

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE,
Fakulta Strojní, Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

Pasivní řízení osově symetrického proudu vzduchu

diplomová práce

2015

Pavλίna PUŠKOVÁ

Anotační list

Autor:	Pavčina Pušková
Název diplomové práce:	Pasivní řízení osově symetrického proudu vzduchu
Bibliografické údaje:	58 stran, 1 tabulka, 42 obrázků
Rok vyhotovení	2015
Ústav:	U12112 Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky, ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Vedoucí diplomové práce:	Prof. Ing. Pavel Šafařík, CSc.
Konzultanti:	Doc. Ing. Zdeněk Trávníček, CSc., Ing. Zuzana Broučková

Anotace: Diplomová práce je zaměřena na zkoumání pasivního řízení osově symetrického proudu vzduchu pomocí rezonátoru. V první části práce jsou uvedeny teoretické poznatky. Úloha je řešena experimentálně a to pomocí vyhodnocení spektrální výkonové hustoty, vizualizace a Pitotovy sondy. Dále jsou porovnány vlastnosti proudu bez rezonátoru s rezonátorem.

Klíčová slova: Osově symetrický proud, pasivní řízení proudění, rezonátor

Anglický název: Passive Control of Axisymmetric Air Flow

Summary: The thesis is focused on exploring passive management axially symmetrical air jet flow by the resonator. The first part includes theoretical knowledge. The problem is solved experimentally by power spectral density, visualization and Pitot probe. Properties of flow without resonator and with resonator are compared.

Key words: Axisymmetric Jet Flow, Passive Control, Resonator

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma „Pasivní řízení osově symetrického proudu vzduchu“ vypracovala samostatně pod vedením Prof. Ing. Pavla Šafaříka, CSc. a použila jsem jen pramenů citovaných v příložené bibliografii.

V Praze dne:

Podpis.....

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce Prof. Ing Pavlu Šafaříkovi, CSc. a konzultantům Doc. Ing. Zdeňku Trávníčkovi, CSc a Ing. Zuzaně Broučkové za vedení, cenné náměty, připomínky a informace. Také bych chtěla poděkovat za umožnění vypracovat diplomovou práci na Ústavu termomechaniky AV ČR, v.v.i., kde byla práce podporována projektem GA ČR (14-08888S). Dále bych chtěla poděkovat celé mé rodině za podporu při studiu.

Obsah

Seznam obrázků	7
Seznam tabulek.....	9
Seznam symbolů	10
Úvod.....	11
1. Přehled teoretických poznatků	12
1.1. Osově symetrický proud	12
1.2. Helmholtzův rezonátor	13
1.3. Výkonová spektrální hustota	14
2. Experimentální zařízení.....	15
2.1. Popis experimentálního zařízení.....	15
2.2. Použité měřicí přístroje.....	18
3. Měřicí metody.....	24
3.1. Vyhodnocení frekvence	24
3.2. Vizualizace proudění	25
3.3. Měření rychlostního profilu proudu	27
4. Ověření teorie Helmholtzova rezonátoru	28
5. Výsledky provedených experimentů.....	33
5.1. Vyhodnocení frekvence	33
5.2. Vizualizace proudění	39
5.3. Rychlostní profily proudu.....	41
6. Vyhodnocení experimentu.....	51
7. Závěr.....	55
Použitá literatura	57

Seznam obrázků

Obr. 1. Helmholtzův rezonátor.....	14
Obr. 2. Schéma experimentálního zařízení.....	17
Obr. 3. Schéma trysky s rezonátorem.....	17
Obr. 4. Schéma rezonátoru.....	17
Obr. 5. Schéma trysky.....	17
Obr. 6. Fotografie trysky s rezonátorem.....	19
Obr. 7. Krystal v manometru.....	20
Obr. 8. Schéma rotametru.....	21
Obr. 9. Schéma elektretového mikrofону.....	22
Obr. 10. Pitotova sonda.....	23
Obr. 11. Prandtlova sonda.....	24
Obr. 12. Schéma zaznamenávání PSD.....	25
Obr. 13. Schéma výroby mlhy.....	26
Obr. 14. Schéma experimentu při vizualizace.....	27
Obr. 15. Rezonátor – uspořádání pro měření frekvence Helmholtzova rezonátoru	29
Obr. 16. PSD bez rezonátoru – okolí.....	30
Obr. 17. PSD rezonátoru – $h = 7$ mm.....	30
Obr. 18. PSD rezonátoru – $h = 10$ mm.....	31
Obr. 19. PSD rezonátoru – $h = 15$ mm.....	31

Obr. 20. PSD rezonátoru – $h = 20$ mm.....	32
Obr. 21. PSD rezonátoru – $h = 30$ mm.....	32
Obr. 22. Rezonanční frekvence Helmholtzova rezonátoru – porovnání výsledků experimentu a teorie; (a) skleněná a plastová láhev,(b) zkoumaný rezonátor – viz obr. 4.....	33
Obr. 23. PSD pro $Re = 1600$	35
Obr. 24. PSD pro $Re = 5000$	36
Obr. 25. PSD pro $Re = 10\ 000$	37
Obr. 26. PSD pro $Re = 30\ 000$	38
Obr. 27. Schéma pěti významných příčin a zdrojů zvuku pro výtok dvojicí otvorů – viz Henrywood a Agarwal.....	39
Obr. 28. Vizualizace $Re = 1\ 600, 5\ 000$, případy bez řízení proudu.....	40
Obr. 29. Vizualizace $Re = 10\ 000$ – ukázka vlivu řízení proudu.....	41
Obr. 30. Vizualizace $Re = 30\ 000$ – ukázka vlivu řízení proudu.....	41
Obr. 31. Poklesy rychlostí na ose.....	43
Obr. 32. Tlakové profily pro $Re = 5\ 000, h = 0$ mm.....	44
Obr. 33. Symetrizace rychlosti pro $Re = 5\ 000, h = 0$ mm, $x = 20$ mm.....	44
Obr. 34. Rychlostní profily pro $Re = 5\ 000$	45
Obr. 35. Rychlostní profily pro $Re = 30\ 000$	46
Obr. 36. Pološířky proudu.....	47
Obr. 37. Rychlostní profily v bezrozměrných souřadnicích pro $Re = 5\ 000$	48
Obr. 38. Rychlostní profily v bezrozměrných souřadnicích pro $Re = 30\ 000$	49

Obr. 39. Porovnání rychlostních profilů pro $Re = 5\,000$	50
Obr. 40. Porovnání rychlostních profilů pro $Re = 30\,000$	51
Obr. 41. Integrální hodnoty proudu – $Re = 5\,000$	54
Obr. 42. Integrální hodnoty proudu – $Re = 30\,000$	55

Seznam tabulek

Tabulka 1. Parametry experimentů.....	34
---------------------------------------	----

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)	radiální 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

Úvod

Řízení proudových polí je aktuální problém v mechanice tekutin. Cílem řízení je ovlivnit chování proudu, tak aby se dosáhlo požadovaných účinků např. zvýšení směšování, zlepšení vlastnosti proudu či zvýšení přestupu tepla. Proudová pole lze řídit aktivně pomocí přívodu energie (např. pomocí řídicích proudů), nebo pasivně pomocí úprav geometrie zařízení – viz Fernholz [1]. Pasivní řízení je většinou jednodušší.

Tato práce se zabývá pasivním řízením proudu pomocí rezonátoru. Předpokládá se, že akustické efekty způsobí větší intenzitu směšování tekutiny a tím zkrátí jádro proudu a rozšíří jeho profil. Tento předpoklad vychází z práce, v níž se Hill a Greene [2] zabývali v 80 letech právě pasivním řízením proudu vzduchu. Ve své práci publikují zařízení, které nazvali „pískající tryska“ (v angličtině "whistler nozzle"). Toto zařízení bylo efektivně schopné docílit intenzifikace směšování tekutinového proudu. Cílem bylo dosáhnout zlepšení při aplikacích tohoto případu např. v chemickém průmyslu nebo v letectví (např. snížení eroze přistávací dráhy pro letadla s kolmým nebo krátkým startem nebo významné zmenšení dosahu tepelné stopy vojenského letadla).

Aeroakustickým vlastnostem trysky vybavené rezonanční dutinou se ve své práci z roku 2003 věnovali Henrywood a Agarwal [3]. Ta popisuje experiment, při kterém zjišťovali frekvence rezonátoru o různém objemu.

V práci jsou uvedeny známé teoretické poznatky týkající se osově symetrického proudu, Helmholtzova rezonátoru a výkonové spektrální hustoty. Je ověřena teorie Helmholtzova rezonátoru, jehož princip je využíván pro řízení osově symetrického proudu vzduchu. Cílem práce je ověření předpokládaného chování proudu, tj. zjištění vlivu rezonátoru na tvar rychlostních profilů, délku potenciálního jádra i vliv rezonátoru na směšování proudu s okolím. Účinky rezonátoru na proud jsou zkoumány v několika zvolených režimech proudění, které jsou charakterizovány Reynoldsovým číslem.

1. Přehled teoretických poznatků

1.1. Osově symetrický proud

Zatopený proud je takový, jehož fyzikální vlastnosti jsou shodné s fyzikálními vlastnostmi prostředí, do kterého vytéká. Atributem, kterým je charakterizován daný osově symetrický proud, je průměr D kruhové trysky na jejím výstupu. Základní poznatky o zatopených prouděch, které jsou uvedeny v následujícím textu, jsou čerpány z literatury (Schlichting [4], Blevins [5], Rajaratnam [6]).

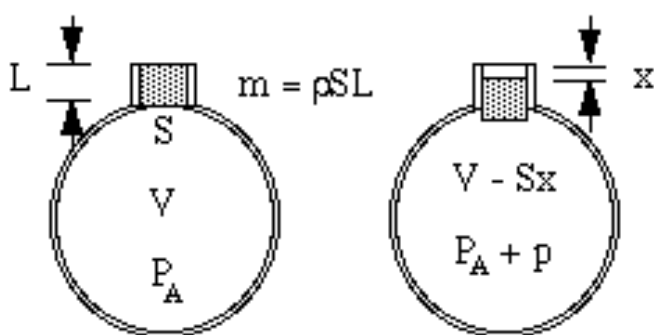
Po výstupu z trysky lze turbulentní proud rozdělit na tři části. První částí je tzv. potenciální jádro proudu, které dosahuje do vzdálenosti přibližně $(4-5)D$. Jedná se o místo v blízkosti osy, kde si proud udržuje svou střední rychlost z ústí trysky U_m . V tomto potencionálním jádru nemá vazkost žádný vliv a nedochází k rotaci jednotlivých částic tekutiny. Ve smykové vrstvě proudu, která se nachází na periferii proudu, nastává mísení s okolním prostředím. Díky tomu dochází k postupnému zmenšování průřezu potenciálního jádra, než dojde k jeho úplnému zániku. Druhou částí proudu je přechodová oblast. A poslední částí je oblast plně vyvinutého proudu, která začíná přibližně ve vzdálenosti $x = 20D$.

Pro popis parametrů proudu se obvykle využívá Reynoldsovo číslo. Pomocí tohoto podobnostního čísla lze charakterizovat jednotlivé režimy proudění. K výpočtu Reynoldsova čísla se používá průměr D , který charakterizuje daný osově symetrický proud, dále střední rychlost U_m a kinematická viskozita ν . Reynoldsovo číslo lze spočítat dle vzorce (1), viz např. [7]

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

1.2. Helmholtzův rezonátor

Helmholtzův rezonátor je dutina, která je naplněna určitým plynem nebo směsí plynů (např. vzduch), s otevřeným otvorem. Princip rezonátoru je naznačen na obrázku 1. Objem vzduchu v dutině a v blízkosti otevřeného otvoru začne vibrovat vlivem „pružnosti“ vzduchu, který je uvnitř dutiny. Tento jev se dá velmi snadno presentovat na jednoduchém experimentu, kdy se použije prázdná láhev, která představuje Helmholtzův rezonátor. Do ní se přivede vzduch a tím dojde k rozvibrování vzduchu. Tyto vibrace jsou charakteristické svou rezonanční frekvencí [9].



Obr. 1. Helmholtzův rezonátor [21]

Rezonanční frekvenci je možné spočítat a to pomocí vzorce (2), který je odvozen z druhého Newtonova pohybového zákona a rovnice adiabatické změny. [9]

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

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^2) je průměr hrdla [9].

1.3. Výkonová spektrální hustota

Při náhodných procesech, které jsou ve frekvenční oblasti, se využívá k jejich popisu výkonová spektrální hustota (anglicky *Power spectral density* - *PSD*). Tento popis procesu je ekvivalentní k metodě korelačních funkcí. Volba metody záleží na uživateli a dostupné technice. Pro experiment byla dostupná měřicí technika, která vedla k využití výkonové spektrální hustoty [11].

Výkonová spektrální hustota představuje rozdělení signálů v závislosti na frekvenci. Rozlišují se dva druhy spektrální výkonové hustoty a to jednostranná výkonová spektrální hustota anebo dvoustranná výkonová spektrální hustota. Jednostranná spektrální hustota nabývá nenulových hodnot pouze u nezáporných frekvencí. Dvoustrannou 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 [11].

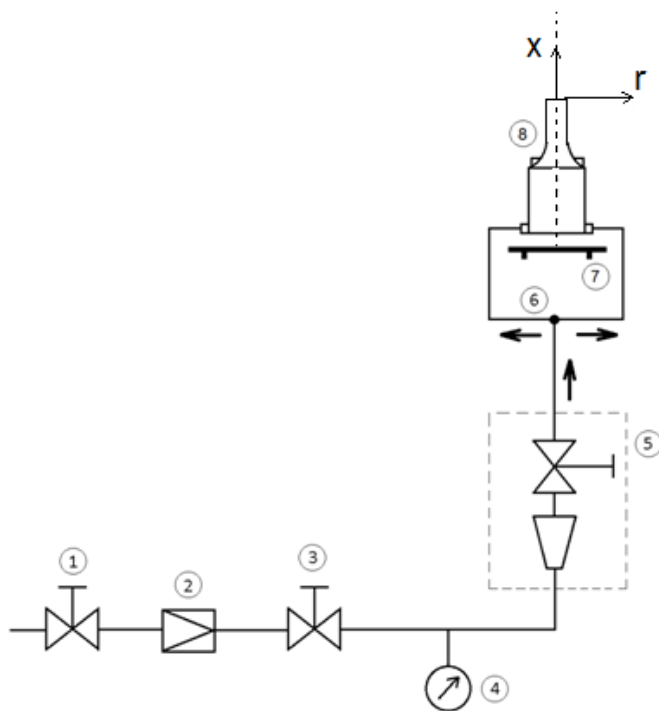
Při nastavování programu je třeba se řídit tzv. Nyquistovým vzorkovacím teorémem. Ten říká, že vzorkovací frekvence musí být alespoň dvojnásobná v porovnání s maximální frekvencí [12].

2. Experimentální zařízení

2.1. Popis experimentálního zařízení

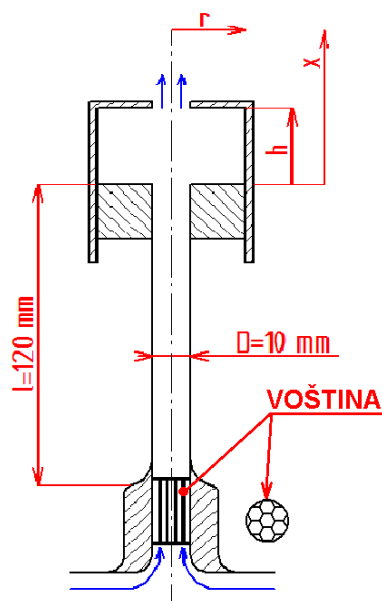
Schéma experimentálního zařízení je vidět na obrázku 2. Z centrálního tlakového rozvodu je přiveden vzduch do uzavíracího kohoutu. Tento kohout slouží k ovládní vstupu vzduch do soustavy. Za tímto ventilem je zařazen redukční ventil (pozice 2), který slouží k ovládní tlaku. Následuje škrtící ventil (3), ten slouží k ovládní průtoku. Vzduch pokračuje ze škrtícího ventilu do rotametru (5) ve kterém je měřen průtok. Těsně před rotametrem je nutné měřit tlak. Ten je měřen pomocí manometru (4). Vzduch pak přes rozbočku (6) putuje do trysky (7). Tato rozbočka umožňuje docílit rovnoměrnější přítoku vzduchu do trysky.

