

Oponentský posudek na disertační práci na téma

Studie kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů

Doktorand: **Ing. Jan Hujer**
 Fakulta strojní
 Studijní program P2301 – Strojní inženýrství
 Studijní obor: 3901V003 – Aplikovaná mechanika
 Technická univerzita v Liberci

Význam pro vědní obor, aktuálnost tématu

Disertační práce doktoranda se zabývá experimentálním výzkumem mechanismu kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů. Pro vyhodnocení vlivu kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur na povrch byly aplikovány experimentální metody. Autor se zabýval měřením účinku impaktních sil pomocí piezoelektrických PVDF senzorů. Dále byla aplikována experimentální metoda pitting testů. Signály z měření byly zpracovány a vyhodnoceny.

Řešení problému kavitace je téma velmi aktuální. V hydraulických strojích a zařízeních je kavitace původcem většinou nežádoucích jevů, jako je např. eroze povrchů strojních součástí či vibrace. Poznání zákonitostí mechanismu kolapsu kavitačních bublin v blízkosti povrchů strojních součástí je proto téma velmi aktuální a zároveň velmi náročné, kdy nové znalosti a poznatky významně přispívají k rozšíření současného stavu poznání a k možným technickým řešením omezujícím poškození povrchu strojních součástí.

Technické řešení, eliminující nebo alespoň částečně eliminující vliv kavitace, vede ke zvýšení životnosti strojních součástí v hydraulických strojích a zařízeních a tím pádem k významným finančním úsporám při provozování hydraulických strojů a zařízení. Metodika měření a vyhodnocení kavitačního účinku pomocí piezoelektrických PVDF senzorů by mohla najít využití v praxi jako dostupná metoda pro kvantifikaci erozního působení při kavitačním proudění. Mohla by být aplikována ve strojích s kavitačním prouděním.

Cíle práce

Doktorand stanovil několik cílů své práce, které jsou uvedeny na str. 12. Hlavním cílem je experimentální výzkum účinku kolapsu kavitačního mraku ve vybraném zařízení generujícím kavitační mrak při zahrnutí vlivu podmínek daných provozními režimy tohoto zařízení. Autor měl navrhnout vhodnou měřicí metodu pro studium účinku kolapsu kavitačního mraku s následným testováním a optimalizací navržené metody. Následným cílem doktoranda bylo

provedení měření účinku kolapsu kavitačního mraku optimalizovanou měřicí metodou. K dalším cílům patří určení vhodné metody vyhodnocení provedených měření s následným vyhodnocením účinku kolapsu kavitačního mraku na základě naměřených dat, popisujícím účinek kolapsu kavitačního mraku pro měřené provozní režimy. Posledním cílem bylo stanovení závěrů výzkumu, včetně získaných výsledků.

Cíle disertační práce byly splněny. Práce přináší řadu výstupů a poznatků z oblasti experimentálního výzkumu účinku kavitace v blízkosti pevných povrchů při hydrodynamické kavitaci ve vysokorychlostním kavitačním tunelu metodou měření účinku kavitačního proudění piezoelektrickými PVDF senzory a pitting testy.

Postup řešení problému, zvolené metody zpracování

Doktorand nejprve zpracoval rešeršní část popisující přehled současného stavu problematiky (kapitola 1 a 2). Popisuje fyzikální jev kavitace v blízkosti pevných povrchů. Rovněž se zabývá možnostmi generování kavitačního mraku včetně uvedení některých přístupů a metod užitých ke studiu kavitace na vybraných testovacích zařízeních.

