

Pasivní řízení osově symetrického proudu vzduchu

Bc. Pavlína Pušková

Vedoucí práce: Prof. Ing. Pavel Šafařík, CSc., Doc. Ing. Zdeněk Trávníček, CSc.

Abstrakt

Práce se zabývá pasivním řízením osově symetrického proudu vzduchu pomocí rezonátoru. Cílem je zjistit, jak ovlivňuje rezonátor chování proudu. Pro ověření známých teoretických poznatků je experimentálně naměřena frekvenční charakteristika Helmholtzova rezonátoru. Dále je zjištěna spektrální výkonová hustota signálu z mikrofonu pro jednotlivé režimy proudění ($Re = 1600, 5000, 10\ 000$ a $30\ 000$) a různé objemy rezonátoru. U vybraných režimů jsou naměřeny vlastnosti proudu (poklesy rychlosti v ose proudu a rychlostní profily) pomocí Pitotovy sondy. Následně jsou porovnány vlastnosti proudu bez rezonátoru a s rezonátorem.

Klíčová slova

Osově symetrický proud, pasivní řízení, rezonátor

1. Úvod

Řízení proudových polí je aktuální problém v mechanice tekutin. Cílem řízení je ovlivnit chování proudu, tak aby se dosáhlo požadovaných účinků např. zvýšení směřování, zlepšení vlastností proudu či zvýšení přestupu tepla. Proudová pole lze řídit aktivně pomocí přívodu energie (např. pomocí řídicích proudů), nebo pasivně pomocí úprav geometrie zařízení. Pasivní řízení je většinou jednodušší. Tato práce se zabývá pasivním řízením proudu pomocí rezonátoru. Předpokládá se, že akustické efekty způsobí větší intenzitu promíchávání proudu a tím zkrátí jeho jádro a rozšíří jeho profil.

Na začátku práce jsou uvedeny známé teoretické poznatky. Poté je v práci ověřena teorie Helmholtzova rezonátoru, který je pro řízení použit. A dále jsou zkoumány účinky rezonátoru na proud. V práci je popsáno experimentální zařízení, použité měřicí přístroje a metody, které byly použity. Na základě naměřených spektrálních výkonových hustot jednotlivých režimů jsou vhodně zvoleny ty režimy, u kterých je předpoklad žádoucího účinku rezonátoru na proud. U těch jsou změřeny charakteristiky proudu a vyhodnoceny integrální hodnoty. V závěru je rozbor výsledků a zhodnocení účinku pasivního řízení.

1. Přehled poznatků

1.1. Osově symetrický proud

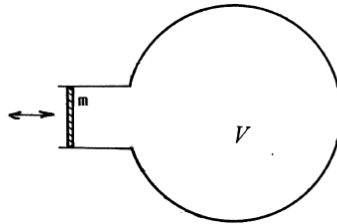
Zatopený osově symetrický proud je proud tekutiny, která má přibližně stejné látkové vlastnosti jako prostředí do kterého vytéká. Charakteristický rozměr popisující daný proud je průměr trysky, z které tento proud vytéká. *Reynoldsovo* číslo je potom dáno vztahem:

$$Re = \frac{U_m D}{\nu}, \quad (1)$$

kde U_m je střední rychlost v ústí trysky a ν kinematická viskozita. Po výtoku z trysky lze u turbulentního proudu pozorovat tři odlišné oblasti. Na začátku proudu u ústí trysky se nachází tzv. potenciální jádro proudu. Proud si zde zachovává svou výstupní rychlost U_m . Ve smykové vrstvě proudu nastává směšování proudu s okolním prostředím a tím se potenciální jádro směrem od ústí trubice zmenšuje. Cca ve vzdálenosti $x = (4\div 5) D$ poté úplně zaniká. Dále následuje oblast přechodová a za ní oblast plně vyvinutého proudu [2,11].

1.2. Helmholtzův rezonátor

Tento rezonátor je tvořen dutinou o určitém objemu V , v němž se nachází určitá hmotnost vzduchu. Dutina je zakončena hrdlem (obrázek 1).



Obr. 1. Helmholtzův rezonátor [převzato a upraveno z 12]

Rezonanční frekvence je dána vztahem:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl}}, \quad (2)$$

kde c ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) je rychlost zvuku, S (m^2) je průřez hrdla rezonátoru, V (m^3) objem rezonátoru a l' (m) korigovaná délka hrdla rezonátoru zahrnující do výpočtu nejbližší prostředí před hrdlem a za hrdlem. Korigovaná délka se spočítá z:

$$l' = l + \frac{8}{3\pi} D, \quad (3)$$

kde l (m) je skutečná délka hrdla a D (m) je průměr hrdla [12].

1.3. Výkonová spektrální hustota

Výkonová spektrální hustota (anglicky *Power spectral density* - PSD) představuje rozdělení signálů v závislosti na frekvenci. Výkonovou spektrální hustotu $S_{xx}(\omega)$ lze definovat na základě autokorelační funkce $R_{xx}(\tau)$ pomocí Wiener-Chinčinových vztahů. Tyto dvě funkce jsou dány vztahy:

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4)$$

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (5)$$

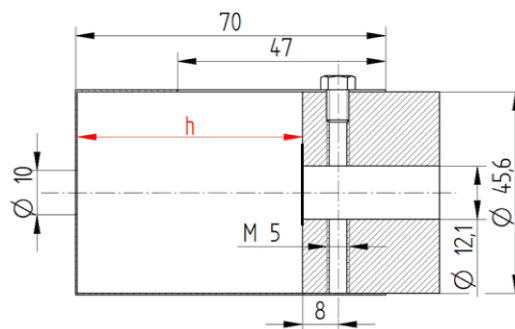
Obě funkce jsou ve vztahu přímé a zpětné Fourierovy transformace. V grafu představuje plocha spektra (v souřadnicích frekvence $f = \frac{\omega}{2\pi}$) výkon daného signálu [13].