V experimentu je použita tryska o vnitřním průměru D , který je 10 milimetrů a délce l , která je 120 milimetrů – viz obr. 5. Délka trysky musí být dostatečně dlouhá, aby došlo k uklidnění proudu vzduchu. Na vstupu do trysky je navíc umístěna usměrňovací voština (tzv. „honeycomb“), která uklidnění ještě více napomáhá. Na konci hubice je pak nasazen rezonátor, tj. dutina, jejíž objem lze měnit změnou délky h – viz obr. 3 a 4. Objem rezonátoru, se pak snadno dopočítá z této hloubky a průměru rezonátoru. Ke změně délky h dochází tak, že se povolí zajišťovací šroub na boku dutiny (obr. 4) a dutina se posune na požadovanou hodnotu. Tam se dutina opět zajistí pomocí šroubu. Obrázek 3 vyznačuje rovněž zvolený válcový souřadný systém x, r jehož počátek byl zvolen v ústí trysky bez rezonátoru (v dalším textu též označováno jako případ pro $h = 0$). Počátek souřadnic se tedy neměnil použitím rezonátoru - tato volba je stejná, jako použili ve své práci Hill a Greene [2]. Snímek z měření zachycuje trysku s rezonátorem na obrázku 6.

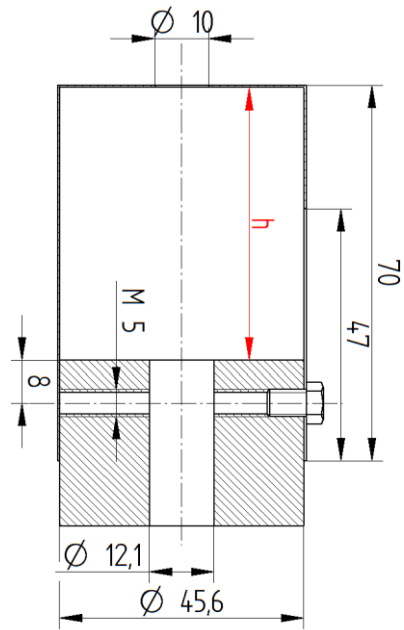


- | | | | |
|---------------------|---------------------|------------------------|-------------|
| 1. Uzavírací kohout | 2. Redukční ventil | 3. Škrťací ventil | 4. Manometr |
| 5. Rotametr | 6. Rozbočka vzduchu | 7. Traverzovací stolec | 8. Tryska |

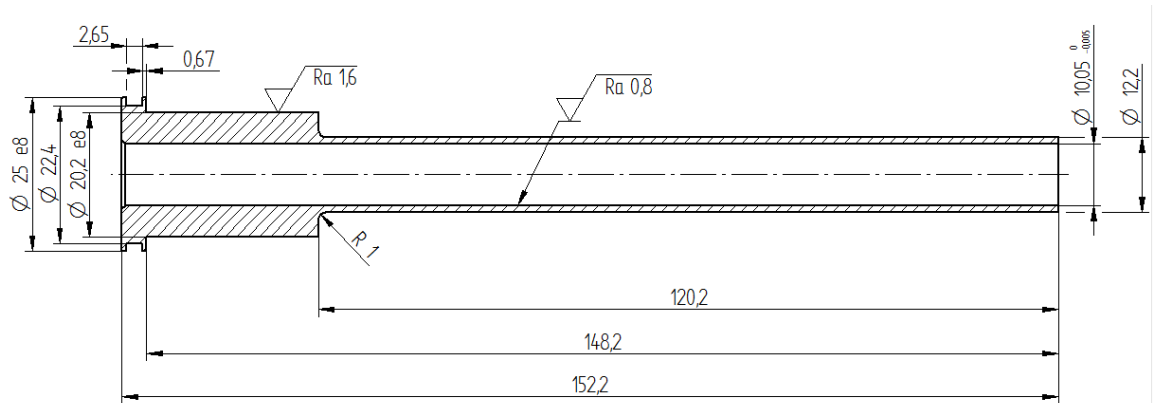
Obr. 2. Schéma experimentálního zařízení



Obr. 3. Schéma trysky s rezonátorem



Obr. 4. Schéma rezonátoru



Obr. 5. Schéma trysky



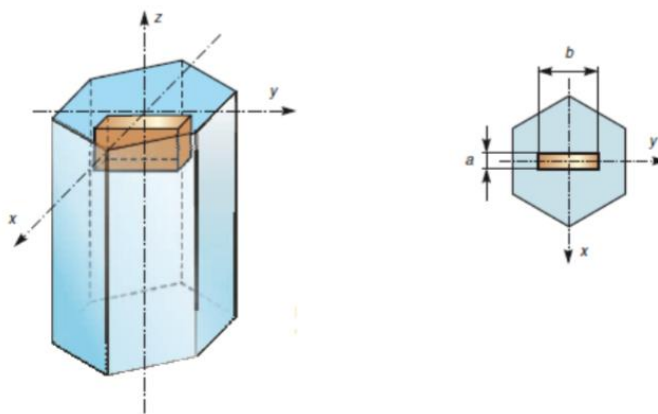
Obr. 6. Fotografie trysky s rezonátorem

2.2. Použité měřicí přístroje

Při experimentu bylo potřeba měřit tyto veličiny: tlak, teplotu, průtok, rychlost proudění vzduchu a frekvenci.

Manometr

Na měření relativního tlaku byl v experimentu použit piezoelektrický snímač relativního tlaku. Piezoelektrický snímač tlaku pracuje na tzv. piezoelektrickém jevu. Tento jev vzniká při mechanické deformaci krystalu, kdy dochází uvnitř dielektrika k polarizaci a tím elektrický náboj. Velikost náboje je úměrná působící síle. Krystaly používané v těchto snímačích jsou např. krystaly křemene nebo titaničitanu barnatého. Důležitá je také úprava těchto krystalů. Tyto krystaly jsou opatřeny výbrusy (obr. 7) a to na speciálně natočených plochách k ose mechanického namáhání. Na plochy jsou následně připojeny elektrody [13].



Obr. 7. Krystal v manometru [22]

Výhodou piezoelektrických snímačů tlaků jsou bezesporu malé rozměry a hmotnost. Dále mají dobré dynamické vlastnosti a díky tomu jsou vhodné na sledování dynamických průběhů tlaků. Nevýhodou těchto snímačů je především teplotní závislost a složitější vyhodnocení signálu [13].

Byly použity dva stejné manometry, a to Greisinger GMH 3156. Každý byl použit s jiným tlakovým snímačem, dle potřebného rozsahu. Snímač, který byl použit u rotametry měl označení GMSD 350 MR, rozsah od -19,9 kPa do 35 kPa a rozlišení 10 Pa. Při měření tlaku pomocí Pitotovy sondy byl použit snímač GMSD 2,5 MR s rozsahem od 199,9 Pa do 250 Pa a rozlišením 0,1 Pa.

Na měření aktuálního barometrického tlaku v místnosti byl použit staniční barometr s rozlišením stupnice 1 hPa.

Rotametr

Na měření požadovaného průtoku byl použit plovákový průtokoměr. Plovák (koule, kužel, atd.) umístěný v mírně konické skleněné trubici je nadnášen proudem vzduchu (viz obr. 8). Ten se ustálí v poloze, při níž jsou dynamické síly v rovnováze. Platí tedy rovnice rovnováhy [14, 15]:

$$\Delta p \cdot S_p = V_p \cdot (\rho_p - \rho) \cdot g \quad (6)$$

Kde Δp je tlakový rozdíl plováku, S_p maximální průřez plováku, V_p objem plováku, ρ_p hustota plováku a ρ je hustota tekutiny. Pro průtok štěrbinou platí:

$$Q = K \cdot (S - S_p) \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_1}} \quad (7)$$

a dosazením a úpravou obdržíme závislost:

$$Q = K' \cdot (S - S_p) \cdot \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_1}{\rho_1}} \quad (8)$$

Kde S je místní průřez trubice a K koeficient průtoku.

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 [14]:

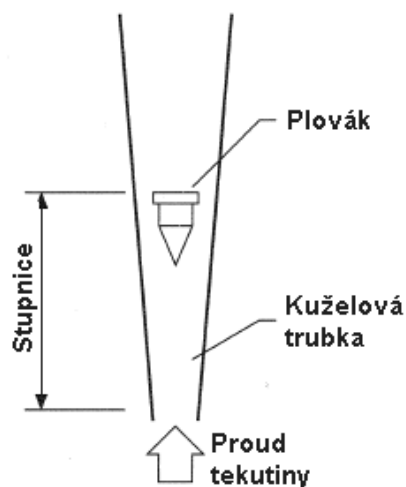
$$Q' = Q \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_1'}} \quad (9)$$

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

$$\frac{p}{\rho} = r \cdot T \quad (10)$$

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

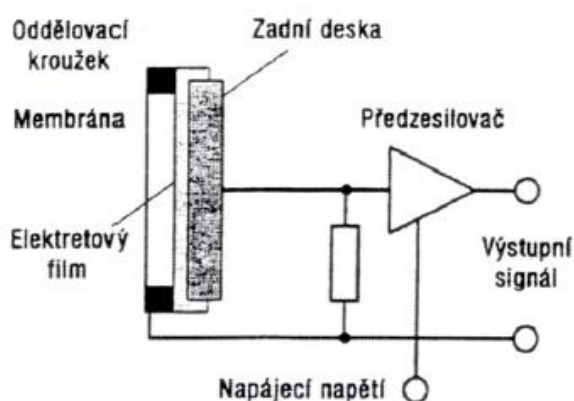
$$Q' = Q \cdot \sqrt{\left(\frac{p}{p'}\right) \cdot \left(\frac{T'}{T}\right)} \quad (11)$$



Obr. 8.: Schéma rotametru [převzato z 23 a upraveno]

Elektretový mikrofon

Elektretové mikrofony jsou analogií kondenzátorových mikrofonů. Rozdíl je v tom, že náboj není získáván ze zdroje napájení. V tomto mikrofonu je aplikováno speciální dielektrikum (tzv. elektret), které v mikrofonu zaručuje polarizační napětí. Membrána, která je v mikrofonu elektrem, je vyrobena z materiálu s vysoce izolačními vlastnostmi. U těchto mikrofonů je nutné, aby k nim byl připojen předzesilovač typu FET, který je nutno napájet. Schéma zapojení je na obrázku 9 [16]. V této práci byl mikrofon připojen na zvukovou kartu počítače.



Obr. 9.: Schéma elektretového mikrofonu [16]

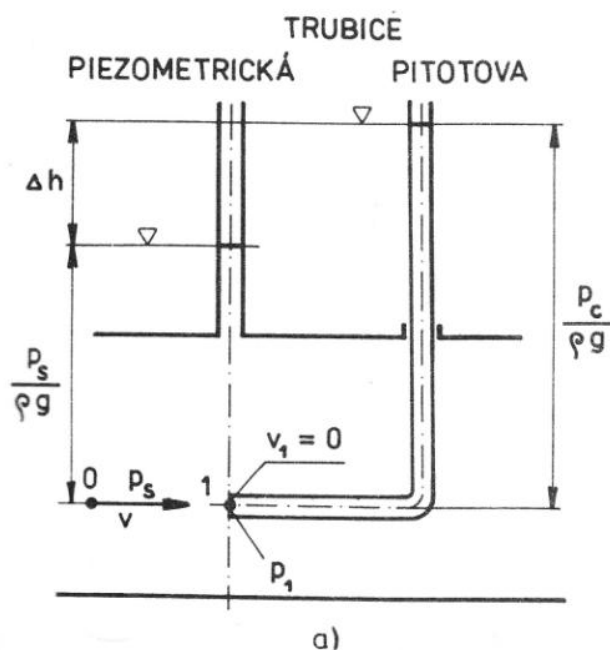
Přesná váha

V experimentu byla použita přesná váha a to při ověřování teorie Helmholtzova rezonátoru. Pomocí ní se určoval objem vody, který představoval zároveň objem rezonátoru. Byla použita váha od firmy METTLER TOLEDO a to typu PR 8002 DELTA RANGE. Tato váha je schopná měřit od 1 g do 8100 g. Rozlišení této váhy je 0,05 g.

Pitotova a Prandtlova sonda

Při měření Pitotovou a Prandtlovou sondou se rychlost zjišťuje nepřímou metodou pomocí měření tlaku. Rychlost se následně dopočítává z Bernoulliho rovnice.

V Pitotově trubici (obr. 10) se měří pouze celkový tlak p_c . Rozdíl tohoto tlaku a statického tlaku p_s je roven tlaku dynamickému p_d – viz [17].

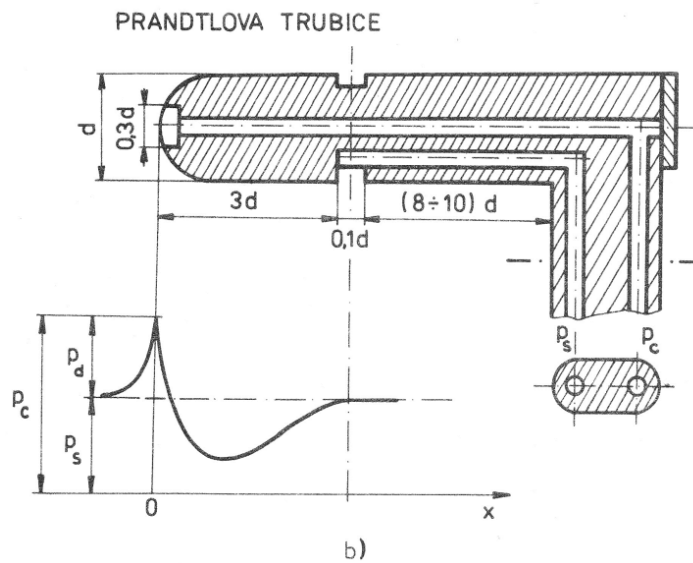


Obr. 10.: Pitotova sonda [17]

Prandtlova sonda (obr. 11) měří jak celkový tak statický tlak. V ose trubice je otvor pro odběr celkového tlaku p_c , který je vyveden vnitřní trubící. Statický tlak p_s se snímá na plášti vnější trubice a je vyveden druhou trubící. Aby tlak p_s byl roven tlaku nerušeného proudu, je odběr statického tlaku umístěn ve vzdálenosti rovnající se třem vnějším průměrům trubice od jejího ústí [17].

Rychlost u se následně spočítá upravením Bernoulliho rovnice do vzorce [17]:

$$u = \sqrt{2 \cdot \frac{p_c - p_s}{\rho}} = \sqrt{2 \cdot \frac{p_d}{\rho}} \quad (12)$$



Obr. 11.: Prandtlůva sonda [17]

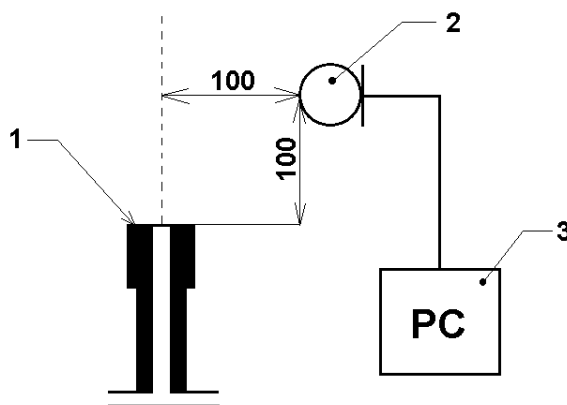
V tomto experimentu byla použita Pitotova sonda (ostrohranná trubice o vnějším průměru $D_p = 0,8$ mm, vnitřním průměru $d_p = 0,5$ mm a délce 52 mm) napojená na elektrický manometr, který zobrazoval přímo dynamický tlak. Použitá Pitotova sonda je zachycena na obrázku 5.