Následně se doktorand zabývá návrhem vlastního řešení kavitace v blízkosti povrchů. Zvolil testovací zařízení využívající principu hydrodynamické kavitace, kdy ke snížení tlaku v kapalině dochází vlivem zvýšení rychlosti proudění. Studium účinku kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchu provedl ve vysokorychlostním kavitačním tunelu laboratoře LEGI (Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels) univerzity Université Grenoble Alpes a výzkumného centra CNRS UMR 5519 (Centre national de la recherche scientifique, Unité Mixte de Recherche 5519) v Grenoblu ve Francii. Popisuje konstrukci tohoto vysokorychlostního kavitačního tunelu včetně parametrů proudění. Proud kapaliny vstupuje do testovací sekce axiálně výstupní částí trysky. Následně se proud ohýbá a pokračuje radiálně mezerou mezi čelem trysky a testovacím diskem. Dochází tak k poklesu tlaku a vzniku kavitační struktury, která se periodicky tvoří a kolabuje na testovacím disku a stěně trysky. Doktorand popisuje dynamiku kavitačního mraku ve vysokorychlostním kavitačním tunelu, měření impaktních sil a pitting testy. Následně popisuje piezoelektrický PVDF senzor. Uvádí informace o třech druzích PVDF senzorů (tištěný senzor, senzor vyrobený fotolitografickou technikou, průmyslově vyráběný PVDF senzor). Autor popisuje tři metody kalibrace PVDF senzoru (metoda pádu kuličky, kyvadlová metoda a metoda zlomení tuhy), kdy volba těchto metod vychází z požadavku na časovou podobnost kalibrace a kavitačního děje.

Pro studium účinku kolapsu kavitačních bublin v blízkosti stěny doktorand zvolil dvě metody. První metodou bylo měření silového účinku od kolapsů kavitačních bublin pomocí

PVDF senzorů. Druhou metodou byla realizace pitting testů v počáteční fázi kavitační eroze. V rámci kap. 6 se doktorand věnuje testování první metody, kdy za účelem zjištění použitelnosti PVDF senzoru provedl řadu testovacích měření. Při testování bylo použito metody pádu kuličky. Byla určena geometrie otvoru a metoda přilepení PVDF senzoru.

Následně proběhlo měření kavitačního účinku PVDF senzory. Autor uvádí informace o provedeném experimentu, kdy oblast kavitační eroze byla rozdělena na sedm proměřovaných podoblastí. Měření proběhlo senzory na jednotlivých pozicích a rovněž pro senzor zahrnující všechny pozice současně.

Měřené režimy tlaku na vstupu jsou uvedeny na str. 74 v tab. 7.1. Zpracování signálu z měření bylo provedeno v programu Matlab. Autor provedl vyhodnocení signálu dvěma metodami. První metodou A bylo nalezení maxim sil pulzů odpovídajících amplitudě pulzů. Pro vyhodnocení byl v Matlabu vytvořen program. Byla definována minimální vzdálenost mezi pulzy a minimální velikost pulzu pro daný režim. Alternativní metodou B vyhodnocení signálu bylo vyhodnocení maxim sil při dekompozici signálu. Vychází z předpokladu, že části signálu odpovídající účinku kolapsu jsou tvořeny větším počtem elementárních pulzů, které jsou na sebe superponovány a tvoří dojem jednoho pulzu. Vyhodnocení metodou B spočívá v nalezení hodnoty vrcholu pulzu, jeho polohy vůči počátku záznamu, ze kterého se dopočte požadovaný parametr Gaussovy funkce. Pulz je následně aproximován Gaussovou funkcí a odečten od signálu. Obdobně se pokračuje dalšími pulzy.

Výsledky obou metod jsou zpracovány do formy kumulovaných spekter maxim sil, která jsou prostředkem pro hodnocení účinku kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v kavitačním tunelu. Na základě kumulovaných spekter byla hodnocena průměrná maximální síla, počty pulzů pro vybrané úrovně maximálních sil a vliv rychlosti proudění na kavitační agresivitu. Jsou rovněž porovnány měření na jednotlivých pozicích a přes všechny pozice současně.

Následně byly provedeny pitting testy pro několik provozních režimů na sedmi pozicích testovaného disku, které odpovídaly pozicím měření PVDF senzory. Doba pitting testů na jednotlivých pozicích při daných provozních režimech je uvedena na str. 108 v Tab. 8.1. Profily s kavitačními pity byly skenovány kontaktním profilometrem. Skenovaný povrch byl následně předzpracován (vyrovnání roviny měřené oblasti, odečtení vzoru z naskenované oblasti). Následně byla vyhodnocena kumulovaná spektra průměrů pitů. Byl vyhodnocen počet pitů pro vybrané úrovně průměru pitů, kumulovaná spektra faktorů tvaru pitů a charakteristické parametry pitting testů. Výsledky pitting testů byly porovnány s výsledky měření PVDF senzory, kdy byl uveden princip odhadu síly vytvářející pit stanovený na základě pitting testů.

