace podstatně horší; u jednoho snímače nedosahuje proložení použitelné kvality a nad tlakovým poměrem přibližně 4,4 nelze součinitel spolehlivě určit. Předpoklad jediné dobře promíchané teploty plynu zde přestává být vhodný. Porovnání korelací je systematické, avšak platí pro zkoušený stroj a data, nikoli jako obecná validace pro jiné geometrie a pracovní látky. Hypotéza H1 je přesvědčivá pro změny směru toku, ne však dosud pro jeho nenulovou střední hodnotu.

Hypotézy H2 a H3 jsou podpořeny pro testovaný soubor dat a vybrané povrchy, ale jejich formulace v závěru práce je širší než rozsah provedeného experimentu.

3. Postup řešení problému a konkrétní přínosy doktoranda

Metodika kombinuje rychlé měření povrchové teploty zapuštěnými koaxiálními termočlánky, inverzní stanovení lokálního tepelného toku pomocí řešení polonekonečného tělesa, fázově rozlišené měření tlaků ve válci a komorách a rekonstrukci okamžité teploty plynu nulodimenzionálním termodynamickým modelem. Experiment byl proveden na otevřeném vzduchovém kompresoru Orlík EK 4-2 v několika provozních bodech s tlakovým poměrem přibližně od čtyř do jedenácti. Autor dále porovnal pět publikovaných korelací a analyzoval tlakové pulzace, ventilové děje, netěsnosti a výkonové parametry.

Silnou stránkou je promyšlený experimentální řetězec, vysokofrekvenční měření, individuálně charakterizované termočlánky, paralelní použití Cookovy-Feldermanovy a Reicheltovy formulace, vyhodnocení citlivosti rekonstrukce a poměrně otevřená diskuse některých omezení. Autor prokázal schopnost propojit experiment, přenos tepla, termodynamiku, zpracování signálů a modelování kompresorového cyklu.

Za hlavní původní přínosy považuji zejména: vytvoření fázově rozlišeného souboru lokálních povrchových teplot a rekonstruovaných tepelných toků pro více zatížení; kvantifikaci rozdílů mezi ventilovou deskou a vložkou válce; prokázání, že prosté kvazistatické dělení tepelným rozdílem vede během části cyklu k neinterpretovatelnému nebo zápornému součiniteli přestupu tepla; a systematické porovnání vybraných korelací, které ukazuje, že přenastavení vedoucí konstanty neodstraní rozdíly ve tvaru a fázi průběhu. Přínosná je i identifikace oblastí, v nichž jednorozměrný dobře promíchaný model plynu přestává být vhodným referenčním rámcem.

4. Význam výsledků pro praxi a rozvoj vědního oboru

Výsledky mají význam především jako experimentální podklad pro další vývoj korelací a pro ověřování nulodimenzionálních a CFD modelů. Ukazují, že korelace naladěná na celkovou práci nebo účinnost kompresoru nemusí správně předpovídat lokální okamžité tepelné zatížení ventilové desky. To je důležité nejen pro energetickou bilanci, ale také pro tepelnou spolehlivost ventilů a hlavy válce.

Bezprostřední zobecnění pro běžné chladivové hermetické kompresory je omezeno použitím vzduchu, otevřenou konstrukcí stroje, malým počtem měřicích míst a neproměřeným čelem pístu. Praktický význam práce vidím především v kvalitativním

odhalení strukturálních nedostatků kvazistatického popisu a ve vytvoření experimentálního základu pro následné modelování, nikoli v hotové univerzální korelaci.

5. Závažnější metodické výhrady

5.1 Střední složka tepelného toku

Periodická povrchová teplota v modelu polonekonečného tělesa sama neurčuje nenulový dlouhodobý tok, který závisí na gradientu přes konečnou stěnu a vnější okrajové podmínce. Opakování 500 cyklů potlačí počáteční přechod, tuto informaci však nedoplní. Porovnání s předběžným měřením vnějšího tepelného toku na obr. 6.26 představuje podpůrnou kontrolu celkové bilance, neurčuje však střední tok na jednotlivých vnitřních površích. Rychle se měnící složku toku proto považuji za průkaznější než jeho znaménko a velikost v cyklovém průměru. Bez dalšího důkazu nepovažuji střední složku ani související část H1 za spolehlivě prokázanou.

5.2 Fázový posun a nesimultánní měření

Tlak a povrchová teplota nebyly měřeny současně v téže hlavě. Mezikonfigurační reprodukovatelnost fáze a časování ventilových dějů není vyčíslena, přestože posun 12 až 32° patří k hlavním výsledkům. Přidává se jediný indexový impuls za otáčku. Uváděných 0,25° je interpolované úhlové dělení; celková nejistota fáze zahrnující obě měřicí konfigurace, úhlovou interpolaci a nejistotu rekonstruované teploty plynu není vyčíslena a u jednoválcového stroje může být vyšší.

5.3 Rekonstrukce teploty plynu, píst a netěsnosti

Součinitel přestupu tepla závisí na modelově rekonstruované teplotě plynu, jejíž špička se podle citlivostní analýzy mění o desítky kelvinů. Píst, tvořící u horní úvrati přibližně polovinu exponované plochy, neobsahuje snímače. Neuzavřenost energetické bilance proto nelze jednoznačně připsat neproměřenému tepelnému toku přes píst ani hmotnostnímu toku přes zavírající se výtlačný ventil.