3. Měřicí metody

Při realizaci experimentu byly použity tři metody: vizualizace, vyhodnocení rezonanční frekvence z grafů PSD a měření rychlostního profilu Pitotovou sondou. Vizualizace měla za úkol názorně zviditelnit kvalitativní chování vybraných režimů proudění a to bez ovlivnění rezonátorem i s pasivním řízením. Také sloužila k ověření funkce experimentálního zařízení. Vyhodnocení frekvence pomocí PSD bylo v experimentu použito kvůli identifikaci vlivu postupně měněného objemu rezonátoru na akustickou odezvu proudu. Pomocí těchto dvou metod byly vybrány nejvýraznější režimy, u kterých se následně podrobně proměřily vlastnosti proudu Pitotovou sondou.

3.1. Vyhodnocení frekvence

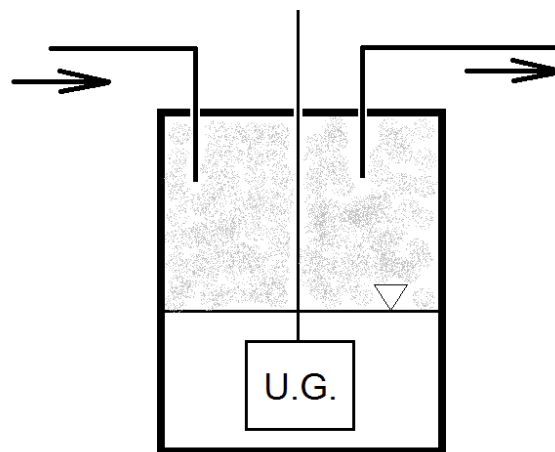
Vyhodnocení rezonanční frekvence bylo provedeno pomocí elektretového mikrofону. Tento mikrofón snímá zvuk, který vzniká interakcemi proudu s okolím – především s dutinou rezonátoru. Umístění mikrofónu je vidět na obrázku 12. Signál, který je získán elektretovým mikrofónem je přiveden na zvukovou kartu počítače a dále vyhodnocován v programu Spectrum Lab V2.77. Ten zobrazuje graf PSD, ze kterého je možné odečíst rezonanční frekvenci jako maxima průběhu.



Obr. 12.: Schéma zaznamenávání PSD

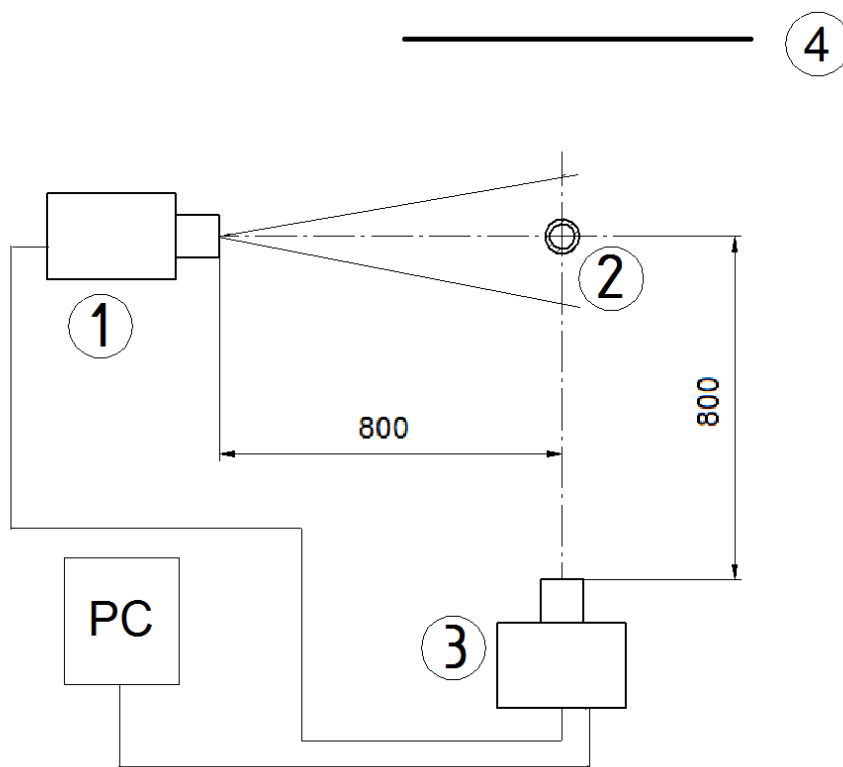
3.2. Vizualizace proudění

Vizualizace proudění byla realizována přívodem mlhy do zkoumaného proudu. Mlha (tj. směs kapiček vody ve vzduchu) byla vytvořena pomocí ultrazvukového generátoru vodní mlhy Mini-Nebler. Tento ultrazvukový generátor je ponořen do uzavřené nádoby s destilovanou vodou (obrázek 13). Při zapnutí ultrazvukového generátoru dojde k rozvibrování membrány generátoru. Vlivem toho rozvibrování dojde ke vzniku mlhy, která je tvořena velmi malými kapičkami vody a zabírá volný prostor nádoby nad hladinou. Přívod vzduchu je uspořádán nad hladinu destilované vody a následně odveden z prostoru, kde se nachází vytvořená mlha vzniklá pomocí ultrazvukového generátoru. Výhodou této metody je jednoduchost a to, že nevznikají žádné škodlivé výpary. Nevýhodou pak je poměrně rychlá kondenzace vodní páry při laboratorních podmínkách s teplotou kolem 20° C. To znamená, že se vodní pára začne srážet už na stěně trysky a tím může negativně ovlivnit proud vzduchu. Proto je nutno čas vizualizace zkrátit na nezbytnou dobu. I přesto je tato metoda pro tento experiment velmi vhodná –[18,19]



Obr. 13.: Schéma výroby mlhy

Uspořádání experimentu při vizualizaci je naznačeno na obrázku 14. Kolmo na osu proudu, vytékajícího z trysky, byl umístěn fotoaparát a blesk vybavený vhodným optickým systémem. Optické osy blesku i fotoaparátu spolu taktéž svírají pravý úhel. Jak blesk, tak fotoaparát byly umístěny 800 mm od osy vizualizovaného proudu. Naproti fotoaparátu je pak umístěno černé pozadí. Toto pozadí tvoří s vizualizovaným proudem kontrast a tím napomáhá lepší viditelnosti proudu na jednotlivých snímcích z fotoaparátu. Blesk byl připojen přímo na fotoaparát, aby se spouštěl ve stejném okamžiku jako fotoaparát. Blesk byl připojen přímo na fotoaparát, aby se spouštěl ve stejném okamžiku jako fotoaparát. Fotoaparát se ovládal pomocí počítače. Pro každý z měřených stavů bylo pořízeno několik snímků. Z těchto snímků byl pro každý režim následně vybrán snímek s největší kvalitou.



1. Blesk s objektivem 2. Tryska 3. Fotoaparát 4. Černé pozadí

Obr. 14.: Schéma experimentu při vizualizaci

3.3. Měření rychlostního profilu proudu

Rychlostní profil proudu se vyhodnocoval nepřímo pomocí Pitotovy sondy. Přitom se traverzovalo sondou napříč proudem v konstantní výšce x . V jednotlivých bodech byl odečten celkový tlak p_c , přitom body byly od sebe vzdáleny 1 až 2 mm. Z naměřených hodnot vznikl tlakový profil $p_c(r)$. Podél osy x bylo změřeno vždy celkem osm tlakových profilů, a to ve vzdálenostech násobku vnitřního průměru D ($x = 0D, 1D, 2D, 5D, 7,5D, 10D, 15D, 20D$). Tlakové profily se poté přepočítaly na rychlostní profily pomocí Bernoulliho rovnice (viz rovnice 12).

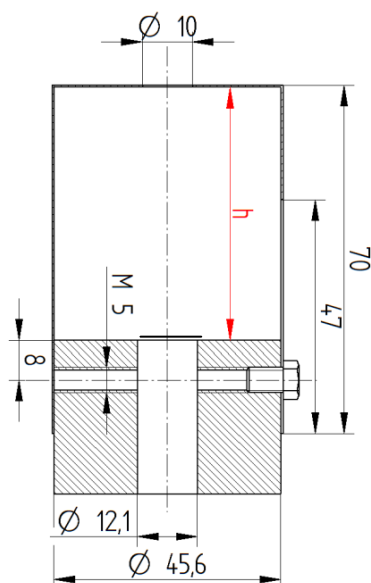
Druhým typem měření byla traverzace podél osy proudu, s cílem vyhodnotit pokles rychlosti a ovlivnění potenciálního jádra proudu. Zmenšující se velikost potenciálního jádra totiž prokazuje intenzivnější promísení tekutiny. Pokles rychlosti se měřil tak, že Pitotova sonda byla umístěna na ose proudu v ústí trysky ($x = 0$), a poté bylo sondou traverzováno ve směru osy x od ústí trysky. Ve zvolených vzdálenostech byl naměřen celkový tlak a z toho pak dopočítána rychlost.

4. Ověření teorie Helmholtzova rezonátoru

Pro ověření teorie Helmholtzova rezonátoru byly provedeny experimenty, při kterých se vyhodnocovala závislost rezonanční frekvence na objemu rezonátoru. Jako rezonátor byly použity tři různé druhy nádob. Nejprve byl proveden ověřovací experiment, při kterém byly použity dvě láhve (skleněná a plastová). Potom byl proveden experiment s rezonanční dutinou, která byla později použita v experimentu pasivního řízení proudu.

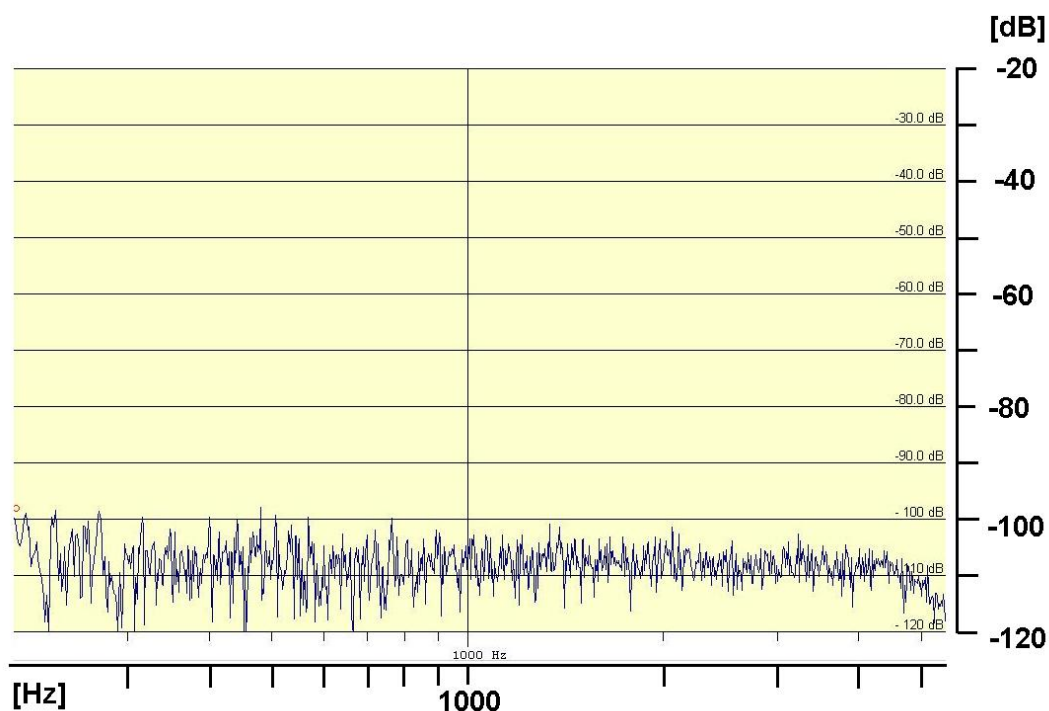
Skleněná láhev měla maximální objem $V_s = 0,73$ l a délku hrdla $l_s = 80$ mm. Plastová láhev měla maximální objem $V_p = 2,0$ l a hrdlo dlouhé $l_p = 27,3$ mm. Při ověření teorie bylo nutné u každé nádoby měnit objem a pro každý tento objem provést měření rezonance. Jak u skleněné tak i u plastové láhve se měnil objem tak, že láhev byla naplněna vodou, ta se poté odebírala a tím docházelo ke změně objemu láhve. Aby byl zjištěn přesný objem odebrané vody, byla tato voda vážena na laboratorní váze a objem byl poté dopočítán z hustoty vody při dané teplotě.

Rezonátor používaný k pasivnímu řízení na obrázku 15. Pro měření frekvence samotného Helmholtzova rezonátoru byl uzavřen spodní přívod vzduchu. Jeho maximální objem činí $V_r = 0,06$ l. Objem rezonátoru se snadno měnil nastavením hloubky dutiny h . Hrdlo zde představoval kruhový otvor v plechu o tloušťce $l_r = 0,4$ mm a průměru $D = 10$ mm (stejný jako průměr trysky).

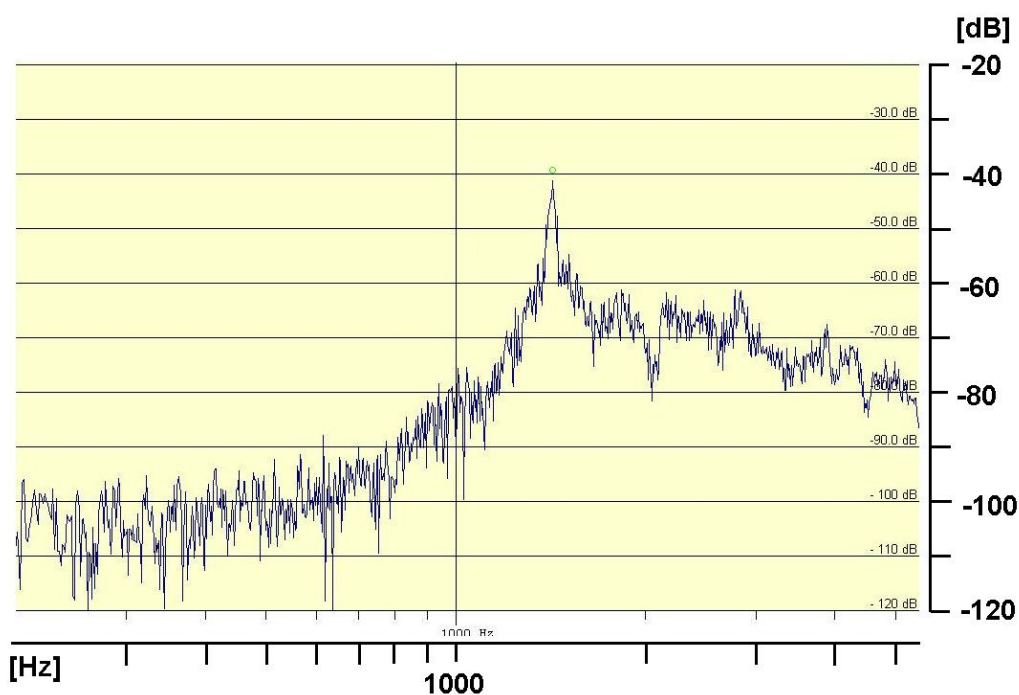


Obr. 15.: Rezonátor – uspořádání pro měření frekvence Helmholtzova rezonátoru

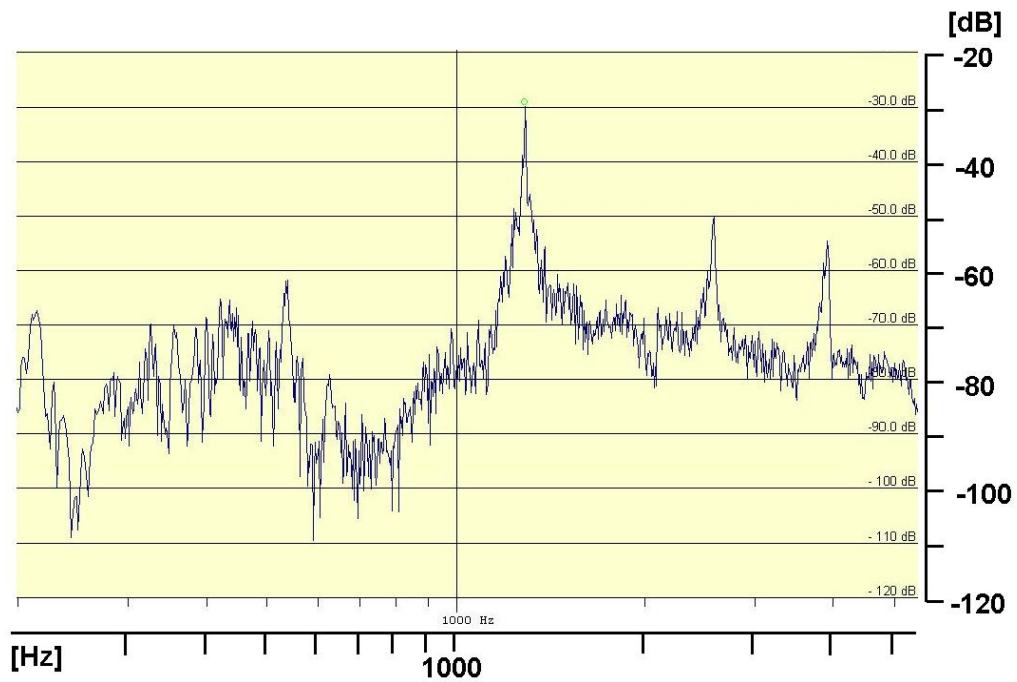
Na obrázcích 16 až 21 jsou uvedeny příklady PSD pro použitý rezonátor. Jako první je zobrazen pro srovnání graf PSD (obr. 16) pro hluk z okolí tj. bez přívodu vzduchu a dále grafy pro jednotlivé objemy rezonátoru ($h = 7, 10, 15, 20$ mm). Je dobře vidět, že se vrůstajícím objemem maximální frekvence klesá.