Autor rovněž vyhodnotil celkové množství pitů ve spektrech maxim sil s nalezením mezní hodnoty maximální síly pro vznik pitu. V závěru práce jsou shrnuty výsledky a hlavní závěry.

Dotazy k rozpravě

- Jaké vidíte hlavní perspektivy a případné slabé stránky obou zvolených experimentálních metod pro stanovení účinku kolapsu kavitačních bublin v blízkosti stěny (metoda stanovení impaktních sil pomocí PVDF senzorů a metoda pitting testů)?
- str. 99, obr. 7.26: Autor vyhodnotil změřený signál dvěma metodami. První metoda A spočívala v nalezení maxim sil pulzů odpovídajících amplitudě pulzů. Alternativní metodou B bylo stanovení maxim sil při dekompozici signálu. Autor uvádí, že ve výsledku hodnocení metodou B je patrný nárůst počtu maxim pulzů. Která z metod je dle autora více vhodná pro stanovení účinku kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů?
- str. 102: Autor provedl měření silového účinku od kolapsu kavitačních bublin PVDF senzory na sedmi měřených pozicích a rovněž pro senzor zahrnující všechny pozice současně. Jaké jsou výhody a nevýhody obou přístupů?
- str. 119, obr. 8.20: Autor uvádí princip odhadu síly vytvářející pit na základě pitting testů s využitím kumulovaných spekter maxim sil stanovených z měření silového účinku od kolapsu kavitačních bublin PVDF senzory a kumulovaných spekter průměrů pitů stanovených pitting testy. Je tento způsob možný? Co může ovlivnit přesnost stanovení síly vytvářející pit? Projeví se vliv metody A nebo B aplikované pro vyhodnocení změřeného signálu PVDF senzory? Ovlivní odhad síly měření silových účinků PVDF senzory na sedmi měřených pozicích oproti aplikaci senzoru zahrnujícího měření přes všechny pozice současně? Jak významně ovlivní zvolená hloubka vyhodnocení pitting testů kumulované spektrum průměrů pitů a následný odhad síly vytvářející pit na základě pitting testů? Jakým způsobem autor volil vhodnou hloubku vyhodnocení pitting testů?
- str. 120: Co může ovlivnit přesnost stanovení mezní hodnoty maximální síly, která jak uvádí autor je určující pro vznik pitu?
- str. 124: Autor uvádí, že pro agresivnější režim je potřeba větší síly na vytvoření pitu. Čím si to vysvětluje?
- str. 135: Autor uvádí možnost aplikovat ve strojích s kavitačním prouděním metodu měření kavitačních účinků piezoelektrickými PVDF senzory. Jaká je předpokládaná životnost těchto senzorů. Bude nutno provádět průběžně kalibrování PVDF senzorů?
- Literární prameny nejsou v seznamu použité literatury číslovány. Byly všechny uváděné literární odkazy v seznamu použité literatury (str. 136 až 140) rovněž citovány v textu práce?

Výsledky disertační práce a význam původního konkrétního přínosu autora disertační práce

Autor se zabýval experimentálním výzkumem účinku kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů. Experimenty provedl ve vysokorychlostním kavitačním tunelu laboratoře LEGI univerzity Université Grenoble Alpes a výzkumného centra CNRS UMR 5519 v Grenoblu ve Francii. Měření proběhlo při hydrodynamické kavitaci. Autor navrhl pro studium vlivu účinku kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchu použít metodu stanovení impaktních sil pomocí PVDF senzorů a alternativně pak metodu pitting testů.

Zvolená metoda stanovení impaktních sil pomocí PVDF senzorů byla testována a optimalizována. Testování proběhlo pomocí kalibrační metody pádu kuličky. Byla navržena geometrie otvoru pro přilepení senzoru. Rovněž byla testována a zvolena technologie lepení senzoru. Následně doktorand provedl měření účinku kavitačních bublin a jejich struktur pomocí PVDF senzorů na testovaném disku v sedmi testovaných pozicích a rovněž pro senzor zahrnující všechny pozice současně. Měření proběhlo při různých pracovních režimech (tlacích na vstupu testovací sekce). Zpracování signálu z měření bylo provedeno v programu Matlab. Autor vyhodnotil změřený signál dvěma metodami, kdy první metoda A spočívala v nalezení maxim sil pulzů odpovídajících amplitudě pulzů. Alternativní metodou B vyhodnocení signálu bylo stanovení maxim sil při dekompozici signálu. Následně autor zpracoval oběma metodami kumulovaná spektra maxim sil odpovídající účinku kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti pevného povrchu. Následně určil průměrnou maximální sílu, počty pulzů pro vybrané úrovně maximálních sil a vliv rychlosti proudění na kavitační agresivitu. Posoudil specifika měření na jednotlivých pozicích a přes všechny pozice současně.