2. Ověření teorie Helmholtzova rezonátoru

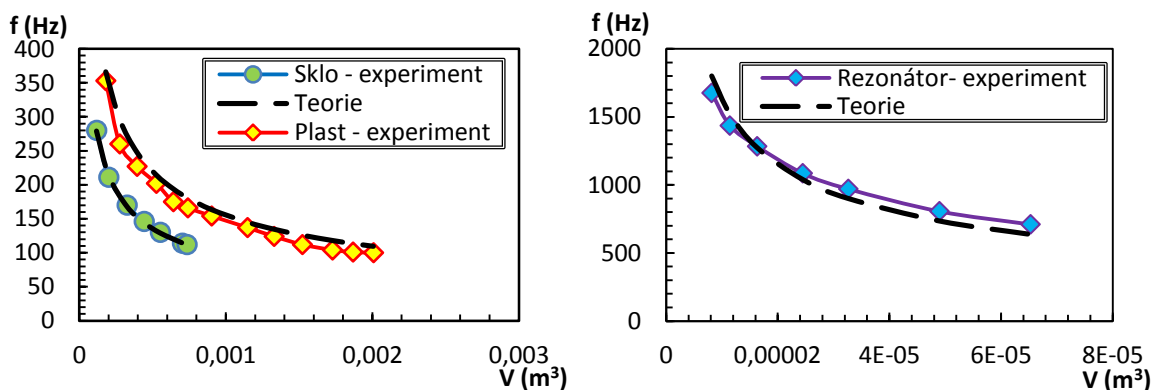
Pro ověření teorie Helmholtzova rezonátoru byl proveden experiment, při kterém se naměřila závislost rezonanční frekvence na objemu rezonátoru. Jako rezonátor byly použity tři různé druhy nádob. A to dvě láhve (skleněná a plastová) a rezonanční dutina, která byla později použita v experimentu pasivního řízení proudu. Skleněná láhev má maximální objem $V = 0,73$ l a délku hrdla $l = 80$ mm. Plastová láhev má maximální objem $V = 2,0$ l a hrdlo dlouhé $l = 27,3$ mm. Rezonátor používaný k pasivnímu řízení je zobrazen na obrázku 2. Jeho maximální objem činí $V = 0,06$ l. Objem rezonátoru lze snadno měnit nastavením hloubky dutiny. Hrdlo zde představuje kruhový otvor v plechu o tloušťce $l = 0,4$ mm a průměru $D = 10$ mm (stejný jako průměr trysky).

Pro vyhodnocení rezonanční frekvence byl použit elektretový mikrofón, jehož signál byl vyhodnocován v programu Spectrum Lab V2.77. Ten zobrazuje graf PSD, ze které je možné odečíst rezonanční frekvenci jako maximum průběhu.

Naměřené hodnoty byly porovnány s vypočítanými teoretickými hodnotami podle vzorce (2). Na obrázku 3 jsou vyneseny požadované závislosti. Nejlepšího shody bylo dosaženo u skleněné láhve, kde byla odchylka maximálně 1,4 %. U láhve plastové potom odchylka činila maximálně 14 %. Ta byla nejspíše způsobena částečně pružným materiálem. Odchylka u rezonátoru byla maximálně 10%. Naměřené hodnoty tedy dobře odpovídají těm spočítaným.



