

Posudek

disertační práce pana Ing. Jana KRACÍKA

AERODYNAMICKÉ UCPÁNÍ V NADZVUKOVÉM EJEKTORU

Posuzovaná disertační práce má rozsah 149 stran textu včetně 102 obrázků seznamu použité literatury a seznamu 12 publikací autorových. Vlastní text práce s obrázky zabírá 137 stran. Práce obsahuje i ostatní důležité věcné a formální náležitosti. Práce je napsána v českém jazyce.

Tématem předložené práce je výzkum proudění stlačitelné tekutiny se zaměřením na supersonické ejektory. Zajímavé je, že jsou v práci systematicky prozkoumány nejen proměny proudových polí a provozních parametrů vlivem změny okrajových podmínek provozu zařízení, ale též i vliv různých variant geometrického uspořádání tohoto energetického stroje. Poměrně podrobné rozbory získaných experimentálních a numerických výsledků, založené na detailní znalosti teoretických analytických řešení, se zaměřují i na důležitý parametr transsonického proudového pole, kterým je tvar a poloha zvukové čáry. Důležité a zajímavé jsou i nové poznatky o aerodynamickém ucpání hnaného proudu. Teoretické poznatky jsou v práci systematicky srovnávány s výsledky experimentu a numerické simulace pomocí komerčního software.

Je povinností oponenta se vyjádřit v posudku k bodům, uvedeným ve jmenovacím dopise:

1. Zhodnocení významu práce pro obor.

Význam práce pro obor Aplikovaná mechanika není předmětem pro diskusi. Snaha o bližší pochopení fyzikálních dějů, ke kterým dochází v supersonických ejektorech je velmi záslužná a důležitá. Práce přináší poznatky, které rozvíjejí naše vědění v tomto oboru.

2. Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění stanoveného cíle.

Cíle, které jsou formulovány v závěru odstavce 1.1, jsou splněny. Postup řešení považuji za správný. Z celé práce je zřejmé, že autor při práci průběžně využíval svých rozsáhlých poznatků o současném stavu problematiky, které zřejmě vyplynuly z obsáhlé rešeršní studie, v textu se odkazuje celkem na 86 pramenů. Autor po podrobném rozboru možných teoretických řešení přistupuje k simulaci proudových polí prostředky výpočetní mechaniky tekutin a k aerodynamickému experimentu. Pokud mohu soudit, tak užití metody jsou adekvátní k řešenému problému. Jisté pochybnosti mám u využívání komerčního software pro řešení takových komplexních úloh. Z osobní zkušenosti bych si představoval, že pro dosažení objektivnějších výsledků by bylo vhodné numericky modelovat proudění i v jiném prostředí než jakým je komerční ANSYS -FLUENT. Ale podotýkám, že v oboru CFD nejsem odborníkem. K použitým metodám experimentu nemám co dodat, experiment je v rámci možností ukázkou pěkné práce v aerodynamické laboratoři.

3. Stanovisko k výsledkům disertační práce a významu původního konkrétního přínosu autora disertačního spisu.

Práce bezpochyby obsahuje řadu původních výsledků a autorovi lze přiznat zásluhu o nové hmatatelné přínosy pro obor. Přínos osobně spatřuji především v systematickém prošetření vlivu axiální polohy hnací trysky vůči trysce hnané a též vůči směšovací komoře. Dále považuji za velmi důležitý přínos i systematický popis tvaru a polohy zvukové čáry v tomto tak složitém transsonickém proudovém poli, též nové informace o aerodynamickém ucpání.

4. Formální a jazyková stránka práce.

Můj názor je, že se práce velmi dobře čte, je přehledně členěna a pěkně graficky upravena. Je tam jen minimum chyb a překlepů. Vážím si velmi též toho, že autor cituje na začátku práce Wernera Heisenberga. Pokorné, poctivé a hloubavé studium nás zavádí i v oblasti fyzikálně - technických věd ke kořenům a smyslu všeho okolo nás. Tato "via ad radices" je pravou podstatou vědecké práce a zdrojem velikého životního potěšení pro každého tvůrčího člověka.

5. Vyjádřením k publikacím studena DSP.

V závěru spisu je uveden seznam dvanácti autorových publikací, které ve velké většině souvisejí s vydavatelem EJP Web of Conferences. Snaha o publikační výstupy je patrná. Je jen škoda, že se Ing. Kracík nemůže pochlubit alespoň jednou publikací v časopise, případně v tzv. impaktovaném časopise.

