

Posudek disertační práce
Aerodynamický hluk lopatkových mříží při nízkých Machových číslech
autor Ing. Jan Králíček
Fakulta strojní ČVUT v Praze
Studijní obor Technika prostředí

Rozsáhlá disertační práce obsahuje celkem 161 stran a je rozdělena do 10 kapitol. Dále obsahuje přehled použitých veličin, seznam použité literatury a vlastních publikací. Práce se zabývá vyšetřováním aerodynamického hluku lopatkových mříží při nízkých rychlostech používaných ve vzduchotechnických systémech. První část práce je věnována matematickému modelování aerodynamického hluku a jeho realizaci pomocí výpočetní mechaniky tekutin. Druhá část se zabývá experimentálním vyšetřováním aerodynamického hluku vznikajícího při obtékání lopatek používaných ve vzduchotechnických systémech. Na základě numerické simulace je pak navržen tvar lopatek produkující nižší hladinu aerodynamického hluku.

Po úvodní kapitole je druhá kapitola věnována rešerši jednak numerického modelování vzniku a vyzářování hluku při obtékání lopatek a jednak současného stavu vzniku hluku při nízkých rychlostech, tj. v oblasti techniky prostředí. Ve třetí kapitole jsou uvedeny cíle práce. Hlavním cílem práce je návrh optimálního tvaru lopatky pro vzduchotechnické systémy s minimálním generovaným hlukem pomocí matematického a experimentálního modelování. Pro dosažení tohoto cíle bylo třeba najít vazbu mezi fluktuacemi turbulentního proudění resp. vibracemi lopatek a generovaným akustickým hlukem. Ve čtvrté kapitole jsou shrnuty metody matematického modelování vzniku a šíření aerodynamického hluku, vycházející z klasické Lighthillovy analogie a modelu Ffowcs-Williamse a Hawkingse. Ty jsou doplněny popisem řešení nestacionárního turbulentního proudění pomocí Navier-Stokesových rovnic pomocí LES modelu.

Nejrozsáhlejší pátá kapitola obsahuje jednak zevrubný popis metodiky akustických měření, měření vibrací lopatek i proudového pole a jednak rozbor provedených měření včetně vlivu různých faktorů, jako např. nastavení sondy drátkového anemometru či turbulence nabíhajícího proudu. Měření byla prováděna pro tři typy lopatkových mříží používaných ve vzduchotechnických zařízeních, různé natočení lopatek od 0° do 45° a rychlostí do 18 m/s. Pro porovnání s výsledky numerických simulací bylo vyšetřováno i obtékání kruhového válce o průměru 4 mm. Cílem experimentu je najít vazbu mezi fluktuacemi rychlosti proudění, vibrací obtékaných lopatek a celkovým generovaným akustickým hlukem. Výsledky jsou prezentovány jednak frekvenčními korelacemi mezi zvukem, vibracemi a fluktuací rychlosti a jednak závislostí hladiny akustického tlaku na Strouhalově a Reynoldsově čísle.

V šesté kapitole je popsána numerická simulace aerodynamického hluku pomocí komerčního software ANSYS Fluent. Výsledky získané pomocí LES modelu turbulence se Smagorinského subgrid modelem byly porovnány s experimenty. Výpočty byly provedeny při rychlosti 12 m/s a nulovém vstupním úhlu pro jeden používaný tvar lopatky L1D v různém uspořádání (délka lopatky, počet lopatek), válec o průměru 4 mm a nově navrženou lopatku čočkovitého tvaru s ostrou náběžnou i odtokovou hranou. Tato lopatka generuje v daném uspořádání nižší aerodynamický hluk než běžně používaná lopatka.

Sedmá kapitola obsahuje stanovení nejistot měření rychlosti proudění sondou se žhaveným drátkem a měření zvuku pomocí mikrofónů. Osmá kapitola obsahuje popis metodiky měření, způsobu vyhodnocení experimentů a dílčí závěry vyplývající z provedených měření.

V deváté kapitole je provedeno shrnutí teoretického a praktického přínosu disertační práce. Dále jsou naznačeny další možnosti pokračování výzkumu dané problematiky. Hlavním přínosem práce je rozbor vzniku a šíření aerodynamického hluku vznikajícího při obtékání koncových lopatkových mříží používaných ve vzduchotechnických systémech. Na základě provedených experimentů a numerických simulací je navržena lopatková mříž se sníženou hladinou aerodynamického hluku. V závěru jsou pak shrnuty dosažené výsledky a porovnány s cíli disertační práce.