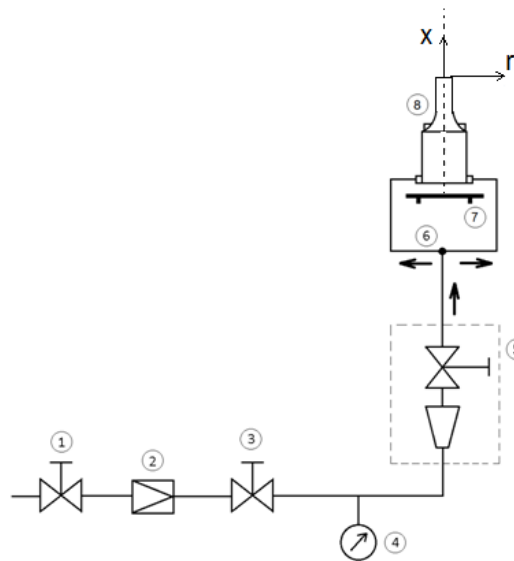
Obr. 2. Rezonátor



Obr. 3. Rezonanční frekvence Helmholtzova rezonátoru

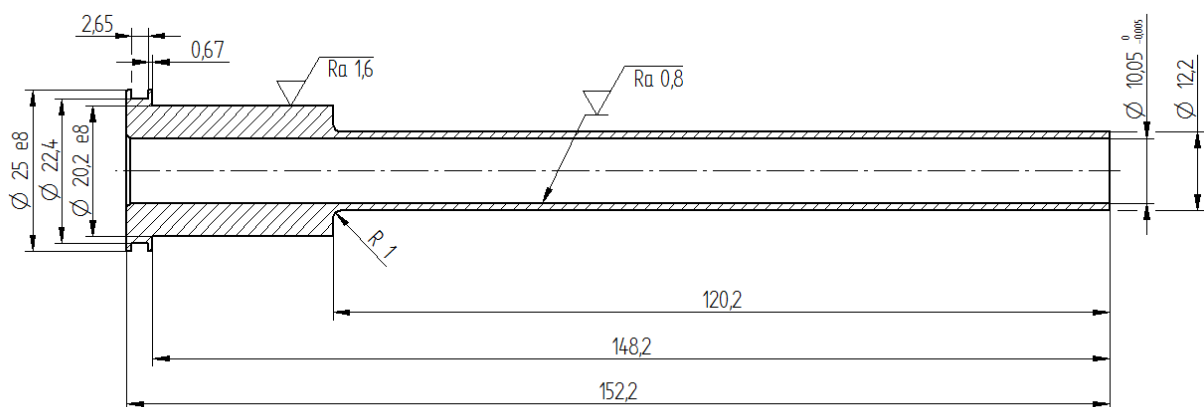
3. Experimentální zařízení

Experimentální zařízení se skládá z několika hlavních částí. Přívod vzduchu do soustavy je zajištěn z centrálního tlakového rozvodu v budově. Jak je vidět na obrázku 4, vzduch je přiveden do uzavíracího ventilu. Dále vzduch pokračuje přes redukční a škrťací ventil do rotametru, kde je měřen průtok. Před rotametrem je měřen tlak pomocí manometru. Vzduch z rotametru postupuje dále přes rozbočku vzduchu do trysky. Tryska (obrázek 5) je umístěna ve vertikální poloze. Na trysce je nasazen rezonátor (obrázek 2) a z něho proudí vzduch do volného prostoru místnosti.



- | | | | |
|---------------------|---------------------|-------------------|-------------|
| 1. Uzavírací kohout | 2. Redukční ventil | 3. Škrťací ventil | 4. Manometr |
| 5. Rotametr | 6. Rozbočka vzduchu | 7. Stůl | 8. Tryska |

Obr. 4. Schéma experimentálního zařízení



Obr. 5. Schéma použité trysky

Na měření tlakových rozdílů byly použity elektrické tlakoměry Greisinger GMH 3156 s piezoelektrickými snímači. Bylo použito několik snímačů v rozsahu maximálními hodnotami měřeného tlaku od 250 Pa (s rozlišením 0,1 Pa) do 2,5 kPa (s rozlišením 1Pa).

Na měření aktuálního barometrického tlaku v místnosti byl použit staniční barometr s rozlišením stupnice 1 hPa. Na měření požadovaného průtoku byl použit plovákový průtokoměr. Plovák (v našem případě koule) umístěný v mírně konické skleněné trubici je nadnášen proudem vzduchu. Ten se ustálí v poloze, při níž jsou dynamické síly v rovnováze.

Na skleněné trubici se nachází stupnice pro odečítání daného průtoku. Ta však platí pouze pro medium s určitou hustotou. Při měření průtoku jiné tekutiny je třeba získané hodnoty přepočítat. Skutečný průtok při měření plynu pak bude odpovídat vztahu [9]:

$$Q' = Q \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_1'}} \quad (6)$$

Kde hodnoty s apostrofem jsou hodnoty měřené tekutiny a hodnoty bez apostrofu jsou pro tekutinu, na níž byl daný rotometr cejchován. Dosazením stavové rovnice plynu:

$$\frac{p}{\rho} = r \cdot T \quad (7)$$

získáme vztah průtoku pro přepočet na daný tlak a danou teplotu:

$$Q' = Q \cdot \sqrt{\left(\frac{p}{p'}\right) \cdot \left(\frac{T'}{T}\right)} \quad (8)$$

Při měření Pitotovou sondou se rychlost zjišťuje nepřímou metodou pomocí měření tlaku. Rychlost se následně dopočítává z Bernoulliho rovnice. Rozdíl tlaků $p_c - p_s$ je roven tlaku dynamickému, kde p_c je tlak celkový (v tomto případě měřený Pitotovou sondou) a p_s je tlak statický (v tomto případě roven tlaku barometrickému) [1].

Rychlost u se následně spočítá upravením Bernoulliho rovnice do vzorce [1]:

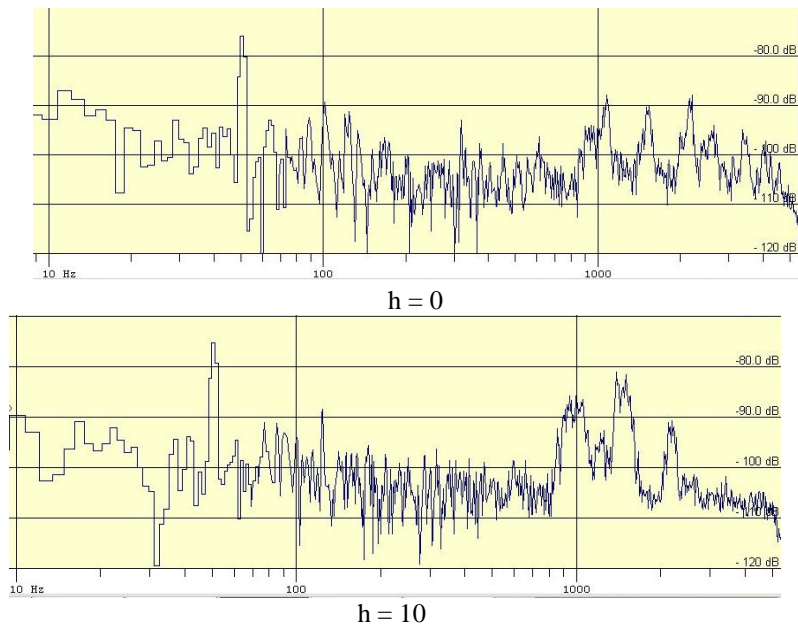
$$u = \sqrt{2 \cdot \frac{p_c - p_s}{\rho}} = \sqrt{2 \cdot \frac{p_d}{\rho}} \quad (9)$$

V tomto experimentu byla použita Pitotova sonda napojená na elektrický manometr, který zobrazoval přímo dynamický tlak.