Připomínky a dotazy:

1. V předložené disertační práci je na straně 20 nahoře tvrzení o dvourozměrném proudovém poli, které má aerodynamické hrdlo určeno vepsanou kulovou plochou. Prosím autora o vysvětlení, jak to myslel.
2. Při měření byly statické tlaky zjišťovány pomocí odběrů ve stěně. Na straně 60 je čtenář utvrzován o vhodnosti tohoto postupu díky předešlé experimentální praxi atd.. Postrádám v textu zásadní důvod, související například s platností podmínky konstantního tlaku napříč mezní vrstvou. Rovněž jsem nikde nenalezl údaj o průměru těchto odběrů.

Na základě výše uvedeného zhodnocení

doporučuji

aby panu Ing. Janu Kracíkovi bylo umožněno tuto práci obhajovat před komisí studijního oboru Aplikovaná mechanika.

Pragae, d. 15 m. Februarii a. 2020

doc. Ing. Martin Luxa, Ph.D.

Oponentní posudek

Disertační práce Ing. Jana Kracíka: Aerodynamické ucpání v nadzvukovém ejektoru, Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Liberec, 2020.

Disertační práce se zabývá výzkumem aerodynamického ucpání v nadzvukovém, osově souměrném ejektoru s nastavitelnou hnací tryskou umístěnou v ose ejektoru. Jelikož má aerodynamické ucpání úzkou vazbu na výkonové charakteristiky ejektorů, využívaných v řadě průmyslových aplikací, a přitom zatím ne zcela popsané, jedná se bezesporu o téma aktuální. Práce sestává z celkem 149 stran, přičemž vlastní věcné řešení je uvedeno na 127 stranách. Práce je členěna do logických, navzájem navazujících kapitol. V úvodu je uvedena motivace autora a jsou stanoveny cíle práce, které se pohybují zejména v oblasti základního výzkumu. V dalších částech je uvedena teorie nadzvukových ejektorů a jsou popsány principy jeho aerodynamického ucpání i různé přístupy jiných autorů k vyhodnocení ucpání ejektoru. V práci jsou použity tři metody výzkumu - analytická, experimentální a numerická. Rozбором a popisem dostupných analytických metod návrhu ejektorů se autor zabývá ve třetí kapitole. V dalším textu jsou uvedeny numerické metody jako prostředek k výzkumu ejektorů. Oponent velmi kladně hodnotí omezenou míru popisnosti této kapitoly, kdy obecně platné a dostupné informace jsou autorem uvedeny k dohledání v dostupné literatuře a nejsou obsahem práce. Jako klíčové téma pro numerické vyšetřování dějů v ejektoru autor vyhodnotil způsob modelování turbulence i modelování drsnosti povrchu. Uvažováním aerodynamické drsnosti se autor významně odlišuje od současných autorů a dostupných publikací. Závěrečná část kapitoly se věnuje popisu numerického modelu nadzvukového ejektoru, který byl využit v předložené práci.

Významnou částí předložené práce je i experimentální výzkum ucpání. V této části oponent velmi kladně hodnotí, že autor provedl vyhodnocení nejistoty experimentálně vyhodnocených veličin a tyto nejistoty dále v práci, byť v omezené míře, zohledňoval.

Těžiště práce beze sporu leží v šesté kapitole o rozsahu 72 stran textu, která uvádí a diskutuje výsledky numerických simulací, experimentů i analytických metod z hlediska mechaniky tekutin. Jsou uvedeny zejména autorem zjištěné pracovní charakteristiky ejektoru, průběhy statických tlaků na stěně a ve vybraných případech i izočáry Machova čísla či jiných vybraných veličin a to pro různé pracovní režimy ejektoru. Je vyšetřován vliv protitlaku při konstantní poloze hnací trysky i vliv polohy trysky při jinak stejných provozních podmínkách. Podle oponenta je jedním z nejvýznamnějších závěrů experimentální části práce zjištění, že nikde v měřených místech neklesá statický tlak pod kritickou hodnotu, přestože zřejmě v těchto případech zřejmě dochází k aerodynamickému ucpání ve směšovací komoře. Autor následně vyslovuje závěr, že uvedený jev může být způsoben složkovým ucpáním, případně vlivem ztrát.