Následně autor aplikoval metodu pitting testů za účelem studia vlivu účinku kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti pevného povrchu. Pitting testy proběhly pro několik provozních režimů na sedmi pozicích testovaného disku, které odpovídaly pozicím při měření PVDF senzory. Po skenování povrchu s kavitačními pity byla vyhodnocena kumulovaná spektra průměrů pitů, počet pitů pro vybrané úrovně průměru pitů, kumulovaná spektra faktorů tvaru pitů a charakteristické parametry pitting testů. V rámci porovnání výsledků pitting testů s výsledky měření PVDF senzory autor uvedl princip odhadu síly vytvářející pit stanovený na základě pitting testů a vyhodnotil celkové množství pitů ve spektrech maxim sil.

V závěru práce autor shrnul výsledky a hlavní závěry. Autor svou prací přispěl k rozšíření současného stavu poznání ve velmi aktuální a náročné oblasti výzkumu kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů s využitím experimentálních metod.

Formální úprava disertační práce, jazyková úroveň, publikační aktivity

Disertační práce má jasnou strukturu, je zpracována přehledně, na vysoké odborné i formální úrovni. Autor postupoval při zpracování disertační práce systematicky, kdy jednotlivé kapitoly na sebe logicky navazují. Práce je členěna do 9 kapitol, přičemž obsahuje celkem 141 stran textu. Text je bez chyb, v práci se téměř nevyskytují překlepy. Výklad průběžně doplňují kvalitně zpracované obrázky a tabulky, které jsou podrobně popsány a vysvětleny. Autor uvádí 74 odkazů na literární prameny, což je plně dostačující. Jednotlivé literární prameny nejsou v seznamu použité literatury číslovány. V rámci jednotlivých kapitol jsou uvedeny dílčí závěry.

Vyjádření k publikacím doktoranda

Autor uvádí v disertační práci na str. 141 celkem 9 odkazů na své odborné publikace. Jedná se o výstupy z konferencí vztahující se k problematice kavitace. Z toho byly dohledatelné v databázi WoS celkem 3 publikace a v databázi Scopus celkem 4 publikace. Rozsah publikačních aktivit doktoranda je dostatečný.

Doporučení

Oponovaná disertační práce Ing. Jana Hujera je uceleným původním dílem, přinášejícím nové vědecké poznatky z oblasti experimentálního výzkumu účinku kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů. Doktorand velmi dobře zpracoval dané téma dle stanovených cílů. Prokázal předpoklady pro systematickou vědeckou práci. Dosažené výsledky jsou původní a využitelné pro daný obor. Práce poskytuje prostor pro další navazující výzkum.

Stanovené cíle disertační práce byly dosaženy, práce splňuje požadavky na doktorskou práci ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb., proto ji doporučuji k obhajobě a po jejím úspěšném ukončení doporučuji udělení akademického titulu Ph.D.

Ostrava, 7. 11. 2019



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava

Posudek na disertační práci k získání titulu "PhD" v oboru *Aplikovaná mechanika*.

Název práce: *Studie kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů*

Autor práce: *ing. Jan Hujer*

Fakulta strojní Technická Universita v Liberci

Kavitace v hydraulických strojích představuje vážný problém. Technická praxe ukazuje, že se stává jedním z limitujícím faktorů životnosti jejich výkonových částí. Z těchto důvodů je detailní experimentální výzkum kolabující kavitační bublinky, popř. celého mraku bublin, v podmínkách hydrodynamické kavitace velmi potřebným. Současně se kavitačních účinků využívá ke zpevňování povrchů, tzv. pittingem. Formulace cílů práce má úzkou návaznost na aktuální úkoly českého strojírenství a současně řeší jak problémy eroze tak i problémy zpevňování povrchů. Jedním z potenciálních uživatelů tohoto výzkumu je Sigma Group v Lutíně. Z těchto důvodů je velmi užitečné, že předložená doktorská práce je podřízena následujícím cílům:

- ☐ studium kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchu
- ☐ návrh a otestování vhodného experimentálního zařízení generujícího dobře definovaný kavitační mrak
- ☐ nalézt vhodnou metodu vyhodnocení účinků kolapsu mraku

Hodnocení.