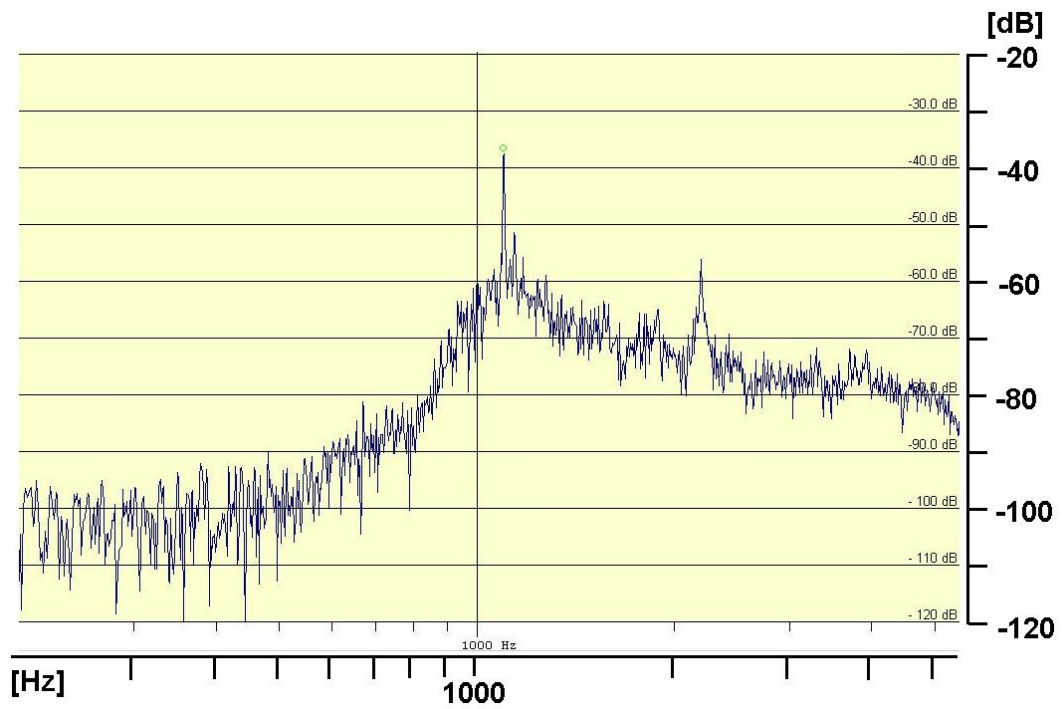
Obr. 16.: PSD bez rezonátoru - okolí



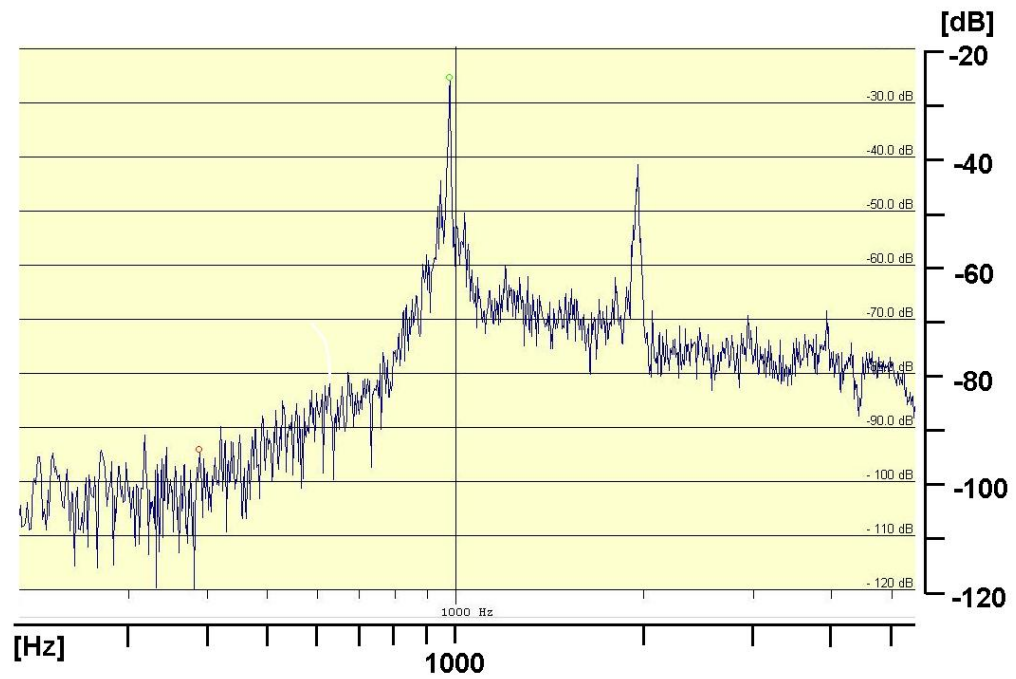
Obr. 17.: PSD rezonátoru – $h = 7$ mm



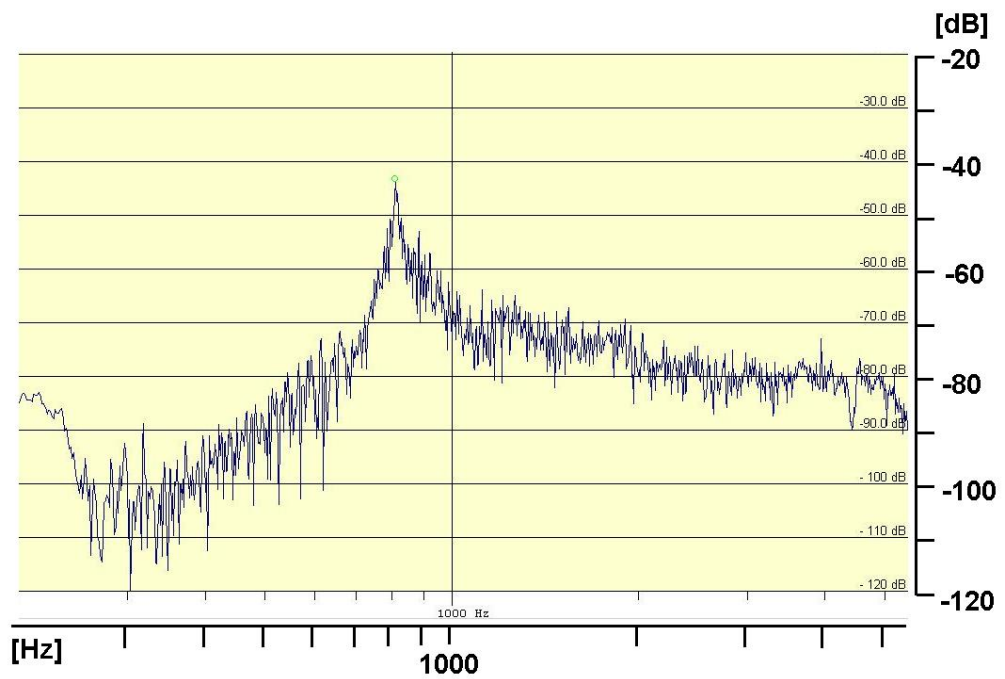
Obr. 18.: PSD rezonátoru – $h = 10 \text{ mm}$



Obr. 19.: PSD rezonátoru – $h = 15 \text{ mm}$



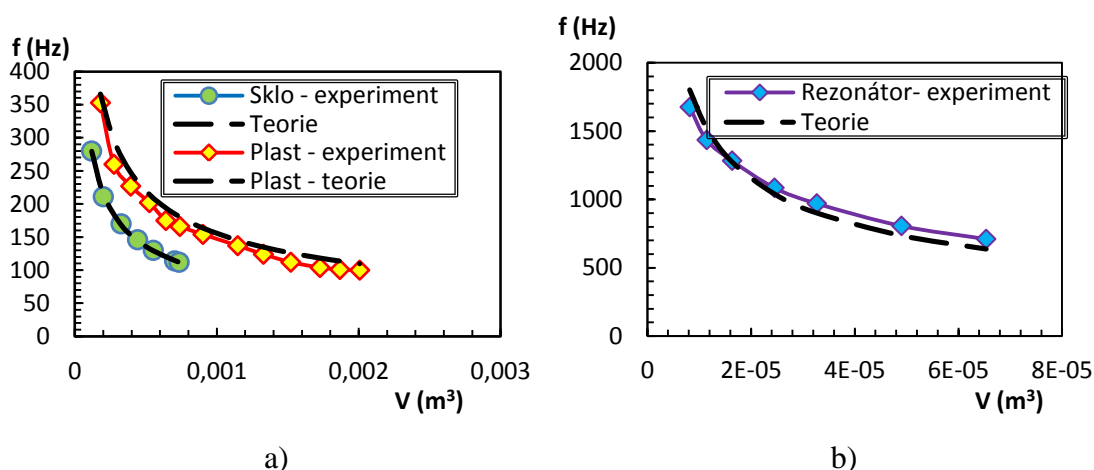
Obr. 20.: PSD rezonátoru – $h = 20 \text{ mm}$



Obr. 21.: PSD rezonátoru – $h = 30 \text{ mm}$

Rezonanční frekvence (tj. maximální frekvence na průbězích PSD) byly vyneseny do grafu ukazujícího závislost mezi frekvencí a objemem dutiny V a porovnány s vypočítanými teoretickými hodnotami podle vzorce (2). Na obrázku 22 (a) jsou vyhodnocené rezonanční frekvence pro obě lahve vyneseny v závislosti na objemu dutiny. Jak je zřejmé, nejlepší shody experimentu a teorie bylo dosaženo u skleněné láhve, kde byla odchylka maximálně 1,4 %. U láhve plastové činila odchylka maximálně 14 %. Ta byla nejspíše způsobena částečně pružným materiálem.

Na obrázku 22 (b) je vynesena závislost mezi rezonanční frekvencí a objemem dutiny pro zkoumaný rezonátor. Jak je vidět, výsledky experimentů velmi dobře odpovídají teoreticky předpovídaným hodnotám. Odchylka byla maximálně 10%.



Obr. 22.: Rezonanční frekvence Helmholtzova rezonátoru – porovnání výsledků experimentu a teorie; (a) skleněná a plastová láhev, (b) zkoumaný rezonátor – viz obr. 4.

5. Výsledky provedených experimentů

Měření proběhlo celkem ve čtyřech režimech, které byly charakterizovány zvoleným Reynoldsovým číslem. Jednotlivé varianty jsou uvedeny v tabulce 1, kde se nacházejí mimo jiné hodnoty průtoku na výtoku z trysky, střední rychlost a dopočítané Reynoldsovo číslo. Jelikož u režimu s $Re = 1600$ nebyly na Helmholtzově rezonátoru pozorovány výrazné rezonanční frekvence, byl rozšířen rozsah měření oproti zadání i na $Re = 30\,000$.

Tabulka 1. Parametry experimentů

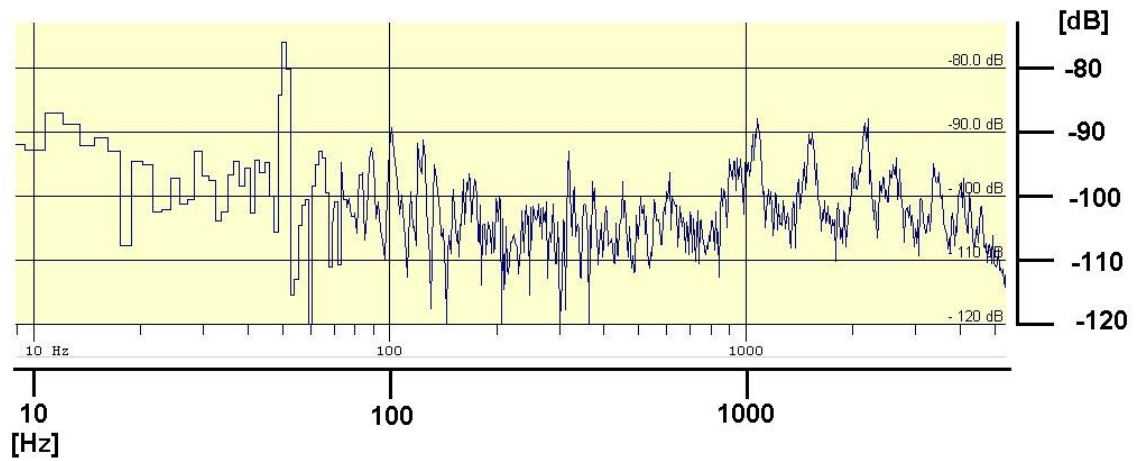
Režim	Q_{cal} ($ml \cdot min^{-1}$)	p_{rot} (Pa)	Q_{cal} ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Q_{rot} ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Q_{bar} ($m^3 \cdot s^{-1}$)	U_b ($m \cdot s^{-1}$)	Re
1600	11 961,0	105 050,0	1,99E-04	1,96E-04	2,07E-04	2,64	1 677
5000	32 410,0	131 610,0	5,40E-04	4,75E-04	6,28E-04	7,99	5 085
10000	60 280,0	153 300,0	1,00E-03	8,18E-04	1,26E-03	16,05	10 208
30000	129 662,0	281 300,0	2,16E-03	1,30E-03	3,67E-03	46,76	29 744

5.1. Vyhodnocení frekvence

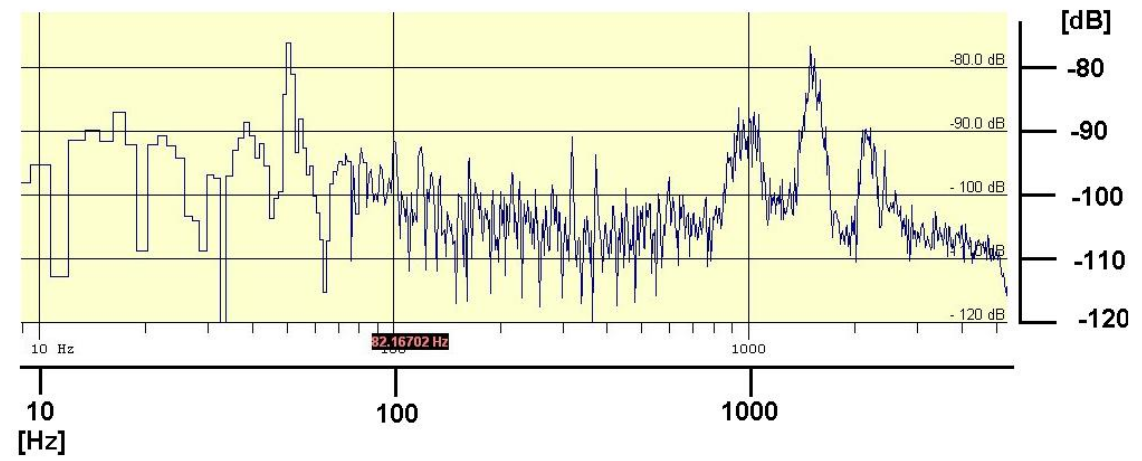
Vyhodnocení PSD bylo provedeno pro režimy $Re = 1600, 5000, 10\,000$ a $30\,000$ a pro různé objemy rezonátoru definované výškou dutiny $h = (0, 5, 8, 10, 12, 15, 20, 30, 40\text{ mm})$. Na následujících obrázcích jsou pro představu zobrazeny průběhy PSD vždy pro $h = 0\text{ mm}$ (tj. případ bez rezonátoru) a dále pro takové nastavení rezonátoru, u kterého předběžná měření ukázala nejvýraznější rezonanční efekty, tj. nejvýraznější vrcholy na průběhu PSD.