V navazujícím textu autor popisuje výsledky numerického výzkumu. Je proveden rozbor vlivu použitého řešiče, diskretizačního schématu, modelu turbulence a je ověřena nezávislost numerického řešení na výpočetní síti. Na základě výsledků uvedených rozborů jsou stanoveny vyhovující podmínky pro další numerické simulace. I přes dílčí neshody je pro další řešení vybrán model k- ω SST. Je ověřován i vliv 2D a 3D numerického modelu. Je prokázáno, že 2D geometrie dostatečně přesně popisuje vyšetřované ukazatele, nicméně je i uveden možný cíl dalšího výzkumu v této oblasti.

Další text práce se již věnuje samostatným rozborům proudění. Postupně je rozborům podrobeno proudění uvnitř ejektoru při různém poměru klidových tlaků, při měnícím se protitlaku a při různých polohách hnací trysky. Během těchto rozborů autor opakovaně nalézá nesoulad mezi výsledky experimentu a numerických simulací a to zejména při vyhodnocení průběhu statického tlaku na stěně

ejektoru. Dále autor uvádí, že při vyšších osových vzdálenostech hnací trysky predikují numerické simulace vyšší ejekční součinitel i vyšší kritický protitlak. Z předešlých prací přitom vyšlo najevo, že korelace průběhu statického tlaku a délky směšovací komory zásadně ovlivňuje účinnost ejektoru a tedy i nasávané množství. Autor se proto v dalším textu soustředil na snížení uvedených rozdílů simulace a experimentu za pomoci uvažování vlivu aerodynamické drsnosti povrchu ejektoru. Je vyšetřována hodnota drsnosti i vliv jejího uvažování v různých částech ejektoru. Největší vliv byl prokázán při uvažování aerodynamické drsnosti u směšovací komory. Dle oponenta je nejvýznamnějším autorovým původním zjištěním, že numerický výpočet se započtením drsné stěny lépe predikuje hodnotu nasávaného množství v návrhové části charakteristiky a rovněž relativně přesně předpovídá přechod mezi návrhovými a podzvukovými režimy. Hodnota kritické protitlaku při uvažování drsnosti velmi dobře koresponduje s experimentem. Autorovým zjištěním je i tvrzení, že uvažováním drsnosti dojde k navýšení tlaku podél směšovací komory, v důsledku čehož ejektor ztrácí část svého sacího výkonu. Tento poznatek považuje oponent za významný přínos autora pro další výzkumné a optimalizační aktivity v oblasti nadzvukových ejektorů.

Na základě výsledků práce by oponent rád položil autorovi několik otázek, které by měl autor při obhajobě práce zodpovědět:

- 1) Dle poznatků autora v některých režimech dochází k aerodynamickému ucpání, přestože poměrný statický tlak neklesá pod kritickou hodnotu nikde v měřených místech ejektoru. Autor následně vyslovuje domněnku, že uvedený jev může být způsoben složkovým ucpáním, případně vlivem ztrát. Pokusil se autor o určení ztrát (změnu klidového tlaku), které by vedly na změnu kritických podmínek až k experimentálně zjištěným hodnotám? Jaká je dle autora korelace těchto ztrát s dalšími, v této práci popsány, ztrátami způsobenými drsností stěn?
- 2) Výpočetní síť na obr. 4.7 není rotačně souměrná, ale spíše rovině souměrná podle rovin na sebe navzájem kolmých. Pokusil se autor při hodnocení 3D výpočtů hodnotit i průběhy jinde než v řezech po 90°?
- 3) Dle zkušeností oponenta je konvergence stacionárních výpočtů ejektorů s nadzvukovým proudem velmi pomalá a numerická stabilita řešení malá. Dochází zde např. k rázovým jevům v hnacím proudu, které vyžadují vyšší stupeň stabilizace výpočtu, čímž je zvyšován počet iterací k dosažení konvergenčního kritéria i výpočetní čas. K transportu hybnosti v ejektoru přitom dochází v i závislosti na turbulenci, jejíž rozvoj je (měřeno počtem iterací) velmi pomalý a proto se nasávaný proud vyznačuje numericky pouze velmi pomalou reakcí. K plnému dosažení skutečného stacionárního řešení je proto nutný velmi vysoký počet iteračních kroků, během kterých je dosahováno pouze velmi malých změn monitorovaných hmotnostních toků. Důsledkem je, že přestože rovnice kontinuity dle autorem uvedeného vztahu 4.28 ukazuje na konvergované řešení, nemusí se jednat o řešení konečné. Monitoroval autor při vyhodnocení konvergence výpočtu i změny hmotnostních toků s rostoucím počtem iterací, tzn. ne jen platnost rovnice kontinuity v daném kroku výpočtu, jak je v práci uvedeno? Na základě jakých ukazatelů se autor rozhodl hodnotit dosažení úplné konvergence řešení podle vztahu 4.28.
- 4) V práci nejsou uvedeny příčné profily rychlostí ani parametrů turbulence, ze kterých by bylo možné podrobněji usuzovat na průběh směšování podél komory ejektoru, případně na složkové ucpání. Vzhledem k závěrům práce, že aerodynamická drsnost zásadně ovlivňuje charakteristiku ejektoru, považuje oponent tento typ rozboru za obzvláště zajímavý. Oponent proto žádá autora o příklad takového rozboru s ukázkou rozdílů plynoucích z uvažování aerodynamické drsnosti.