4. Výsledky provedených měření

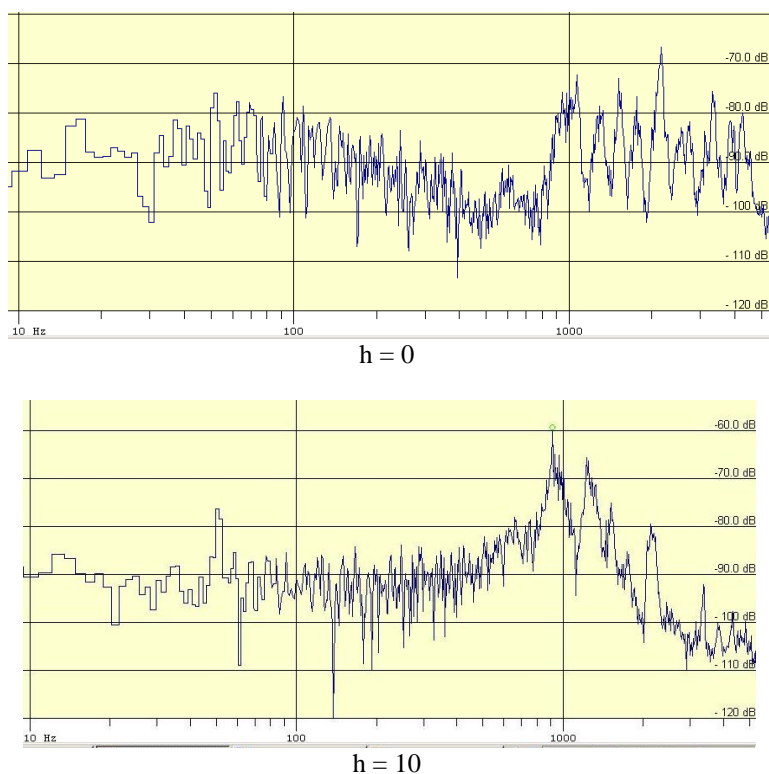
4.1. Měření výkonové spektrální hustoty

Měření PSD bylo provedeno pro režimy $Re = 1600, 5000, 10\,000$ a $30\,000$ a pro různé objemy rezonátoru ($h = 0, 5, 8, 10, 12, 15, 20, 30, 40$). Pro měření byl použit elektretový mikrofon, jehož signál byl vyhodnocován v programu Spectrum Lab V2.77, stejně jako v případě experimentu s Helmholtzovým rezonátorem. Na následujících obrázcích jsou pro představu zobrazeny průběhy PSD vždy pro $h = 0$ a $h = 15$ mm.



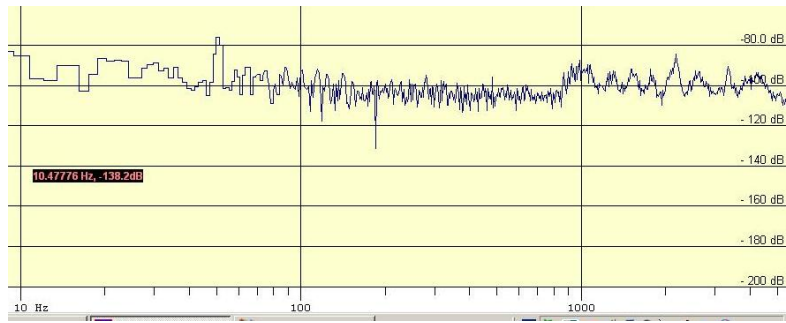
Obr. 6. PSD pro $Re = 1600$

Na obrázku 6 Jsou zobrazeny spektrální výkonové hustoty pro režim $Re = 1600$. Lze vidět, že frekvence se příliš neliší. Rezonátor chování proudu ovlivňuje málo díky relativně malým rychlostem. Proto nebyl tento režim v dalších měřeních sledován.

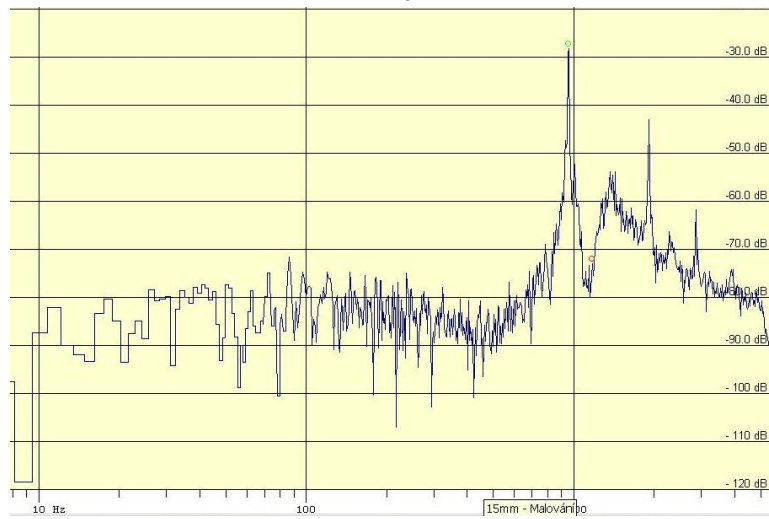


Obr. 7. PSD pro $Re = 5000$

Na obrázku 7 je vidět, jak se mění rezonanční frekvence s narůstajícím objemem rezonátoru. Pro $Re = 10\ 000$ a $30\ 000$ (Obr. 8 a 9) jsou již patrné vysoké špičky rezonančních frekvencí. U těchto režimů se dá tedy předpokládat významnější ovlivnění proudění.