Na obrázku 23 Jsou zobrazeny spektrální výkonové hustoty pro režim $Re = 1600$. Rezonátor chování proudu ovlivňuje málo díky relativně malým rychlostem. Proto nebyl tento režim v dalších měřeních sledován.

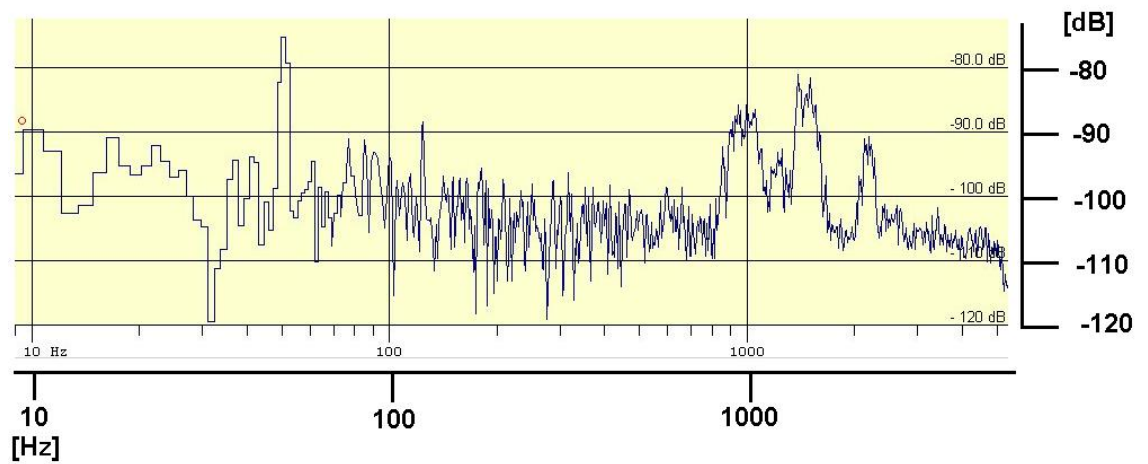
Na obrázku 24 ($Re = 5\,000$) je vidět, jak se mění rezonanční frekvence s narůstajícím objemem rezonátoru. Pro $Re = 10\,000$ a $30\,000$ (obr. 25 a 26) jsou již patrné vysoké špičky rezonančních frekvencí. U těchto režimů se dá tedy předpokládat významnější ovlivnění proudění.



h = 0 mm

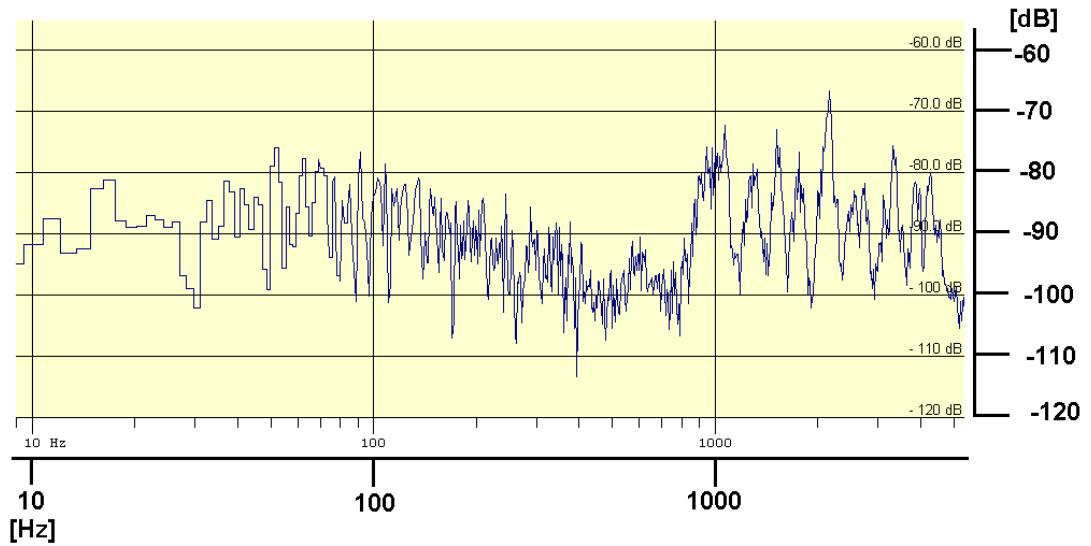


h = 8 mm

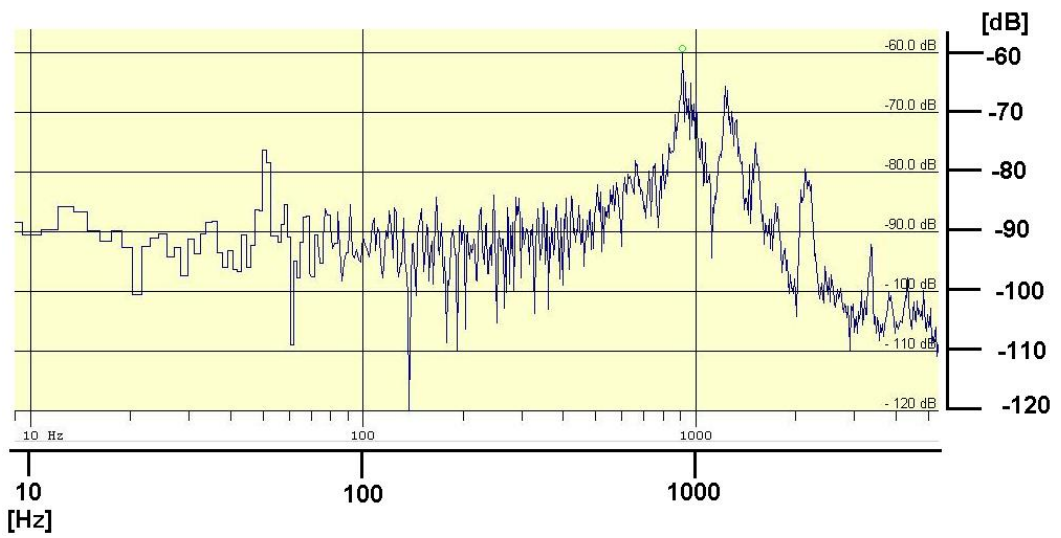


h = 10 mm

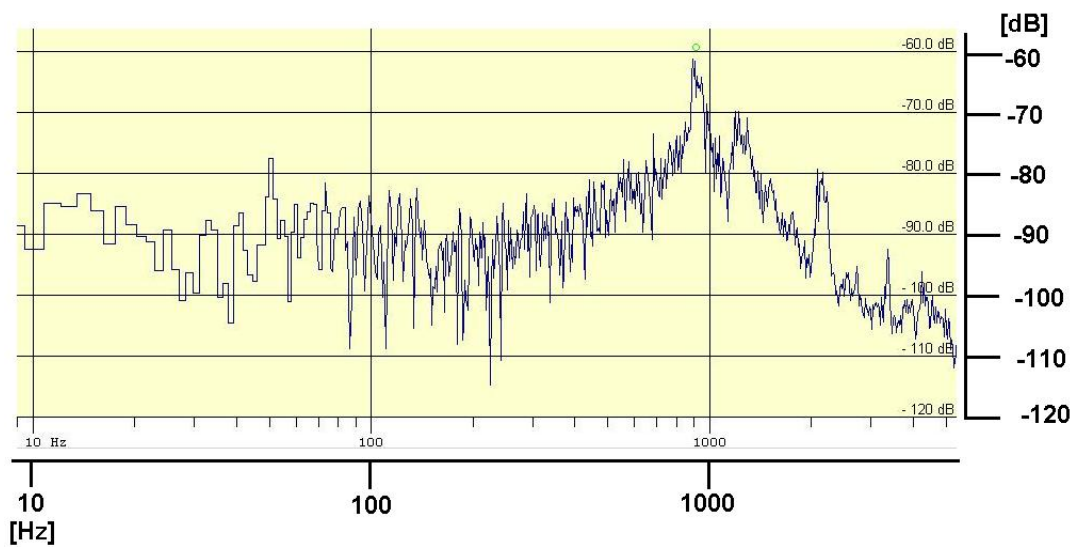
Obr. 23. PSD pro $Re = 1600$



h = 0 mm

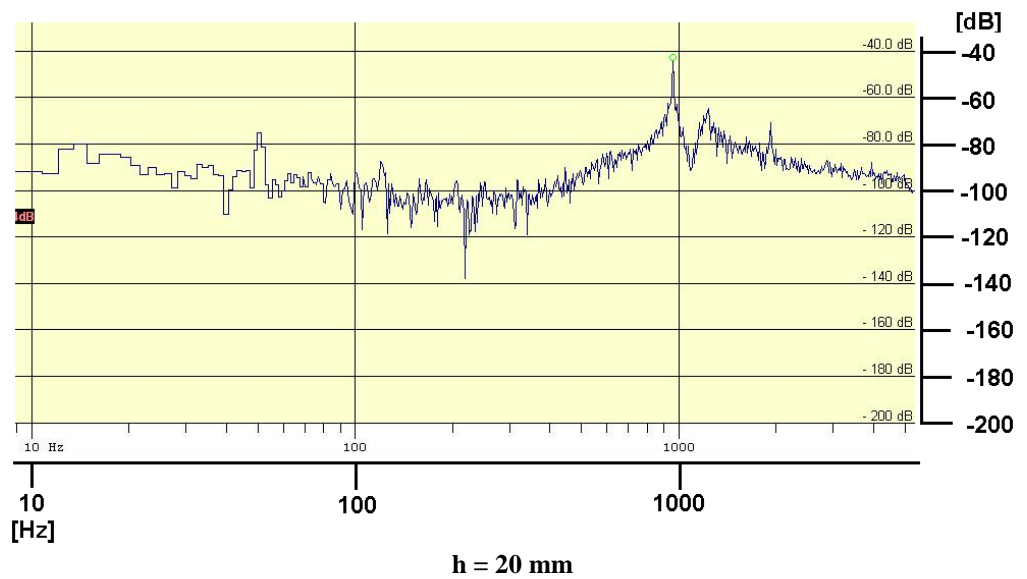
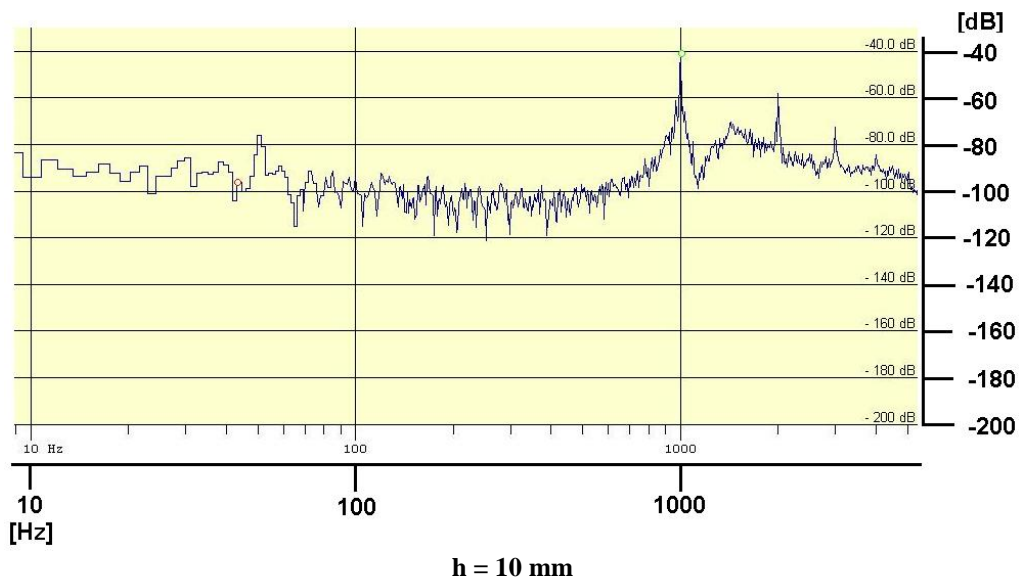
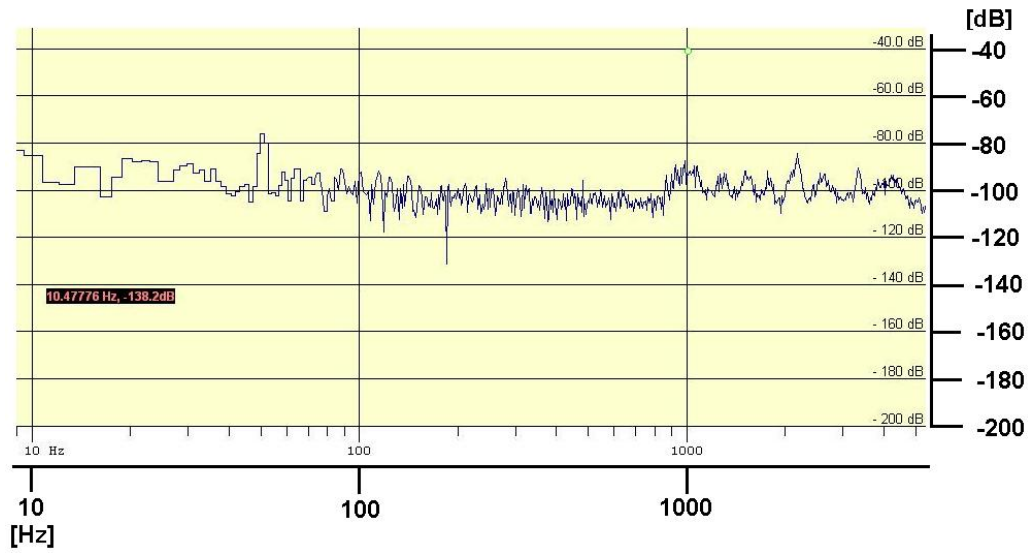