V první části práce (kap. 1 a 2) jsou stručně popsány základní vlastnosti kavitace a jejich erozivních účinků na obtékaný povrch. Velmi pečlivá rešerše prací zahraničních pracovišť dala doktorandovi podrobný vhled do problematiky generace kavitačního mraku a jeho účinku na povrchy. Je ukázán zásadní vliv vzdálenosti bublinky od povrchu vyjádřený parametrem γ kterým je poměr vzdálenosti středu bublinky od povrchu k prvnímu maximálnímu poloměru bublinky. Bylo zjištěno, že k největšímu poškození jetem kolabující bublinky dochází pro hodnoty parametru $\gamma \in (1,2; 1,4)$ a pro $\gamma < 0,3$. Vznik samotných bublin a jejich mraku je určen kavitačním číslem vyjadřující poměr tlakové energie ve vznikající bublince (rozdíl aktuálního tlaku v kapalině a tlaku nasycených par) k hustotě mechanické energie proudící tekutiny. Toto číslo obvykle značené jako σ je větší než 0,3. Nejčastěji 0,9. Vzhledem k tomu, že práce směřovala ke studiu hydrodynamické kavitace pro kterou nejsou na katedře energetických zařízení TUL podmínky (katedra vlastní jen ultrazvukový kavitační tester) je kap. 4 věnována vysokorychlostnímu tunelu laboratoře LEGI Université Grenoble Alpes. Toto zařízení s průtokem $8,2 \text{ l.s}^{-1}$ kohoutkové vody dovoluje studovat proudění při poklesu tlaku v testovací sekci až o 21 bar (kavitační číslo $\sigma=0,92$). Axiální vtok se v osově symetrické testovací části mění na tok radiální. Výsledkem jsou dobře detekovatelné symetrické obrazy kavitačního účinku. Toto byly hlavní důvody proč většina experimentů byla provedena na tomto zařízení a na vlastním pracovišti na TUL bylo vyvíjeno vyhodnocovací zařízení a metodika zpracování výsledku experimentů.

Druhá část práce (kap. 3 až 5) je věnována vývoji foliového piezoelektrického PVDF (polyvinylidene fluoride) senzoru a testování aktuálně použitých senzorů. Popsána je výroba senzoru fotolitografickou cestou i když k jeho praktickému použití z časových důvodů ještě nedošlo. Nakonec byl použit průmyslově vyráběný PVDF senzor firmy TE Connectivity. I když

má tento senzor relativně stálé vlastnosti je třeba ho otestovat a kalibrovat. Kalibrace byla provedena standardní metodou pádu kuličky. Vedle citlivosti na deformaci vyvolanou vnější silou (předpokládá se bodová o velikosti 90 až 240 N) je důležitá reakční rychlost (časová konstanta), která se pohybovala v hodnotách 0,06 ms. Relaxační čas této velikosti je postačující k rozlišení jednotlivých kolapsů pro bublinky maximálního prvního poloměru 50 μm. Nejrozsáhlejší je kapitola 7, která je věnována metodě měření kavitačních účinků (kolapsů bublin) na měřicí element. Kumulovaná spektra maxim sil v jednotkách počtu pulzů za sekundu na 1 cm², jsou vynášena v závislosti jak na velikosti síly generovaného jetem na příslušné pozici na senzoru (radiální vzdálenost na disku) tak i na parametrech proudící vody. Počet pulzů je aproximován Gaussovou křivkou. Ukazuje se, že v některých proudových režimech má rozdělení více než jeden vrchol, což svědčí o násobných kolapsech. Kavitační agresivita je vyjádřena pomocí dvou referenčních parametrů. Jedním z parametrů je počet pulzů za sekundu na cm² a druhý parametr síla v Newtonech generovaná kolapsem. Tyto dva parametry jsou spojeny exponenciální funkcí a závisí lineárně na rychlosti proudící vody. Tímto způsobem je vyjádřen vliv rychlosti na kavitační agresivitu.