Stanovisko oponenta:

Autorova práce je beze sporu přínosná pro obor aplikované mechaniky. Zabývá se aktuálním tématem a uvádí řadu původních výsledků a závěrů, z nichž některé mají velký význam zejména pro budoucí vývoj a výzkum ejektorů.

Doktorand použil k řešení zadání práce relevantní metody a jeho postup odpovídá požadavkům na doktorskou práci. Doktorand v práci prokázal velmi dobré schopnosti samostatně realizovat experimentální i numerický výzkum a zejména pak prokázal schopnost dosažené výsledky v oboru mechaniky tekutin a aerodynamiky vyhodnotit.

V celé práci je patrná autorova snaha o pochopení a vyřešení zatím nevyřešených otázek. Za nejvýznamnější výsledky této snahy považuje oponent autorův původní závěr, že drsnost stěny má zásadní vliv na pracovní charakteristiky ejektoru a že ani při aerodynamickém ucpání ejektoru není dosaženo kritického poměru tlaků - patrně vlivem ztrát.

Formální a jazyková úroveň práce je velmi dobrá, autor používá vhodné obraty, označení i formulace. Graficky je práce velmi dobře zpracována, je velmi přehledná a to i přes značné množství výsledků a dat, které autor předkládá. Snad jen silný papír, na kterém je práce tištěná, zhoršoval oponentovi snadnost čtení práce. Místy, zejména v závěru práce, se objevují drobné chyby v textu, které ale nijak neubírají na celkovém kladném vyznění práce.

Publikace autora zachycují především úvodní část doktorského studia a nejvýznamnější závěry práce proto dle názoru oponenta nejsou cizojazyčně publikovány, což je jistě škoda. Přesto doktorand k tématu práce publikoval v průběhu studia devět publikací jako hlavní autor a tři jako spoluautor a to v časopisech a na konferencích, včetně mezinárodních.

Na základě výše uvedeného hodnocení oponent

doporučuje disertační práci Ing. Jana Kracíka k obhajobě.

V Liberci 26. 3. 2021

Ing. Jan Kolář, Ph.D.



Prof. Ing. Pavel Šafařík, CSc.
Radomská 469
18100 Praha 8

O p o n e n t n í p o s u d e k

**disertační práce Ing. Jana Kracíka : *Aerodynamické ucpání v nadzvukovém ejektoru*,
Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Liberec, 2020.**

Předložená disertační práce obsahuje včetně titulního listu 149 stran. Vlastnímu textu práce předchází Prohlášení, Anotace v jazyce českém a anglickém, Poděkování, Obsah a Seznam veličin a použitého označení.

Tématem práce je výzkum aerodynamických parametrů a dějů v supersonickém ejektoru.

V úvodu je zdůrazněn význam ejektorů pro stavbu a provoz chladírenských, klimatizačních a energetických zařízení. Je zmíněna naléhavá potřeba výzkumu ejektorů zejména pro jejich stavbu a provoz v oboru vysokorychlostní aerodynamiky. V návaznosti na autorovy zkušenosti a na dosavadní výsledky dosažené ve výzkumném týmu jsou formulovány cíle disertační práce.

Ve druhé kapitole jsou shrnuta teoretická východiska pro výzkum a řešení proudění v supersonických ejektorech. Pozornost je soustředěna na jev aerodynamického ucpání v supersonickém ejektoru.