h = 15 mm

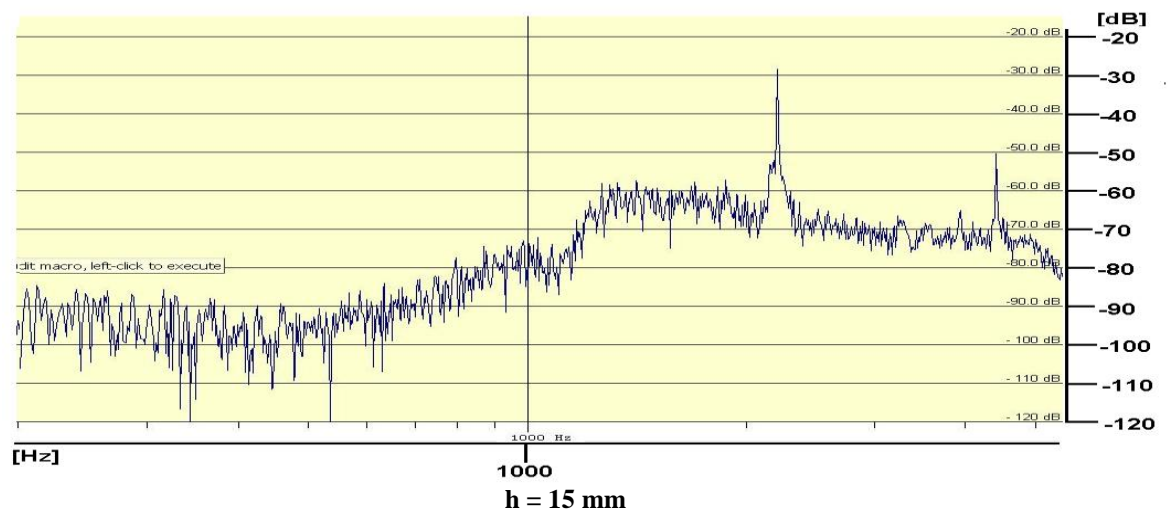
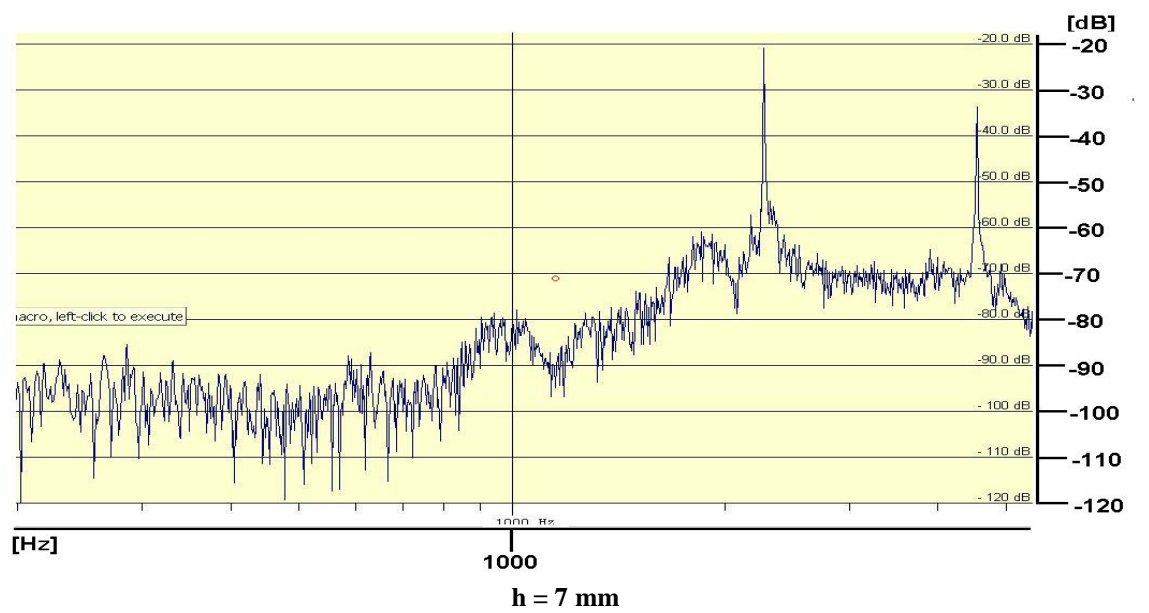
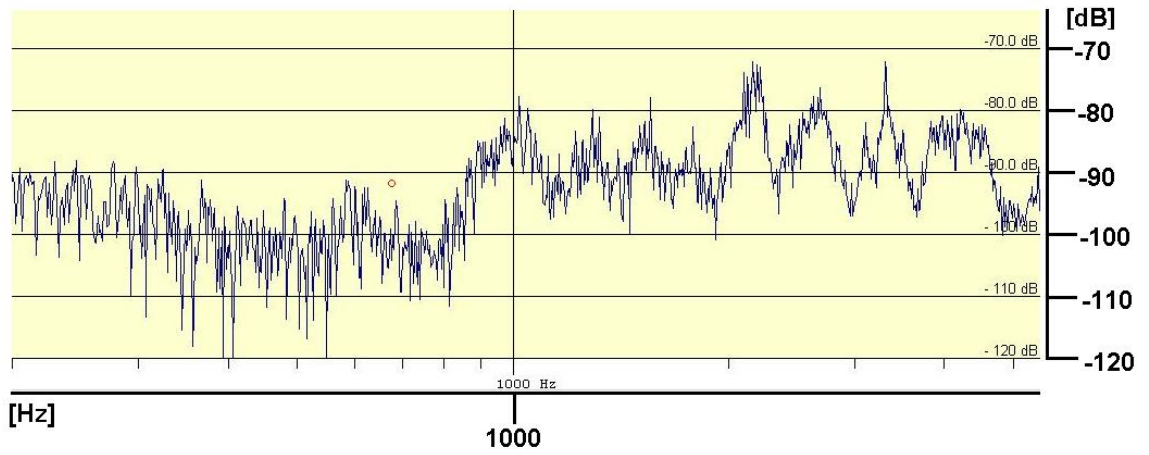


h = 20 mm

Obr. 24. PSD pro $Re = 5000$



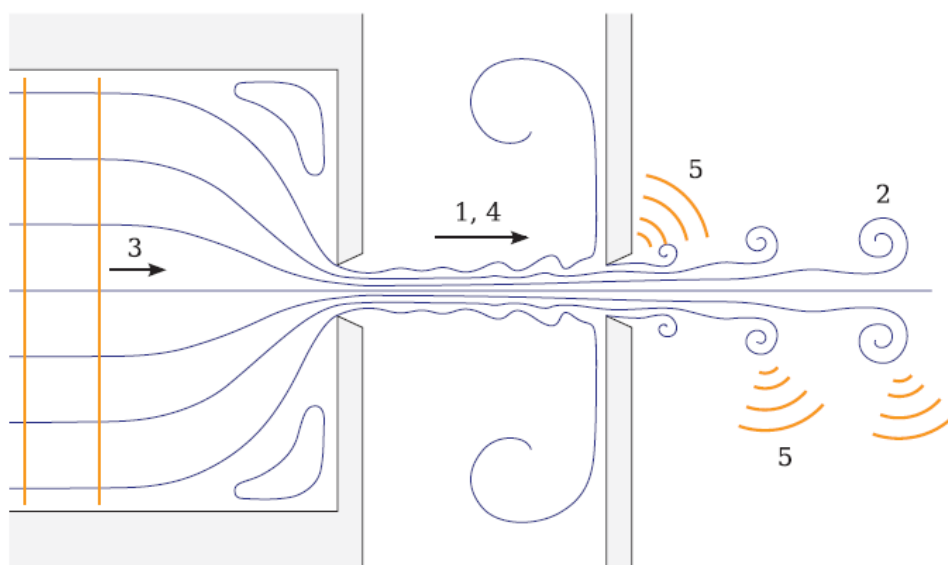
Obr. 25. PSD pro $Re = 10\ 000$



Obr. 26. PSD pro $Re = 30\ 000$

Na většině obrázků lze pozorovat, že za maximální frekvencí se nacházejí další výrazné špičky frekvencí. Jsou to buď násobky rezonančních frekvencí od Helmholtzova rezonátoru, nebo frekvence, které vznikají při dalších jevech odehrávající se v rezonátoru i po výstupu z něj.

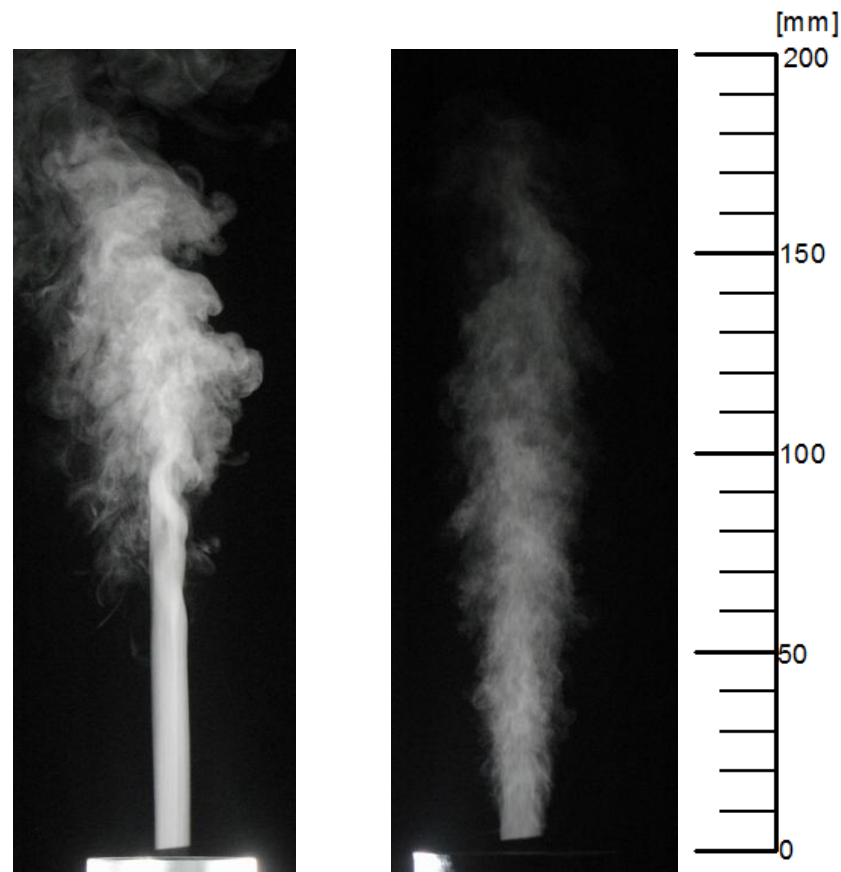
Jevy, které se mohou vyskytovat v podobném geometrickém uspořádání, popsali ve své práci Henrywood a Agarval [3]. Na obrázku 27 je zobrazeno pět různých příčin a zdrojů zvuku, s označením 1–5. K akustickým projevům může dojít již před tryskou (poz. 3), ale to je ve sledovaném případě vzhledem k malým rychlostem minimální. Dále při proudění vzduchu z výstupu trysky do rezonátoru vznikají oscilace tekutiny ve smykové vrstvě proudu (poz. 1) V rezonátoru vznikají oscilace od rozkmitání celého sloupce vzduchu (poz. 4). Dalším zdrojem zvuku je samotný výtok z otvoru rezonátoru (poz. 5). Významným zdrojem zvuku je smyková vrstva a její vírová řada ve výsledném zatopeném proudu (poz. 2)



Obr. 27. Schéma pěti významných příčin a zdrojů zvuku pro výtok dvojicí otvorů – viz Henrywood a Agarval [3].

5.2. Vizualizace proudění

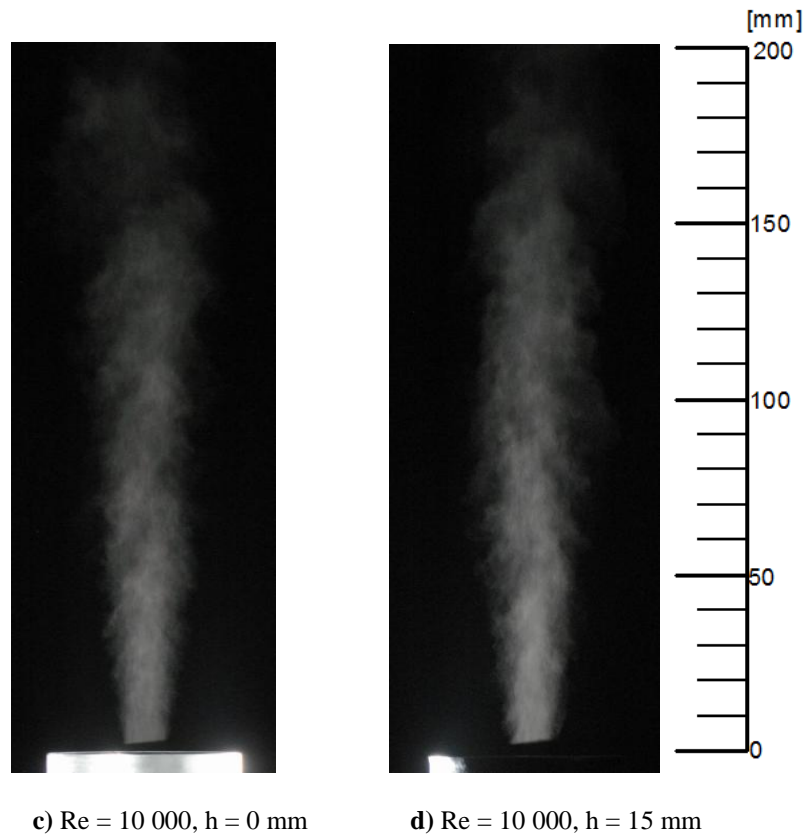
Vizualizace byla nejprve provedena pro všechny režimy bez pasivního řízení a následně pro režimy, u kterých se předpokládalo ovlivnění proudu tj. $Re = 10\,000$ a $Re = 30\,000$ i s pasivním řízením. Výsledné vizualizace jsou vidět na obrázcích 28, 29 a 30. Je zde dobře vidět (obr. 28) rozdíl mezi laminárním ($Re = 1600$) a turbulentním prouděním ($Re > 1600$). Pro poslední dva režimy s řízením byly zvoleny vizualizace s hloubkou rezonátoru $h = 15$ mm (obrázek 29 c) a 30 e)). Je vidět mírné rozšíření proudu oproti režimům bez řízení. Rovněž je vidět intenzivnější směšování u výstupu z trysky vlivem pasivního řízení pomocí rezonátoru. Kvantitativně jsou tyto jevy prozkoumány v další kapitole.