Připomínky a dotazy

K disertační práci nemám zásadní připomínky, týkající se přístupu k řešení zadaného problému. Práce je velmi rozsáhlá a obsahuje řadu podrobností, týkající se zejména měření. V textu jsou však některé gramatické chyby např. „...výrové struktury...“ na str. 66 a 120, čtvrtá kapitola se snad má jmenovat „Teoretické poznatky o aerodynamickém hluku“, nejedná se o stacionární lopatky ale o stacionární proudění, většina zkratk je vysvětlena v textu, ale chybí vysvětlení zkratky FFT, často jsou používány anglické výrazy jako např. „...peak...“ a dále výrazy popisující použité nastavení komerčního software, jako např. „...pressure based...“, „...no perturbation...“, převzaté zřejmě z manuálu ANSYS Fluent. Tyto drobné nedostatky poněkud kazí dojem z práce, která jinak obsahuje řadu zajímavých výsledků. Dále uvádím některé připomínky a dotazy k disertační práci:

- 1) V kapitole 5.2.3 „Vliv turbulence nabíhajícího proudu na generování zvuku“ se uvádí, že generovaný hluk nezávisí na struktuře nabíhajícího proudu. Vlastní obtékání těles je ale do jisté míry turbulencí nabíhajícího proudu ovlivněno, zejména pokud se jedná o polohu přechodu na lopatce i rozsah případného odtržení při vyšších úhlech náběhu. Hodnotu intenzity turbulence nabíhajícího proudu před mříží při experimentech $I_t \approx 0,015-0,02$ lze odhadnout pouze z obr. 5-40 a 5-41. Tato hodnota je ve srovnání s obtékání leteckých profilů poměrně vysoká, takže vliv turbulence nabíhajícího proudu bude zřejmě malý.
- 2) Výpočet turbulentního proudění byl proveden LES metodou pomocí jednoduchého subgrid modelu Smagorinsky-Lilly (1963). Na str. 45 je uveden rozsah konstanty C_s pro daný model, ale v práci není uvedena definice turbulentní vazkosti, ani vztah pro délkové měřítko, kde se tato konstanta objevuje.
- 3) Jaké byly zadávány vstupní hodnoty turbulentního proudění na vstupu do výpočetní oblasti? Ty jsou nezbytné pro určení parametrů pro výpočet, např. v použitém modelu pro určení Kolmogorova časového měřítka, které je směrodatné pro volbu časového kroku, jak se uvádí na str. 45.
- 4) Z popisu numerické simulace na str. 115 není zřejmé, co znamená, že „...Proudění v části nerozrušeného proudu bylo laminární (no perturbation)...“.
- 5) Výpočty byly provedeny pro lopatku L1D, válec a navrženou čočkovitou lopatku. Proč nebyly provedeny výpočty též pro lopatku L3 se zaoblenou náběžnou a odtokovou hranou, která se nejvíce podobá nově navržené lopatce?
- 6) Proč byly výpočty provedeny pouze pro úhel nastavení 0° ? Navržená lopatka s ostrou náběžnou hranou je na úhel náběhu více citlivá, než lopatky se zaoblenou náběžnou hranou a může dojít k odtržení již na náběžné hraně a tím ke generaci vyšší hladiny akustického hluku.

Závěr a hodnocení

Téma předložené disertační práce, zaměřené na vyšetřování aerodynamického hluku lopatkových mříží používaných ve vzduchotechnických systémech a možnosti jeho snížení, je velmi aktuální. Stanovené cíle disertační práce, které jsou nalezení vztahů mezi fluktuacemi rychlosti resp. vibracemi obtékaného tělesa a generovaným hlukem a návrh lopatkové mříže s nižší hladinou aerodynamického hluku, byly splněny. Zvolený postup vychází z rešerše rozboru současných přístupů k řešení daného problému a odpovídá soudobým metodám experimentálního vyšetřování i numerické simulace. Získané výsledky jsou přínosem pro studium vzniku aerodynamického hluku v lopatkových mřížích i pro praktickou aplikaci ve vzduchotechnických systémech. Výsledky disertace byly publikovány v domácích časopisech a na mezinárodních konferencích.

Autor prokázal odpovídající znalosti a schopnost samostatné vědecké práce. Některé formální nedostatky uvedené výše nijak nesnižují kvalitu dosažených výsledků. Disertace splňuje všechny podmínky podle zákona o vysokých školách č.111/1998 Sb. ve znění předpisů a proto ji doporučuji k obhajobě.

V Praze dne 6. prosince 2021