V kap. 8 jsou účinky kavitačních kolapsů vyhodnocovány na základě pitting testů. Každý kolaps zanechá v materiálu důlek, jehož geometrie je závislá na síle jetu a viskoelastických vlastnostech materiálu. K vyhodnocení účinku kolapsu byly využity zjednodušené materiálové vztahy, které zahrnují i plastickou deformaci. Nejčastěji užívaným vztahem je Hollomonova rovnice s exponentem zpevnění (pro kovy 0,1-0,5). Pro čistě elastický materiál je exponent roven jedné. Uvážíme-li, že rychlost kolapsu se odhaduje na 10⁻⁵ s, při odpovídající relativní deformaci přibližně 5.10⁻² [-] je i rychlost deformace materiálu značná, přibližně 5.10³ s⁻¹. Z těchto důvodů je třeba brát v úvahu i viskózní vlastnosti materiálů, tj. závislost napětí na rychlosti deformace. Odtud je zřejmé, že nalézt přesnou závislost mezi dopadající silou a trvalým deformačním účinkem je dost složité. To je také důvod proč porovnání výsledků kavitačních účinků vyhodnocených pomocí PVDF senzoru (impaktní síla) a pitting testem (síla plastické deformace) kvantitativně nekorespondují, viz Obr. 8.29. Nicméně kvalitativní závislosti odpovídají. Toto porovnání považuji za unikátní a nejdůležitější výsledek předložené práce.

- *Zhodnocení významu disertační práce pro obor.* V práci jsou použity nejmodernější metody určování účinků hydrodynamické kavitace. Je řešena souvislost mezi měřenými impaktními silami kolabujících bublin a skutečnými důsledky na obtékaný materiál. Vzhledem k tomu, že tento problém není dosud uspokojivě vyřešen, považuji tuto práci za velmi důležitou. Konkrétní výsledky jistě pomohou lépe objasnit účinky v současné době populární metody kavitačního zpevnění materiálů. Tato metoda je zatím využívána na základě empirických poznatků.
- *V práci použité metody považuji za vhodné a i způsob jejich aplikace za zdařilý.* Jak teoretická formulace problému tak i návrh a vyhodnocení vlastních experimentů odpovídá současným trendům v oblasti interakce kavitujícího proudění s obtékaným povrchem.
- *Výsledky disertační práce jsou původní a i z praktického hlediska velmi cenné.* Zvláště oceňuji porovnání výsledků kavitačních účinků hodnocených pomocí PVDF senzoru a pitting testu. Kvantitativní porovnání těchto testů považuji za nejdůležitější výsledek předložené práce.
- *Doktorand prokázal patřičné znalosti v oboru experimentální hydrodynamiky.* Způsob jakým tak složitý problém zpracoval ukazuje, že si osvojil vědecké metody práce. Formální úroveň

práce je postačující. V práci jsem nenašel žádné formální ani obsahové nedostatky. Cíle stanovené v disertaci byly splněny.

- *Doktorand publikoval jeden článek v Journal of Physics: Conference Series, účastnil se jednoho mezinárodního sympozia s publikací ve sborníku a čtyřech konferencí s mezinárodní účastí v ČR. Dále se účastnil dvou EPJ Web of Conferences. Jeho publikační činnost považuji za dostačující.*

K práci mám následující dotazy:

1. Jak velké kolabující bublinky jsou zachycovány použitým PVDF senzorem. Z grafů na Obr. 8.29 je patrné, že počet pulzů je až o dva řády vyšší než počet pitů. Je to možné vysvětlit tím, že jen pulz který má je určitou větší velikost způsobí důlek?
2. Vztahem (7.3) jste zavedl Strouhalovo číslo (St) popisující frekvenci vzniku (zániku) kavitační struktury. Teoretická analýza provedená v souvislosti s experimenty v Sigma Lutín s profilem NACA 2412 Span/chord: 1.25 (150/120 mm) s rychlostmi vody od 7 do 13 m/s ukázala na diskrétní hodnoty $St = 0,5; 0,25; 0,125$ a experimentálně byly zjištěny hodnoty $St = 0,45; 0,26; 0,14$. Máte nějaký odhad jeho velikosti při Vašich experimentech?