Ve třetí kapitole jsou popsány metody pro návrh supersonických ejektorů. Jsou to především dvě analytické metody – metoda G. N. Abramoviče a metoda autorů vedených W. X. Chenem.

Čtvrtá kapitola uvádí numerické metody, jak byly formulovány a připraveny jako významná složka výzkumu proudění v supersonickém ejektoru. Je využit komerční program Fluent. Pozornost je věnována modelování turbulence. Výzkum se zaměřuje i na zahrnutí vlivu drsnosti obtékaných stěn ejektoru. Stručně je uvedena řešená oblast představující v pěti variantách průtočnou část ejektoru připraveného k experimentálnímu výzkumu

V páté kapitole jsou stručně popsány užití experimentální metody výzkumu. Jedná se o měření toků hmotnosti a rozložení statického tlaku na stěně ejektoru. Jsou uvedena data pro analýzu nejistot měření.

Šestá kapitola je rozsáhlá a obsahuje značné množství dosažených výsledků, jejich vzájemné porovnání a podrobné diskuse. Rozbory jsou zaměřeny na vliv různého nastavení hnací trysky na významné provozní parametry difuzoru. Detailně je popsána struktura proudění v supersonickém ejektoru při různých provozních podmínkách. Jsou získány poznatky o podmínkách aerodynamického ucpání. Je uvedeno řešení proudového pole pro trojrozměrnou konfiguraci ejektoru. Výsledky experimentů a numerických řešení z výzkumu vlivu drsnosti stěn jsou porovnány a diskutovány. Na základě rozboru výsledků výzkumu je ukázáno na možnosti rozšíření návrhových metod.

V závěru jsou shrnuty dosažené poznatky z experimentálního výzkumu osově symetrického supersonického ejektoru a je zdůrazněn přínos numerických simulací nejen pro porovnání výsledků, ale též pro rozbory vlivu různých parametrů na provozní charakteristiky ejektoru. Jsou vytyčena doporučení pro další výzkum.

V Seznamu použité literatury je uvedeno 86 literárních pramenů a je uveden Seznam publikací autora, v němž je 12 odkazů.

Hodnocení :

Obor dynamiky plynů je bezpochyby významná součást strojního inženýrství. Je to tím, že jako aplikovaná vědní disciplína přináší významné poznatky pro stavbu a provoz strojů. Problémy s prouděním stlačitelné tekutiny spočívají především ve značné citlivosti proudových polí na malé odchylky v okrajových a počátečních podmínkách, ve skutečně odlišném teoretickém popisu charakteru proudění, z něhož někdy plyne i dvojznačnost řešení, a v určité náročném experimentálním výzkumu. Toto jsou fakta přesvědčující o tom, že o výsledky výzkumů v oboru dynamiky plynů je mezi odborníky značný zájem. Autor disertační práce si zvolil téma experimentálního výzkumu proudových jevů a parametrů proudění v supersonickém ejektoru s podporou numerických simulací. Na základě jím provedené odborné rešerše, jeho vlastních zkušeností a poznatků dosažených ve výzkumném týmu formuloval cíle disertační práce, z nichž jsou významné ty, které se zaměřují na jev aerodynamického ucpání v proudu v ejektoru a na jeho důsledky pro provozní podmínky těchto zařízení. Provedl podrobný výzkum na ejektoru v osově symetrickém uspořádání s válcovou směšovací komorou. Zařízení umožnilo nastavit a zkoumat varianty nastavení polohy hnací trysky a aerodynamických parametrů v provozních podmínkách. Výsledky experimentálního výzkumu jsou základem pro rozbor k dosažení poznatků o provozních charakteristikách a o struktuře proudového pole v ejektoru v součinnosti s numerickými simulacemi a teoretickými přístupy. Autor disertační práce při řešení výzkumného problému postupoval správně a vytyčené cíle splnil. Pozoruhodný (i když očekávaný) je poznatek o vlivu nastavení polohy hnací trysky. V tomto tématu výsledky ukazují, jak lze řídit provozní parametry ejektoru a jak je nutné počítat i s limity plynoucími z aerodynamického ucpání v průtočné části. Numerické simulace se prokázaly jako přínosné pro výsledky měření tím, že umožnily zobrazit parametry a strukturu proudových polí. Významný je poznatek o možnostech numerické simulace proudění v kompletní trojrozměrné výpočtové oblasti v porovnání s řešením v dvourozměrném osově symetrickém uspořádání. Poznatky o vlivu drsnosti stěn v průtočné části ukazují, že při některých konfiguracích při aerodynamickém ucpání je vliv minimální, což je jistě přispěvkem pro rozhodování o technologických a ekonomických aspektech stavby strojů. V závěrech disertační práce jsou vytyčena témata pro další výzkum. Jsou to hlavně podněty pro stavbu ejektorů s jinou geometrií, pro výzkum zaměřený na ověření a zdokonalování numerických simulací a pro rozvoj teoretických přístupů.