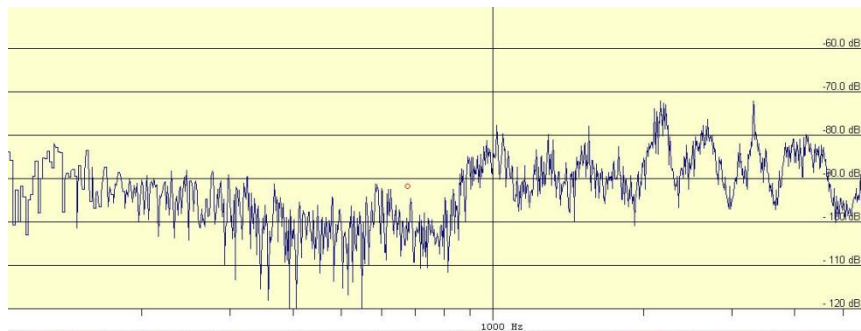


$h = 0$

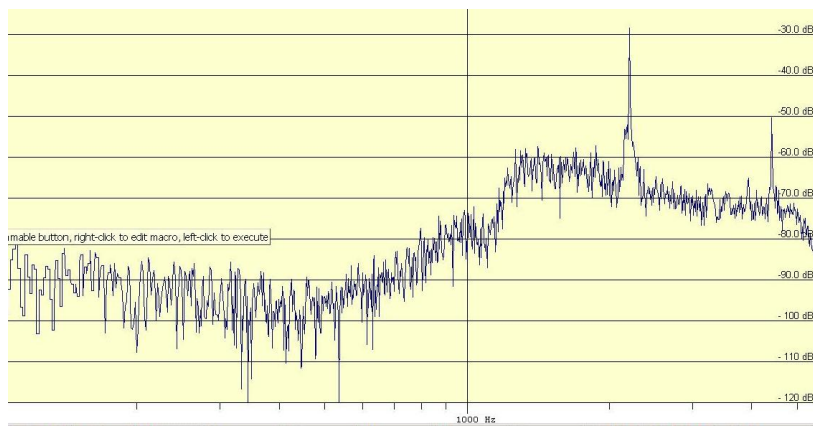


$h = 10$

Obr. 8. PSD pro $Re = 10\ 000$



$h = 0$



$h = 10$

Obr. 9. PSD pro $Re = 30\ 000$

4.2. Vlastnosti proudu

Měření proběhlo celkem ve čtyřech režimech. Pro obě trysky ve čtyřech různých průtocích: 11,9, 32,4, 60,2 a 129,7 l/min. Jednotlivé varianty jsou uvedeny v tabulce 1, kde se nacházejí spočítané hodnoty průtoku na výtoku z trysky, střední rychlost a Reynoldsovo číslo.

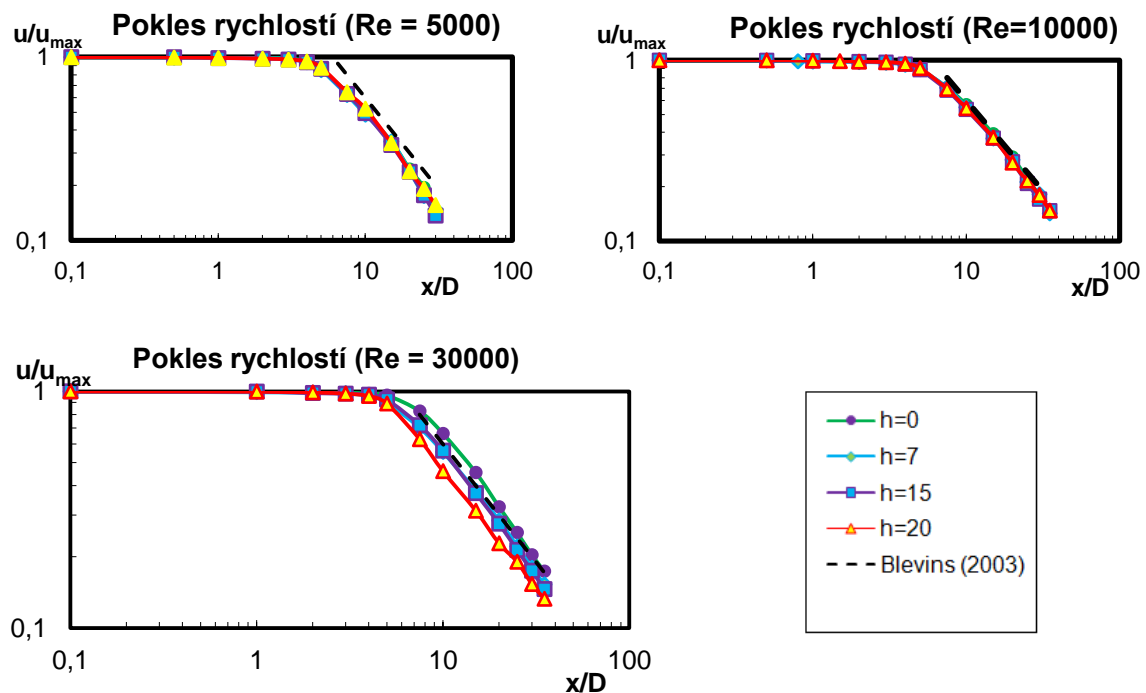
Tabulka 1. Parametry experimentů

Režim	Q_{cal} (ml*min ⁻¹)	P_{cal} (Pa)	P_{rot} (Pa)	Q_{cal} (m ³ *s ⁻¹)	Q_{rot} (m ³ *s ⁻¹)	Q_{bar} (m ³ *s ⁻¹)	S (m ²)	U_m (m*s ⁻¹)	Re
1600	11 961,0	5 750,0	103 350,0	1,99E-04	1,98E-04	2,10E-04	7,85E-05	2,67	1 697
5000	32 410,0	33 000,0	130 600,0	5,40E-04	4,77E-04	6,38E-04	7,85E-05	8,13	5 169
10000	60 280,0	54 000,0	151 600,0	1,00E-03	8,23E-04	1,28E-03	7,85E-05	16,28	10 358
30000	129 662,0	182 000,0	279 600,0	2,16E-03	1,30E-03	3,74E-03	7,85E-05	47,56	30 257