Závěr

Práce má dobrou odbornou i grafickou úroveň a tvoří kompaktní celek, počínaje formulací cílů, přes definici metod jak těchto cílů dosáhnout až k dobře interpretovatelným výsledkům. Autor práce *samostatně navrhnul, otestoval a kalibroval snímač impaktních jetů generovaných kolabujícími bublinkami. Provedl a vyhodnotil velké množství experimentů a porovnal účinky hydrodynamické kavitace měřené piezoelektrickými snímači a pitting testem.* Mohu konstatovat, že předložená práce splňuje ustanovení § 72, odst. 3 Zákona č. 111/1998 o vysokých školách a doporučuji proto aby byl **Ing. Janu Hujerovi** po její úspěšné obhajobě, udělen titul PhD na Fakultě strojní Technické University v Liberci..

22. srpna 2019

Prof. Ing. František Maršík, DrSc
Ústav termomechaniky AVČR

Posudek dizertační práce Ing. Jana Hujera na téma:

Studie kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů

Ing. Jan Hujer se ve své práci zabývá problematikou, která je velmi aktuální v oblasti návrhu a provozu hydraulických strojů. V současnosti jsou kladené na hydraulické stroje požadavky na provoz ve velmi širokých provozních pásmech, dosti častí i v oblastech, ve kterých se nelze vyhnout bezkavitačnímu provozu. Pak je nutné umět predikovat stupeň a vývoj kavitačního opotřebení. Bohužel zatím neexistuje žádný spolehlivý nástroj – model kavitační eroze – schopný tento úkol zvládnout. Proto je cenné, že se ve své dizertační práci doktorand snaží o pochopení procesu materiálové eroze v důsledku hydrodynamické kavitace. Samozřejmě předkládá pouze parciální výsledky, ale to u tak obsáhlé problematiky ani jinak nelze.

A) Zhodnocení významu dizertační práce pro obor

Dizertační práce představuje další krok k pochopení mechanismu kavitační eroze, ale především je to cenný soubor metodik pro studium materiálové eroze hydrodynamickou kavitací. Autor realizoval sérii experimentů dvěma rozlišnými technikami a spojil je dohromady pro zjištění síly vytvářející danou velikost pitu. Ve své práci podrobně zdokumentoval návrh experimentů, jejich realizaci i vytvoření metodik pro vyhodnocení experimentálně zjištěných dat. Dizertační práce tak může sloužit jako vhodný podklad např. pro tvorbu predikčních modelů kavitační eroze (tj. matematického modelu chování kavitační bubliny a energie generované při kolapsu kavitační bubliny na straně jedné a korelace s příslušnou materiálovou odezvou na straně druhé).

B) Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění stanoveného cíle

V úvodu práce je kvalitní rešerše k dané problematice, kde bych jen uvítal větší rozbor kolapsu kavitační bubliny a bližší pohled na základní rovnici dynamiky kavitační bubliny – rovnici Rayleigh-Plessetovu.

Z dalšího textu je zřejmé, že většina experimentální části práce vznikala za doktorandova pobytu u prof. Franca v laboratoři LEGI v Grenoblu, což je světově renomované pracoviště v oblasti výzkumu kavitace. Použitá metodika exp. výzkumu odpovídá moderním trendům, tj. využití PVDF senzorů a mikroprofilometrie erodovaných povrchů.

Jedinou výhradu mám k chybějící diskuzi a prezentaci experimentálních nejistot používaných metod a naměřených výsledků. Celá metodika (viz např. obr. 8.20) se opírá o přesnost stanovení počtu pulzů, resp. počtu pitů, přičemž vyhodnocení obou veličin není zcela triviální, je doprovázeno celou řadou předpokladů, aproximací a zanedbání.

Cíle stanovené v úvodu dizertační práce byly splněny.