Oponovaná práce je psána v relativně rozsáhlé formě. Čtenář je v kapitole Výsledky a diskuse zahlcen množstvím popisů, které dokazují, že autor dosáhl většího množství výsledků z prováděných experimentů, z numerických simulací a z aplikací teoretických přístupů. Po formální stránce je práce napsána velmi dobře. Překlepy, nedůslednosti, prohřešky proti české gramatice jsou ojedinělé. Ve stylu psaní technických textů v češtině je disertační práce napsána dobře. Oponent může vytknout nedůslednosti popisů v obrázcích, v nichž nejsou dodrženy indexy u veličin. Oponent však musí vytknout opakované užití termínu „stlačitelné proudění“. Proudění není stlačitelné, stlačitelná je tekutina. Tato poznámka směřuje k tomu, abychom se při psaní kvalifikačních prací nenechali vtáhnout do užívání odborného slangu. Publikační aktivita autora je dobrá, na odborných mezinárodních konferencích se výsledky jeho práce setkaly se zájmem odborníků.

Přínos oponované práce je určitě v předložení experimentálních dat o parametrech vysokorychlostního proudu v průtočné části ejektoru ve variantách polohy hnací trysky a poměru celkových tlaků hnacího a hnaného vzduchu. Tato data budou určitě využita pro další výzkum, pro rozvoj teoretických přístupů a pro zdokonalování numerických simulací. Vytyčení dalších vědecko-výzkumných témat má pro obor dynamiky plynů skutečný význam. Oponent si je jist, že autor disertační práce se setkal při výzkumu i se zvláštní problematikou dynamiky plynů (která však nebyla cílem disertační práce) – s transsonickou nestabilitou.

Autor zmiňuje jev „shock train“ (oponentův pokus o překlad : „sled rázů“). Může autor při obhajobě disertační práce uvést jeho zkušenost s tímto jevem? Je možné při tomto jevu pozorovat akustické účinky a vyhodnotit parametry oscilace?

Autor má v rukách výsledky numerických řešení. Je škoda (opět to nebylo v cílech disertační práce), že z těchto výsledků nevytvořil obraz vývoje rychlostního profilu proudu ve směšovací komoře. Oponent může potvrdit, že školitel autora disertační práce má prioritu v odhalení vlivu úplavu za odtokovou hranou hnací trysky na průběh rychlostního profilu a dokonce na určení hranice směšování hnacího a hnaného proudu. Může autor disertační práce připravit k obhajobě takovýto jeden obraz vývoje rychlostního profilu?

Závěr :

Předložená disertační práce je přínosná pro výzkum a praxi v oboru dynamiky plynů se zaměřením na vysokorychlostní aerodynamiku. Autor splnil stanovené cíle tím, že provedl rozsáhlé experimenty s ejektorem osově symetrické konfigurace s válcovou směšovací komorou a podpůrné numerické simulace. Dosažené výsledky podrobně analyzoval a diskutoval. Dosažené výsledky jsou aplikovány v teoretických modelech pro řešení aerodynamických parametrů proudu v supersonických ejektorech. Předložená disertační práce je podnětná a bezpochyby budou na ní navazovat další výzkumné práce a budou se z ní odvíjet další praktické aplikace. Autor prokázal svojí tvůrčí aktivitu a své velmi dobré odborné znalosti v oborech experimentální a teoretické aerodynamiky a numerických simulací proudění stlačitelné tekutiny. Oponent

doporučuje disertační práci Ing. Jana Kracíka k obhajobě

před komisí pro obhajoby disertačních prací v doktorském studijním programu Strojní inženýrství, studijním oboru Aplikovaná mechanika.

V Praze 16. března 2021