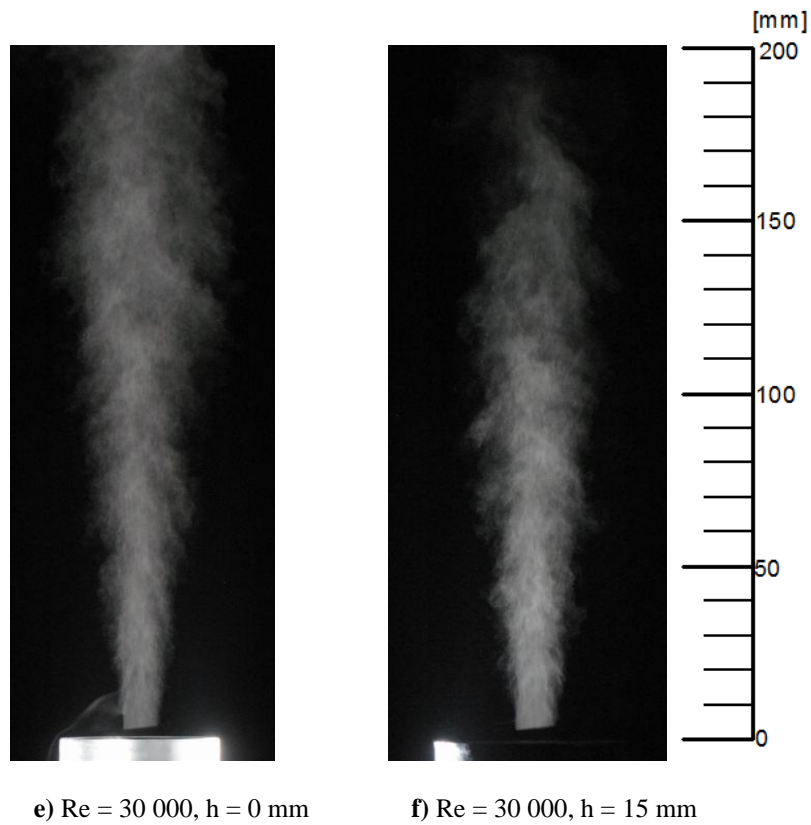
a) $Re = 1\,600$, $h = 0$ mm

b) $Re = 5\,000$, $h = 0$ mm

Obr. 28. Vizualizace $Re = 1\,600$, $5\,000$, případy bez řízení proudu



Obr. 29. Vizualizace $Re = 10\,000$ – ukázka vlivu řízení proudu



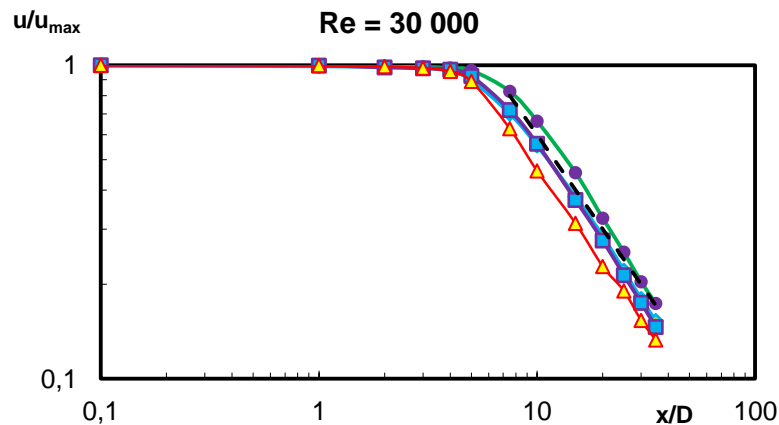
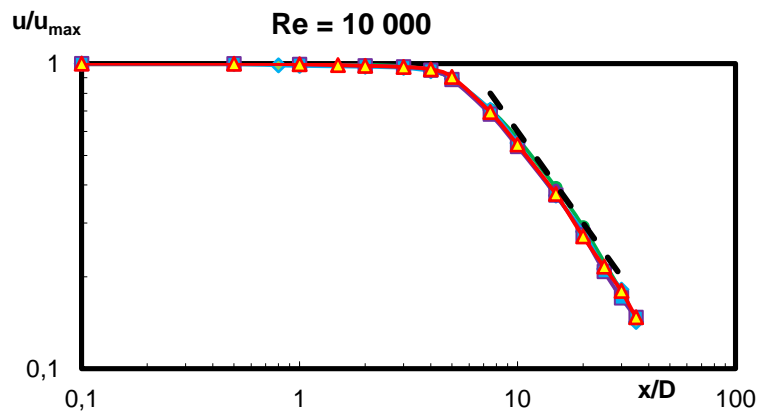
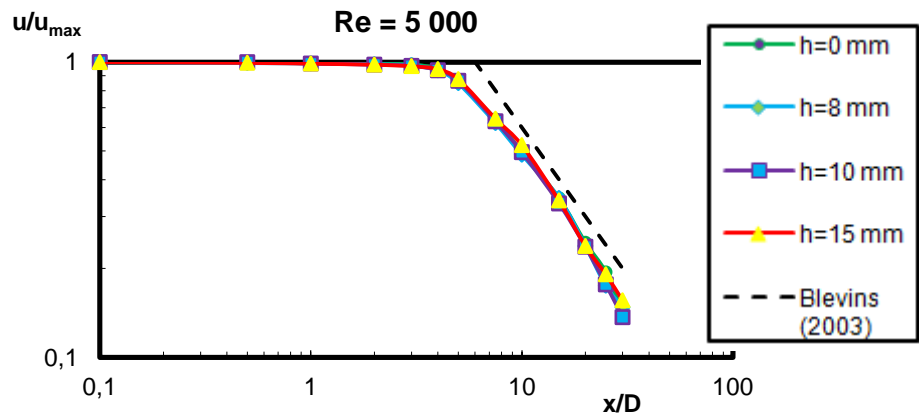
Obr. 30. Vizualizace $Re = 30\,000$ – ukázka vlivu řízení proudu

5.3. Rychlostní profily proudu

Pro režimy $Re = 5000$, 10000 a $30\,000$ byly nejprve změřeny poklesy rychlosti podél osy proudu (obrázek 31). Rychlost se měřila od výšky souřadnice $x = 0$ mm až do výšky $x = 350$ mm. Celkem bylo na ose naměřeno vždy 13 bodů. Grafy jsou zobrazeny v logaritmických souřadnicích. Na svislé ose je zobrazen poměr dané rychlosti k maximální rychlosti v proudu. Na vodorovné ose pak 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 viz [5]. Je vidět, že naměřené průběhy dobře odpovídají těmto závislostem. Vztah pro turbulentní proudění:

$$u = C \cdot x^{-1}, C = 6 \cdot v_{max} \cdot D \quad (13)$$

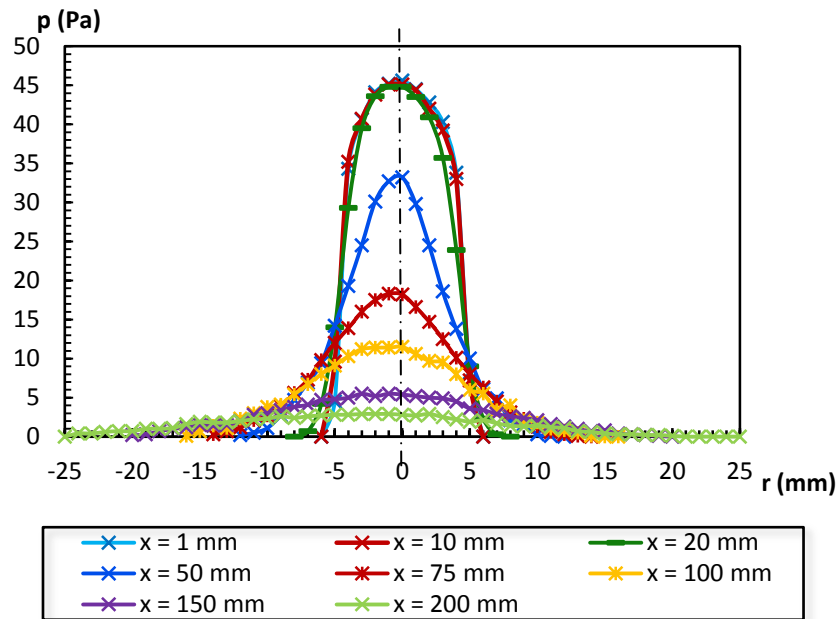
Požadovaný jev, tj. rychlejší pokles rychlosti vlivem řízení nastává až při režimu $Re = 30\,000$ – viz obr. 31. Při nezměněných parametrech proudu se chování proudu mění díky akustickému působení. Nejvýrazněji tento jev nastává při výšce rezonanční dutiny $h = 20$ mm. Dále byly podrobněji proměřeny režimy $Re = 5\,000$ a $Re = 30\,000$, kvůli porovnání působení řízení pro dva odlišné režimy.



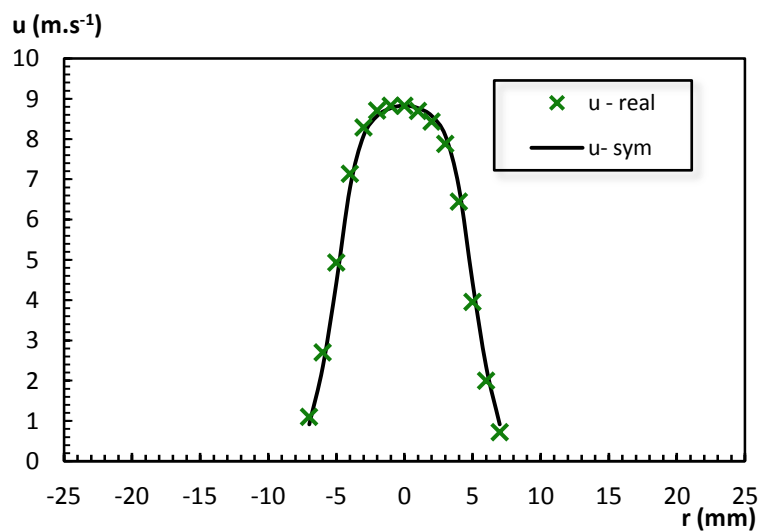
Obr. 31. Poklesy rychlostí na ose

Na obrázku 32 jsou vyneseny profily celkového tlaku p_c pro $Re = 5\,000$ a $h = 0$ mm. Následně byly vyhodnoceny profily rychlostí – příklad je na obrázku 33. Pro další zpracování byl použit předpoklad symetrie proudu a byla provedena tzv. "symetrizace profilu", tj. proložení osově symetrické křivky naměřenými body. Výsledné symetrické křivky procházejí body, jejichž souřadnice byly vypočítány jako průměrné hodnoty experimentálních hodnot na pravé ($r > 0$) a levé části ($r < 0$) naměřeného profilu. Na

obrázku 33 je uveden příklad pro režim $Re = 5000$, $h = 0$ mm a ve výšce $x = 20$ mm nad tryskou. Body vyznačují naměřené (reálné) hodnoty, křivka je průběh získaného symetrického profilu. Jak je zřejmé, odchylka zkoumaného proudu od ideálního osově symetrického případu je prakticky zanedbatelná. Pro ostatní režimy byly vyhodnoceny osově symetrické profily rychlosti stejným způsobem. Zprůměrované hodnoty se použily pro další zpracování výsledků.

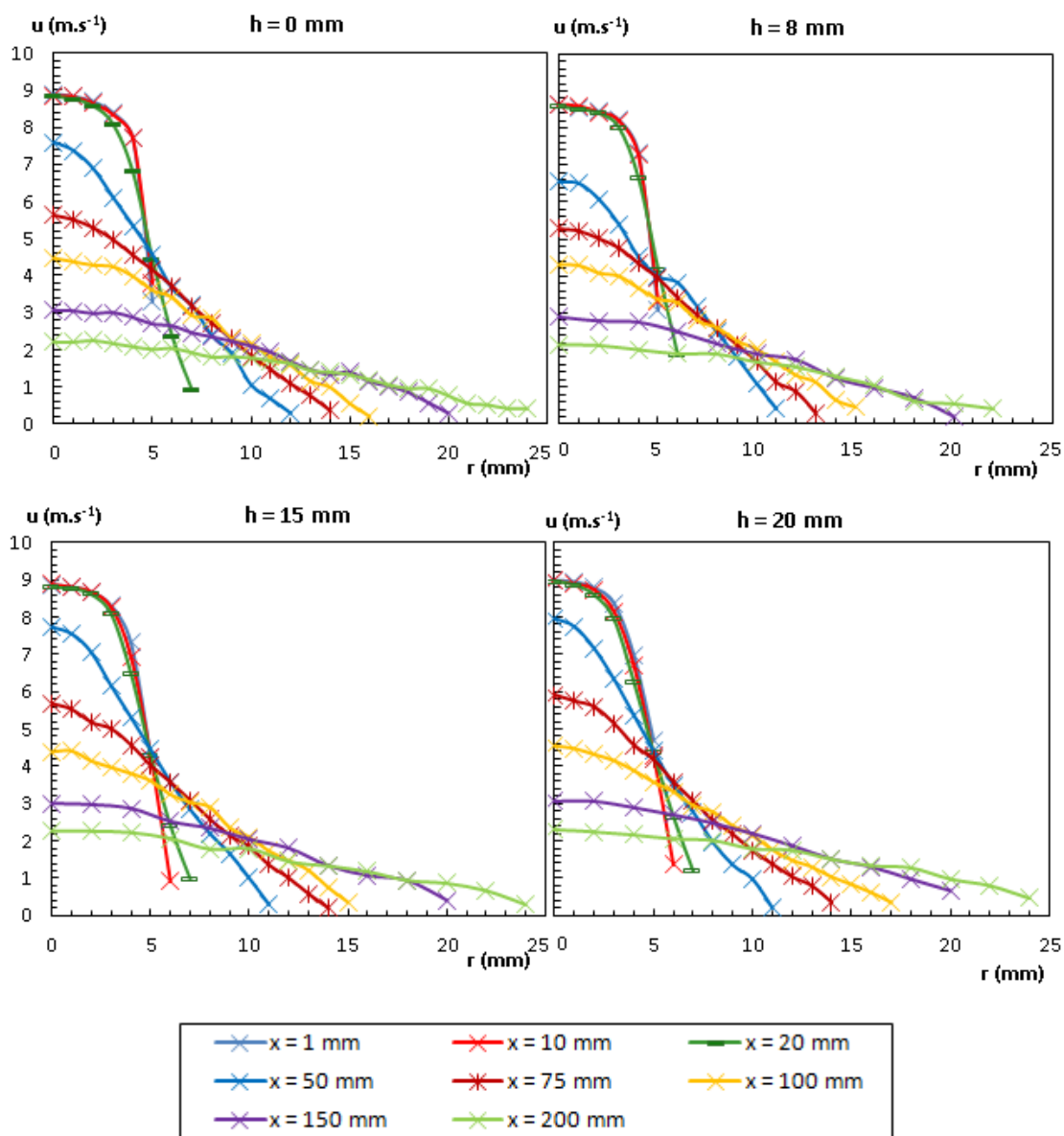


Obr. 32. Tlakové profily pro $Re = 5\,000$, $h = 0$ mm

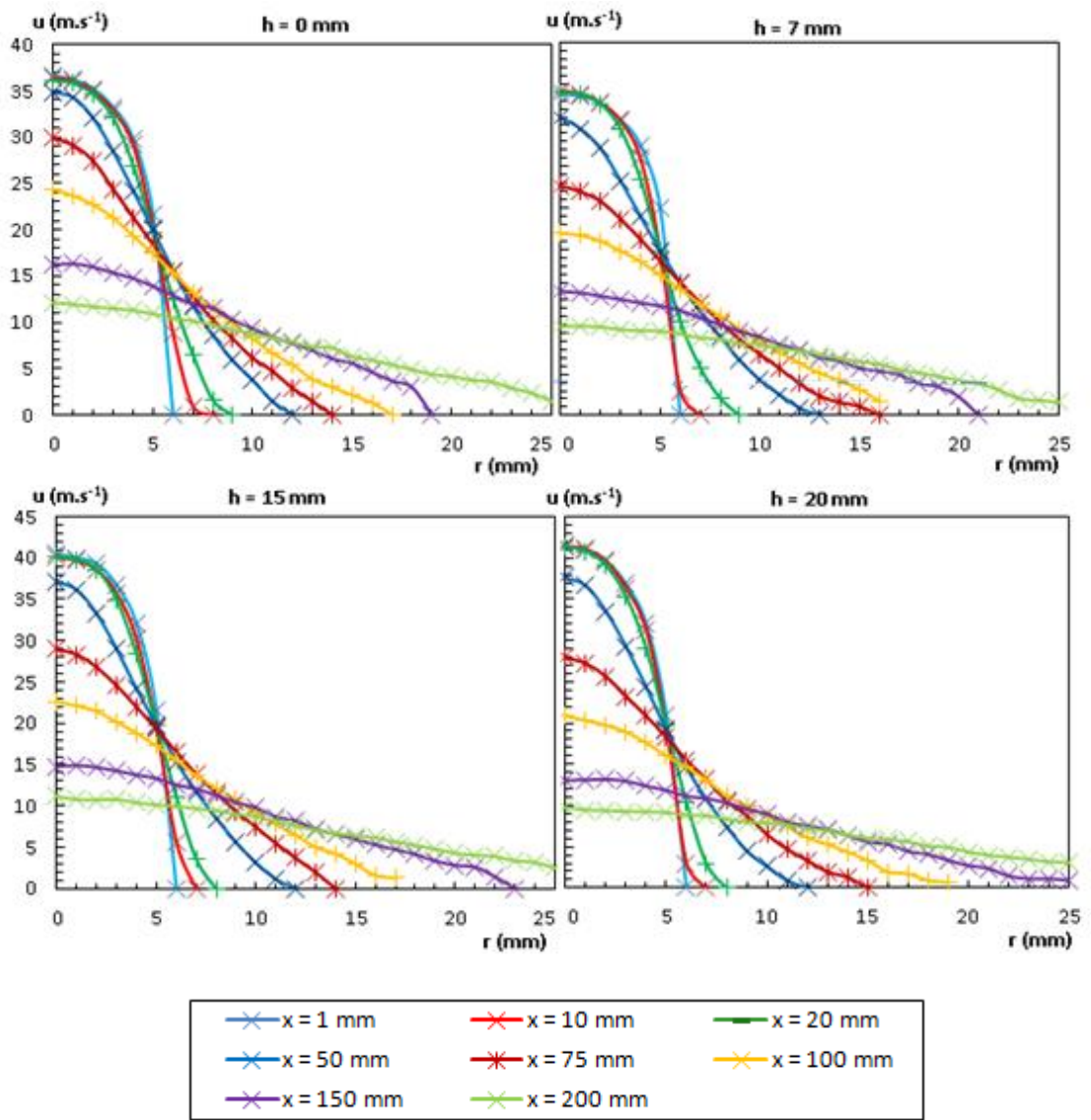


Obr. 33. Symetrizace rychlosti pro $Re = 5\,000$, $h = 0$ mm, $x = 20$ mm

Výsledné symetrické rychlostní profily pro různé objemy rezonátoru ($h = 0; 8; 15; 20$ mm) jsou na obrázku 34 ($Re = 5\,000$) a na obrázku 35 ($Re = 30\,000$). Na obou je vidět chování zatopeného proudu, tj. se vzrůstající vzdáleností od trysky klesá rychlost a profil se rozšiřuje.