Pro režimy $Re = 5000$, 10000 a 30000 byly změřeny poklesy rychlosti podél osy proudu (obrázek 10). Grafy jsou zobrazeny v logaritmických souřadnicích Na svislé ose je poměr dané rychlosti k maximální rychlosti v proudu. A na vodorovné ose je poměr výšky souřadnice x k průměru trysky D . Parametrem křivek je výška rezonanční dutiny h , přičemž křivka $h = 0$ odpovídá případu bez rezonátoru. Pro porovnání naměřených výsledků jsou v grafu vyneseny závislosti pro turbulentní proud, které lze nalézt v literatuře [5]. Je vidět, že naměřené průběhy dobře odpovídají těmto závislostem. Vztah pro turbulentní proudění:

$$u = C \cdot x^{-1}, \quad C = 6 \cdot v_{max} \cdot D \quad (10)$$

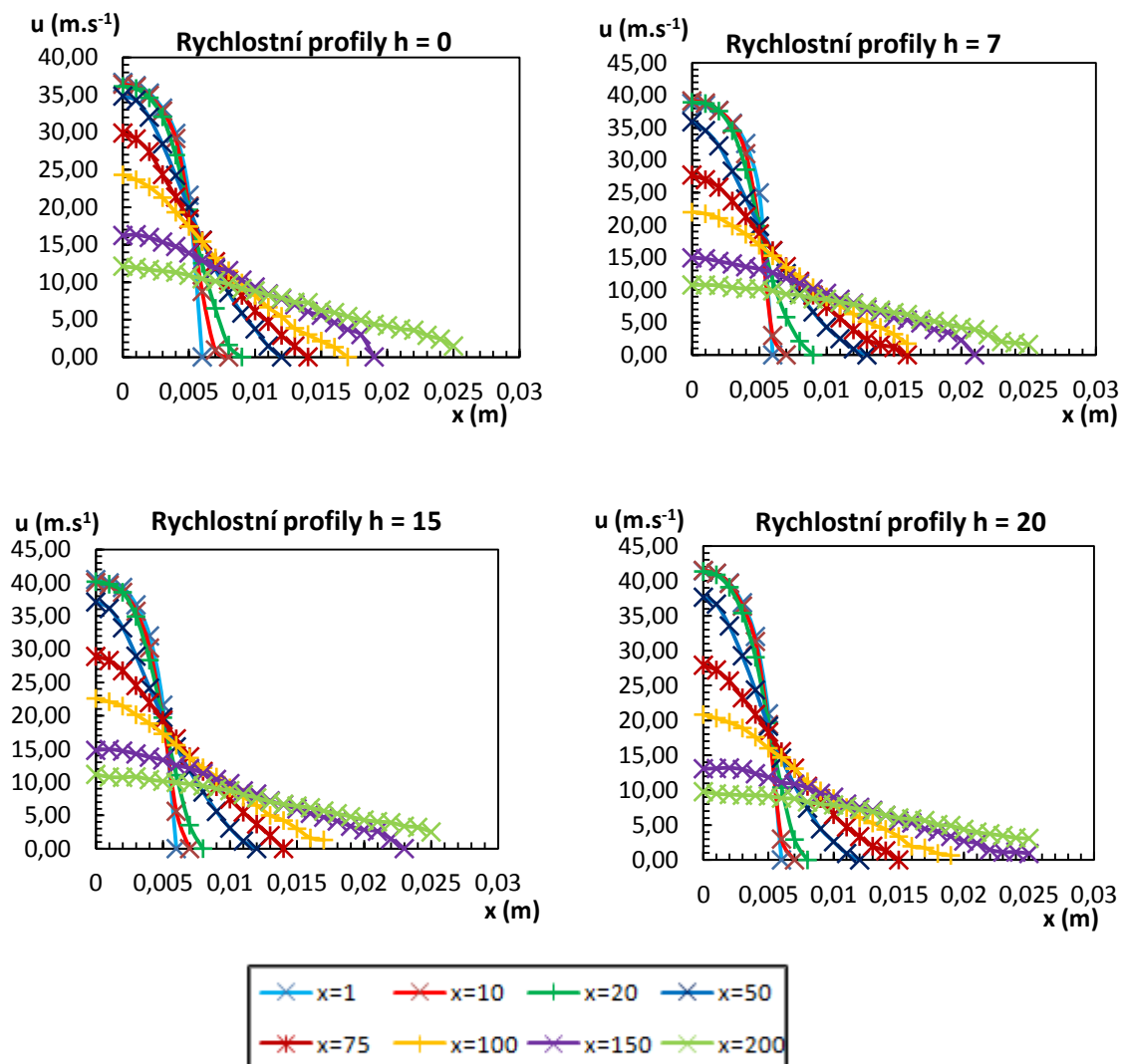
Požadovaný jev, tj. rychlejší pokles rychlosti vlivem řízení nastává až při režimu $Re = 30000$. Při nezměněných parametrech proudu se chování proudu mění díky akustickému působení. Nejvýrazněji tento jev nastává při výšce rezonanční dutiny $h = 20$ mm.