5.4 Porovnání a validace korelací

Pět korelací bylo nejprve vyhodnoceno v původní publikované podobě. U následně přizpůsobených variant však byly vedoucí konstanty určeny a výsledky hodnoceny na stejném souboru dat. Nízké reziduum těchto variant proto představuje kalibrační shodu s daným experimentem, nikoli nezávislou validaci ani důkaz obecné použitelnosti pro jiné kompresory a provozní podmínky.

5.5 Síla některých fyzikálních interpretací

Chladnější vrstva plynu u ventilové desky a zpětné proudění ventilem nebyly přímo změřeny, ale představují fyzikální interpretace naměřených a modelově rekonstruovaných veličin. U snímače na vložce válce navíc nelze fázi získanou dvousložkovým proložením při hodnotě R^2 blízké nule spolehlivě fyzikálně interpretovat. Také jednotlivé odhady zpětného proudění vycházejí zčásti ze stejných tlakových dat a modelových předpokladů, a nejsou proto zcela nezávislými potvrzeními.

6. Formální a jazyková úroveň práce

Práce má 141 stran, je logicky členěna do sedmi hlavních kapitol a obsahuje rozsáhlou rešerši, popis experimentu, výsledky i diskusi. Grafická úroveň je velmi dobrá; obrázky a tabulky jsou většinou názorné a autor zpravidla propojuje metodiku s pozdější interpretací výsledků. Anglický odborný text je převážně srozumitelný a terminologicky na dobré úrovni.

Formální stránku oslabují některé nekonzistence a příliš kategorické formulace. Český abstrakt obsahuje neobratné či chybné formulace, například gramaticky nesprávné spojení „bez optimalizace koeficient“. V metodice se rozchází popis výtlačné fáze: jednou je teplota určována otevřenou energetickou bilancí, jinde lineární interpolací. Nesprávná je také formulace, že při nulovém rozdílu teplot je neurčitý „correlation-predicted heat flux“; singularitu má experimentálně dopočítávaný bodový součinitel přestupu tepla, zatímco při konečném součiniteli a nulovém rozdílu teplot dává korelace nulový tepelný tok. Tyto nedostatky nesnižují hodnotu experimentu, ale měly by být při konečné úpravě textu opraveny.

7. Splnění zákonných a oborových požadavků; tvůrčí schopnosti doktoranda

Podle § 47 odst. 4 zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách, musí disertační práce zahrnovat původní výsledky tvůrčí činnosti studenta uveřejněné způsobem obvyklým v příslušném oboru nebo výsledky takto přijaté k uveřejnění. Předložená práce obsahuje původní experimentální data, vlastní zpracovatelský a rekonstrukční řetězec a nové porovnání vybraných korelací. V seznamu výsledků vztahujících se k disertaci jsou uvedeny tři konferenční publikace. U dvou z nich je prvním autorem P. Bouchal a u jedné P. Rapta; vztah obou jmen a konkrétní autorský podíl doktoranda by bylo vhodné při obhajobě objasnit.

Navzdory uvedeným metodickým výhradám doktorand podle mého názoru prokázal schopnost samostatně formulovat výzkumný problém, navrhnout a realizovat náročný experiment, zpracovat rozsáhlá fázově rozlišená data, kriticky porovnat více modelů a formulovat další výzkumné otázky. Práce obsahuje původní výsledky a splňuje požadavky standardně kladené na disertační práci ve strojním a energetickém inženýrství. Některé silné závěry je však třeba při obhajobě obhájit nebo zúžit tak, aby odpovídaly skutečné důkazní síle experimentu.

8. Otázky k obhajobě

1. Jak může periodická povrchová teplota v modelu polonekonečného tělesa určovat nenulový střední tok? Co v tomto směru doplní opakování 500 cyklů?
2. Jaká je celková nejistota fázového posunu 12 až 32° na ventilové desce po zahrnutí rozdílných měřicích konfigurací, úhlové interpolace založené na jediném indexovém impulsu za otáčku a nejistoty rekonstruované teploty plynu?

3. Jak byla ověřena reprodukovatelnost tlakové a teplotní hlavy z hlediska fáze a časování ventilů?
4. Jak lze z neuzavřenosti energetické bilance rozlišit hmotnostní tok přes zavírající se výtlačný ventil od neproměřeného tepelného toku přes píst a od chyb termodynamické rekonstrukce?
5. Které závěry H1 zůstanou platné, nebude-li střední složka toku považována za prokázanou?
6. Jak bylo kvantitativně prokázáno, že dominantní příčinou rozdílu mezi korelacemi a měřením je chybějící fázová struktura, a nikoli nejistota rekonstruované teploty plynu, chyba snímače nebo prostorová reprezentace tepelného toku?
7. Jaké přímé měření by prokázalo existenci chladnější vrstvy plynu u stěny a vyloučilo chybu rekonstrukce teploty plynu?
8. V čem přesně spočívá doložitelné prvenství práce oproti experimentům Adaira, Hsieha a Wua?

9. Závěr a doporučení

Práce je odborně hodnotnou a experimentálně náročnou studií. Hlavní přínos spatřuji ve fázově rozlišených datech, propojení měření s termodynamickou rekonstrukcí a kritickém porovnání používaných korelací.

Doktorand prokázal tvůrčí schopnosti v dané oblasti výzkumu a disertační práce splňuje zákonné i oborové požadavky kladené na disertační práci. Disertační práci Ing. Patrika Rapty doporučuji k obhajobě a po jejím úspěšném obhájení doporučuji udělení akademického titulu Ph.D.

V Liberci 20.8.2026

prof. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.