C) Stanovisko k výsledkům dizertační práce a významu původního konkrétního přínosu autora dizertační práce

Dle mých znalostí zkoumané problematiky se jedná o původní výsledky. Doktorand využíval pokročilých experimentálních technik: PVDF senzorů a profilometrického vyhodnocování pittingu erodovaného povrchu a především se věnoval způsobům jak změřená data smysluplně vyhodnotit. To že doktorand metodicky navazuje na závěry výzkumu prof. Franca, v jehož laboratoři pracoval, a dále je rozvíjí považuji za logické a správné.

V závěru autor správně formuluje otevřené otázky, které zůstávají nebo si vyžadují hlubší rozpracování.

K přínosu dizertační práce viz můj komentář ve zhodnocení významu dizertace a v závěrečném doporučení.

D) Vyjádření k systematickosti, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni dizertační práce

Práce je psána velmi přehledně, bez gramatických chyb, je dobře graficky upravena a ani po stylistické stránce k ní nemám výhrady.

E) Vyjádření k publikacím studenta DSP

V seznamu publikované literatury se až na jednu výjimku (Cavitation Symposium 2018) nachází pouze publikace z tuzemských konferencí, přitom potenciál pro publikaci závěrů dizertace je velký.

Doktorand během práce na své dizertaci dospěl k celé řadě původních výsledků po stránce návrhu a provedení experimentu, vyhodnocení výsledků i celkové metodiky experimentálního výzkumu kavitační eroze, navíc v rámci spolupráce v mezinárodním týmu. Je škoda, že se mu tyto výsledky nepodařilo dostatečně publikovat. Je však možné, že jsou tyto publikace v současné době v recenzním řízení nebo alespoň ve fázi přípravy.

F) Jednoznačné vyjádření oponenta, doporučení/nedoporučení dizertační práce k obhajobě

Ing. Jan Hujer prokázal schopnost samostatné tvůrčí vědecké práce a ve své dizertaci prezentoval původní výsledky, které lze dále využít pro studium kavitační eroze. Velmi bych doporučoval, aby výzkum nadále pokračoval a směřoval k propojení výzkumu dynamiky kavitačních bublin, který probíhá i na pracovištích v ČR, a mechaniky kavitační eroze. Výsledný pohled na proces kavitačního poškození i možnost jeho predikce by poskytl podklad pro tvorbu modelu kavitační eroze, nástroje, který by uvítala celá řada inženýrů nejen v oblasti návrhu hydraulických strojů, ale také spalovacích motorů, lodních šroubů atd.

Práci **doporučuji** k obhajobě.

Otázky a připomínky k předložené dizertační práci:

- PVDF sensory ani pitting testy ze své podstaty zřejmě nemohou rozlišovat mezi dopadem rázové vlny při kolapsu kavitační bubliny a při dopadu micro-jetu. Navíc existují i další jevy podílející se na kavitační erozi. Mohl byste komentovat i další efekty způsobující kavitační erozi?
- Není zcela jasné co autor označuje jako v_{cav} . Dle seznamu veličin je to „rychlost proudění na kavitační struktuře“ (???), dle např. str. 89 je to rychlost proudění bez bližší specifikace. Dle vztahu (7.2) by se čtenář mohl domnívat, že souvisí s micro-jetem, ale také s hydraulickým rázem po kolapsu bubliny. Prosím o vysvětlení.
- Na více místech v textu je použito sousloví „agresivita kavitace“ bez další definice, přitom pro bližší pochopení textu je ujasnění tohoto pojmu dosti podstatné.

- Souvisí vícenásobné peaky na obr. 7.19 vpravo s tzv. reboundy při kolapsu kavitační bubliny?
- Při popisu kolapsu kavitačních struktur (kapitola 1.6) bych doporučoval využívat parametr β zavedený Brennenem a d'Agostinem.
- Na obrázku kavitovaného disku (obr. 4.5) se vyskytuje výrazná nesymetrie. Je dána nesymetrickým uložením disku nebo máte jiné vysvětlení?
- Na charakter kavitace má výrazný vliv obsah rozpuštěného vzduchu, přitom ten v průběhu prezentovaných experimentů měřen nebyl. Je pouze zmíněno, že byla použita kohoutková voda. Mohl byste případný vliv rozpuštěného vzduchu na výsledky exp. zkoušek komentovat?
- U komentáře ke vztahům (8.9) a (8.10) byly zřejmě zaměněny pojmy čísel a jmenovatel.

V Brně 21.10.2019



doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.