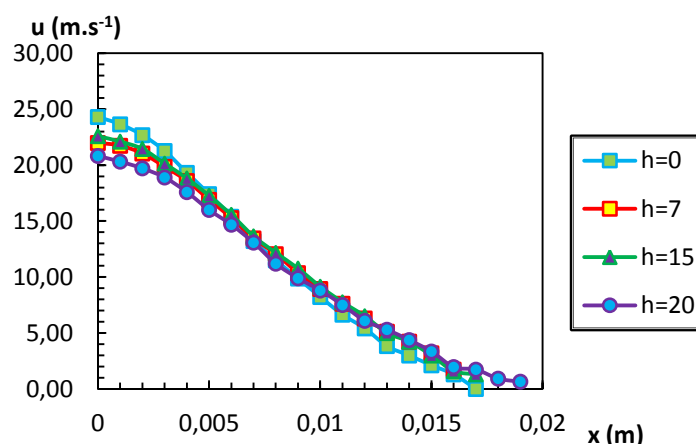
Obr. 10. Poklesy rychlosti

Dále se zjišťoval pro $Re = 30\,000$ rychlostní profil proudu. Celkový tlak se měřil Pitotovou sondou v konstantní vzdálenosti x a v jednotlivých bodech napříč celým průměrem trysky v ose r , které od sebe byly vzdáleny 1 mm. Z naměřených bodů vznikl tlakový profil. Podél osy x bylo změřeno vždy celkem osm tlakových profilů. A to ve vzdálenostech 0D, 1D, 2D, 5D, 7,5D, 10D, 15D a 20 D. Dopočítané rychlostní profily jsou vyneseny na obrázku 11. Na grafech byla provedena symetrizace tj. zprůměrování hodnot zprava a zleva podél osy, kvůli zpřehlednění údajů.

Na obrázku 12 jsou kvůli porovnání vyneseny hodnoty profilů ve výšce $x = 100$ mm pro všechny naměřené objemy rezonátoru. Lze pozorovat mírné rozšiřování a pokles maximální rychlosti proudu. Nejvíce je to patrné opět u režimu $h = 20$ mm.



Obr. 11. Rychlostní profily



Obr. 12. Rychlostní profily $x=100$ mm

Rychlostní profily proudů byly dále zpracovány. Integrací se vypočítaly hodnoty objemového toku, průtočné hybnosti a dále průtočné kinetické energie.

Objemový tok byl vypočítán z [1]:

$$Q_v = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^w u \cdot r \cdot dr \quad (11)$$

Průtočná hybnost ze vzorce:

$$M_v = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \int_0^w u^2 \cdot r \cdot dr \quad (12)$$

A průtočná kinetická energie z:

$$E_v = \pi \cdot \rho \cdot \int_0^w u^3 \cdot r \cdot dr \quad (13)$$

Na obrázku číslo 13 jsou vyneseny hodnoty objemového toku v závislosti na vzrůstající vzdálenosti od trysky. Bezrozměrné veličiny jsou vztaheny k počátečnímu průtoku v ústí trysky na svislé ose a k průměru trysky na ose vodorovné. Pro porovnání je vložena křivka popisující turbulentní proudění dle [5].:

$$Q = 0,16 \cdot \frac{2x}{D} \cdot Q_0 \quad (14)$$

Jak lze vyčíst z grafu, objemový tok ve vzrůstající vzdálenosti od trysky narůstá díky přísávání vzduchu z okolí. K přísávání dochází u všech režimů obdobně.

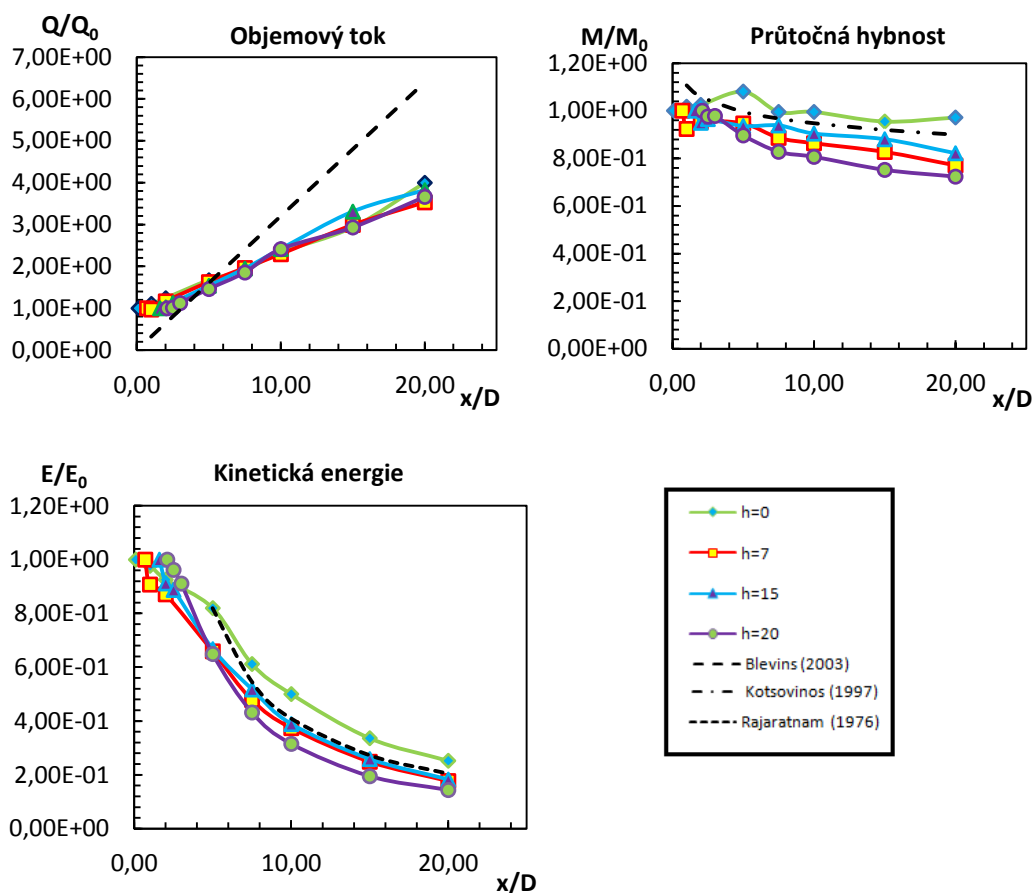
Na obrázku 13. jsou vyneseny také hodnoty průtočné hybnosti v bezrozměrných souřadnicích. Jak je vidět z křivky popisující průtočnou hybnost dle [7], měla by hybnost zůstat přibližně konstantní. Vztah vypadá:

$$\frac{M}{M_0} \cong 0,983 - 0,0693 \cdot \ln\left(\frac{x}{D}\right) \quad (15)$$

Poslední jsou na obrázku 13 zobrazeny bezrozměrné průběhy kinetické energie. Ta se vzrůstající vzdáleností od ústí trysky klesá. Křivky dobře odpovídají tvaru křivky dle [8]:

$$\frac{E}{E_0} = 4,1 \cdot \frac{D}{x} \quad (16)$$

U hybnosti a kinetické energie nastává pokles dříve u režimů s rezonátorem.



Obr. 13. Integrální hodnoty proudu

4. Závěr

V této práci byla prověřována možnost použití rezonátoru k pasivnímu řízení proudu vzduchu. Na základě teoretických poznatků o Helmholtzově rezonátoru bylo provedeno ověření funkčnosti rezonátoru a porovnání s teoretickými výsledky. Jelikož výsledky odpovídaly teoretickým poznatkům, mohlo se přistoupit k použití rezonátoru pro pasivní řízení proudu. Cílem bylo zjistit chování proudu, který je ovlivněn právě Helmholtzovým rezonátorem.

Na základě naměřených hodnot spektrální výkonové hustoty byly zvoleny režimy s nejpravděpodobnějším výskytem požadovaného chování proudu (zkrácení jádra proudu a rozšíření jeho profilu). U režimů s $Re = 5000$, 10000 a 30000 byly naměřeny pomocí Pitotovy sondy poklesy rychlosti v ose proudu. Zjistilo se, že rezonátor ovlivňuje proud až při velkých rychlostech tj. $Re = 30000$ a to dříve předpovědaným způsobem. S rostoucím objemem rezonátoru dochází k rychlejšímu poklesu proudu. Proto byl nejpodrobněji proměřen režim $Re = 30000$. U něj byly naměřeny rychlostní profily a spočítány integrální hodnoty proudu. Chování proudu bylo opět potvrzeno. Rychlostní profily se se vzrůstajícím objemem rezonátoru rozšiřují.

Nejlépeších výsledků bylo dosaženo pro objem rezonátoru s výškou rezonanční dutiny $h = 20$ mm. V diplomové práci je třeba proměřit další režimy, vyhodnotit chování proudu a provést vizualizaci proudu s pasivním řízením.

Tato práce vznikla při řešení projektu GA ČR (14-08888S), s podporou na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace RVO:61388998 a s podporou projektu TAČR – Centra kompetence „Pokročilé technologie pro výrobu tepla a elektřiny“, kód projektu TE01020036.

Seznam symbolů

c	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	rychlost zvuku
D	(mm)	průměr trysky
E	($\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$)	průtočná kinetická energie
f	(Hz)	frekvence
H	($\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	průtočná hybnost
p	(Pa)	tlak
p_b	(Pa)	barometrický tlak
Q	($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	objemový tok
r	($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	měrná plynová konstanta
r	(mm)	horizontální souřadnice
Re	(-1-)	Reynoldsovo číslo
S	(m^2)	průřez
T	(K)	teplota
U	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	rychlost
V	(m^3)	objem
x	(mm)	vertikální souřadnice
ρ	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	hustota
τ	(s)	čas
ω	($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)	úhlová rychlost

Použitá literatura

1. NOSKIEVIČ, J. a kol.: *Mechanika tekutin*, SNTL, Praha, 1987
2. NOŽIČKA, J.: *Mechanika tekutin*, ČVUT, Praha, 2004
3. SCHLICHTING, H.: *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill, New York, 1979, ISBN 0-07-055334-3
4. DOEBELIN, E. O.: *Measurement Systems (Applications and Design)*, Mc Graw- Hill, Boston, 2003
5. BLEVINS, R. D.: *Applied Fluid Dynamics Handbook*, Krieger Publishing Company, Florida 2003, ISBN 1-57524-182-X
6. ŘEZNÍČEK, R.: *Visualisace proudění*, ČSAV, Praha, 1972
7. KOTSOVINOS, N.E.: *A note on the conservation of a axial momentum of a turbulent jet*, Journal of Fluid Mechanics, 1978, vol. 87, no. 1, str. 55-63
8. RAJARATNAM, N.: *Turbulent jets*, Amsterdam, Elsevier scientific publishing company, 1976, ISBN 0-444-41372-3
9. JIRSÁK, M.: *Experimentální zařízení a metody v mechanice tekutin*, ČVUT, Praha, 1977
10. BROUČKOVÁ, Z.: *Řízení proudu vzduchu syntetizovaným proudem*, bakalářská práce, ČVUT, Praha, 2010
11. BROUČKOVÁ, Z.: *Aktivní řízení proudu v koaxiálním uspořádání*, diplomová práce, ČVUT, Praha, 2012
12. NOVÝ, R.: *Hluk a chvění*, ČVUT, Praha, 2000
13. TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*, Štramberk 1997, ISBN 80-901936-1-7