Obr. 34. Rychlostní profily pro $Re = 5\,000$



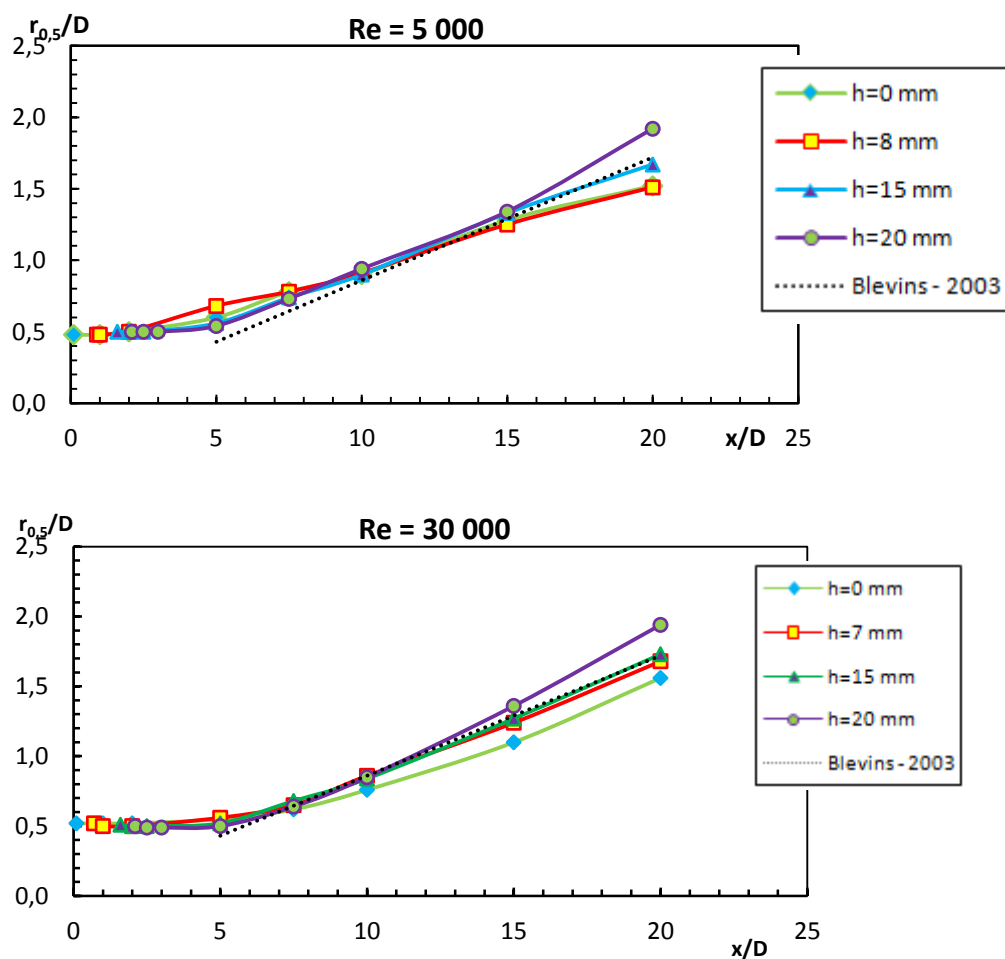
Obr. 35. Rychlostní profily pro $Re = 30\,000$

Jako další charakteristika daného proudění byla zkoumána pološířka proudu. Je to taková hodnota radiální souřadnice r , kde se rychlost proudění rovná polovině maximální rychlosti. Vztah pro pološířku proudu a vertikální souřadnici x definoval například Blevins [5], jako:

$$r_{0,5} = 0,086 * x \quad (14)$$

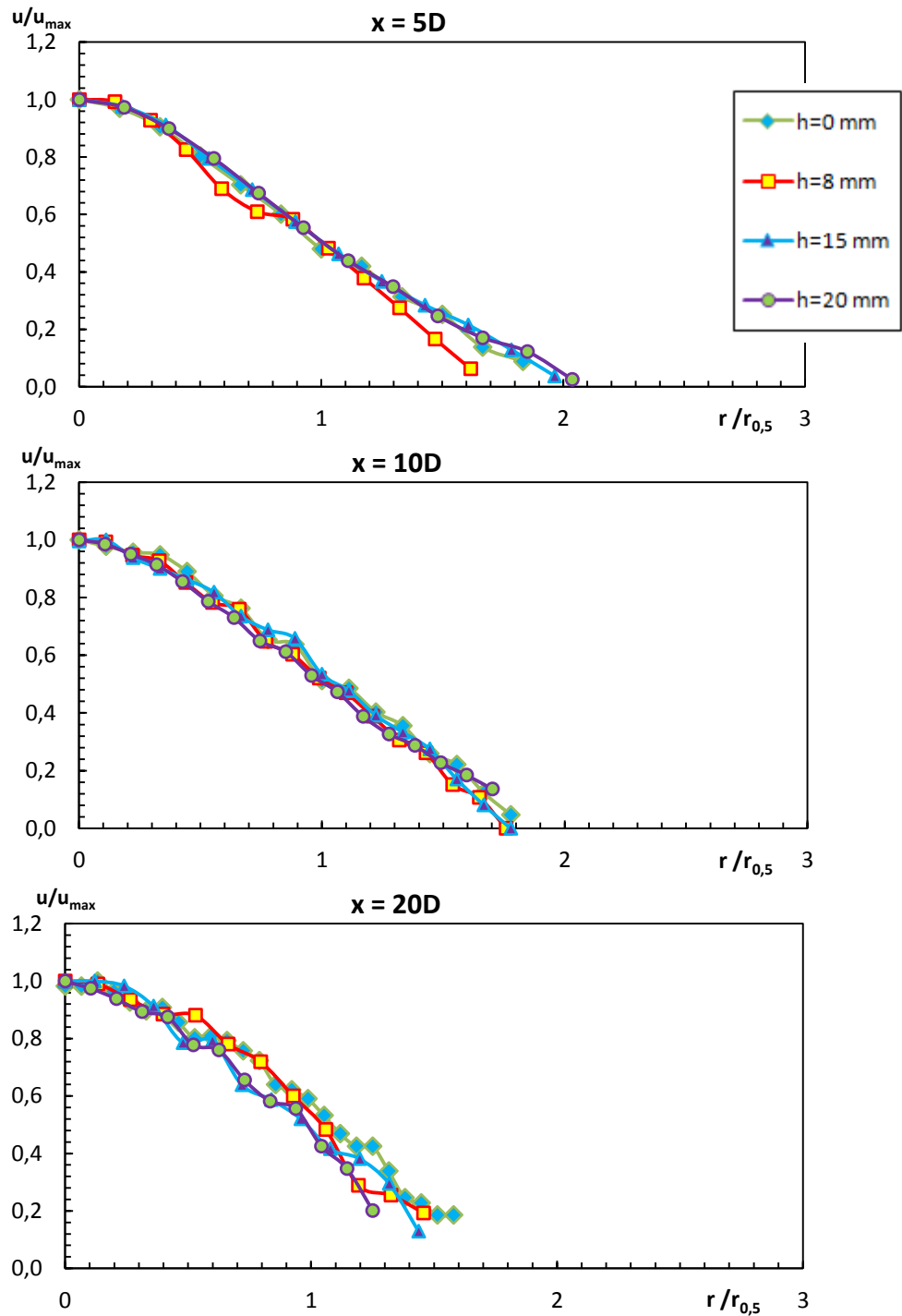
Grafy zobrazující tuto charakteristiku proudu v bezrozměrných souřadnicích jsou na obrázku 36. Na vodorovné ose je poměr výšky x a průměru trysky D , na svislé ose pak poměr dané pološířky a průměru D . Průběhy dobře kopírují vztah (14). Pro $Re = 5000$ je vidět malý rozptyl pološířky proudu. Pouze pro $x = 20D$ je patrný větší rozptyl, ale zde již mohou být výrazné nepřesnosti měření - tzn. vliv řízení zde není patrný.

Pro $Re = 30\,000$ je vliv řízení patrný jako systematický nárůst pološířky proudu. Především pro $h = 20$ mm je nárůst pološířky oproti režimu bez řízení ($h = 0$ mm) cca 25 %.

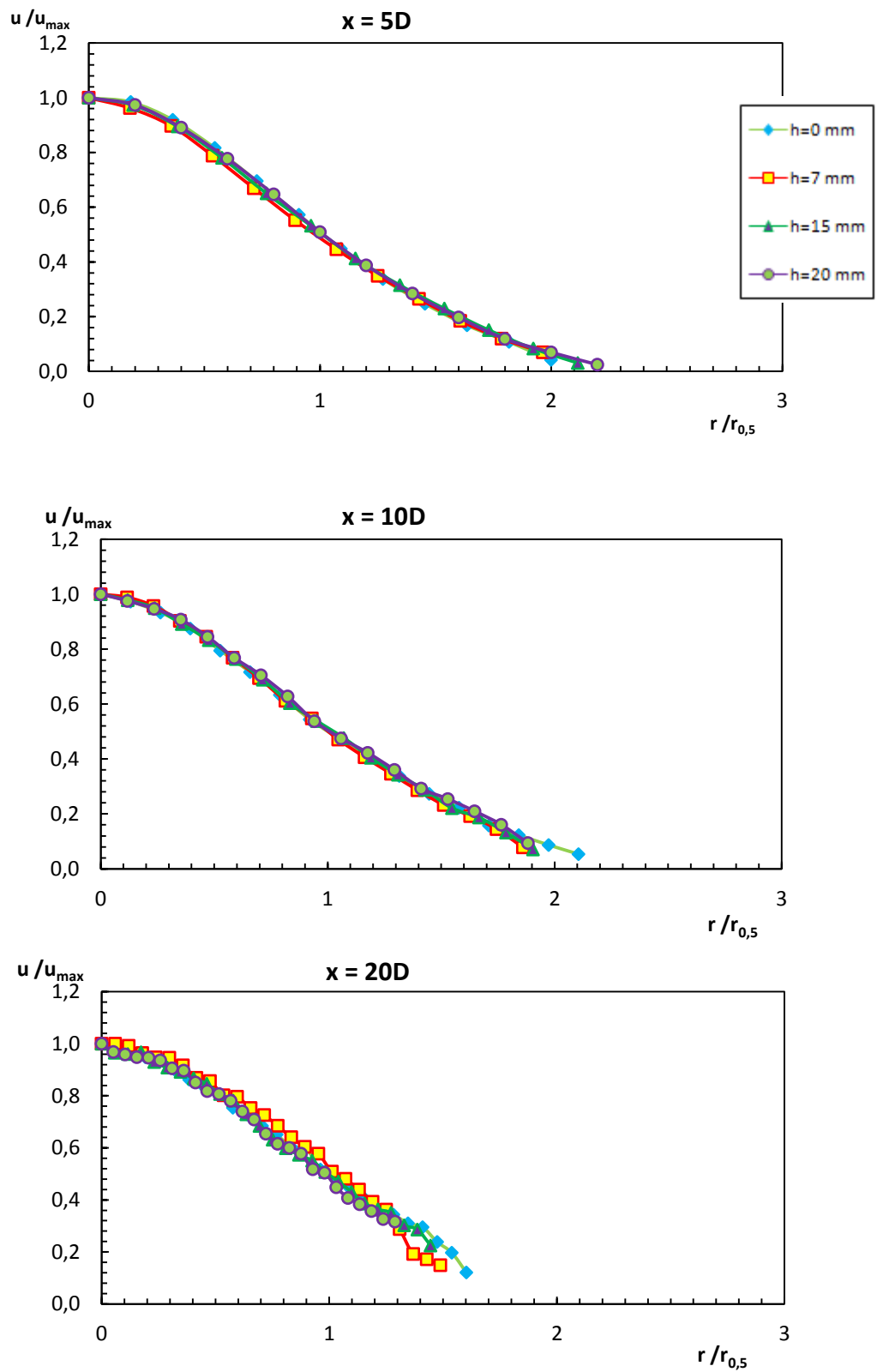


Obr. 36. Pološířky proudu

Výsledné pološířky proudu jsou použity v grafu zobrazující vybrané rychlostní profily v bezrozměrných souřadnicích (obr. 37 a 38). Na vodorovné ose je poměr horizontální souřadnice r k příslušné pološířce proudu $r_{0,5}$ a na svislé ose poměr rychlosti k rychlosti maximální pro daný profil. Všechny výsledné profily se sjednotí do jediného, téměř totožného průběhu. Zkoumaný proud splňuje podmínky podobnosti.

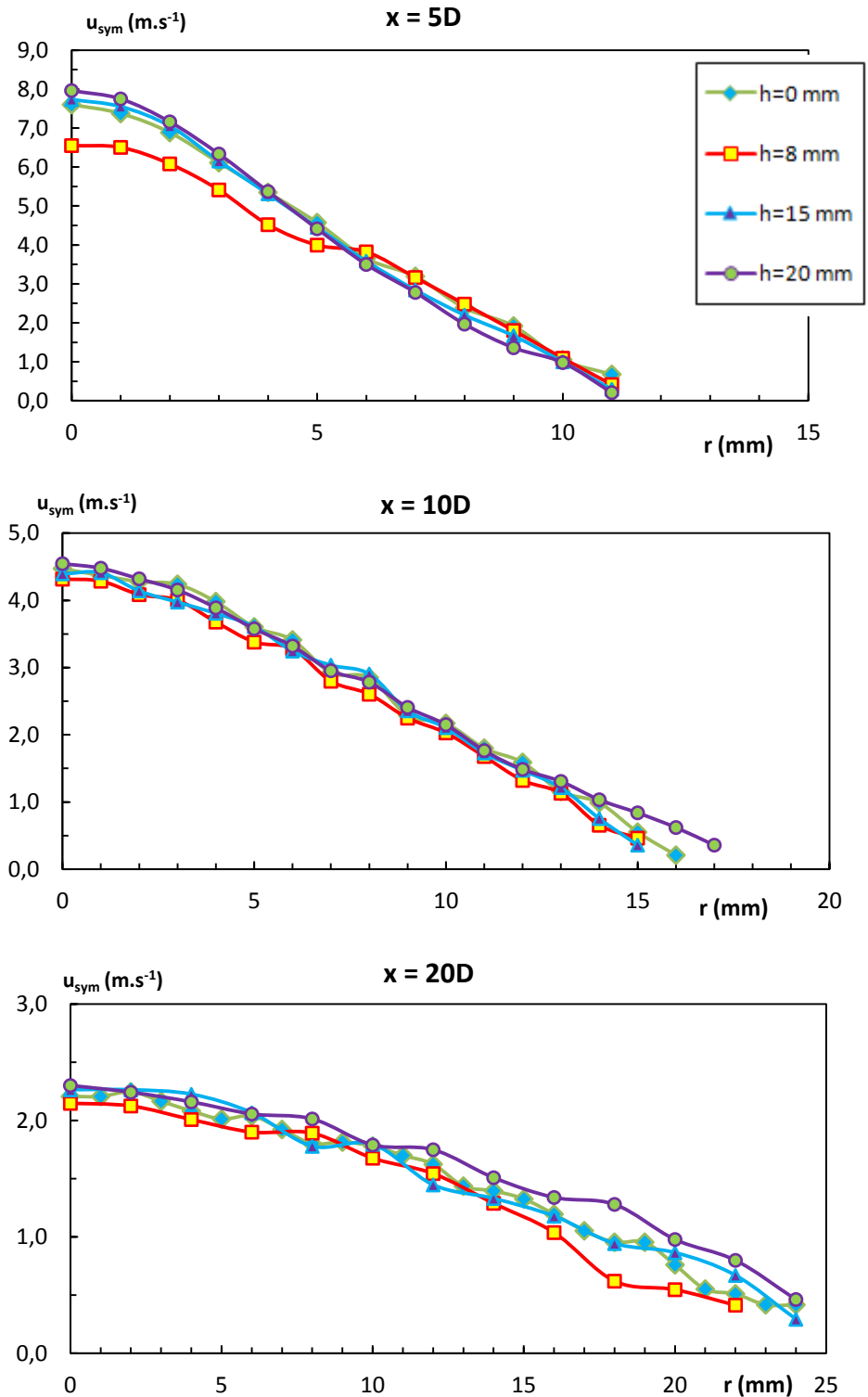


Obr. 37. Rychlostní profily v bezrozměrných souřadnicích pro $Re = 5000$



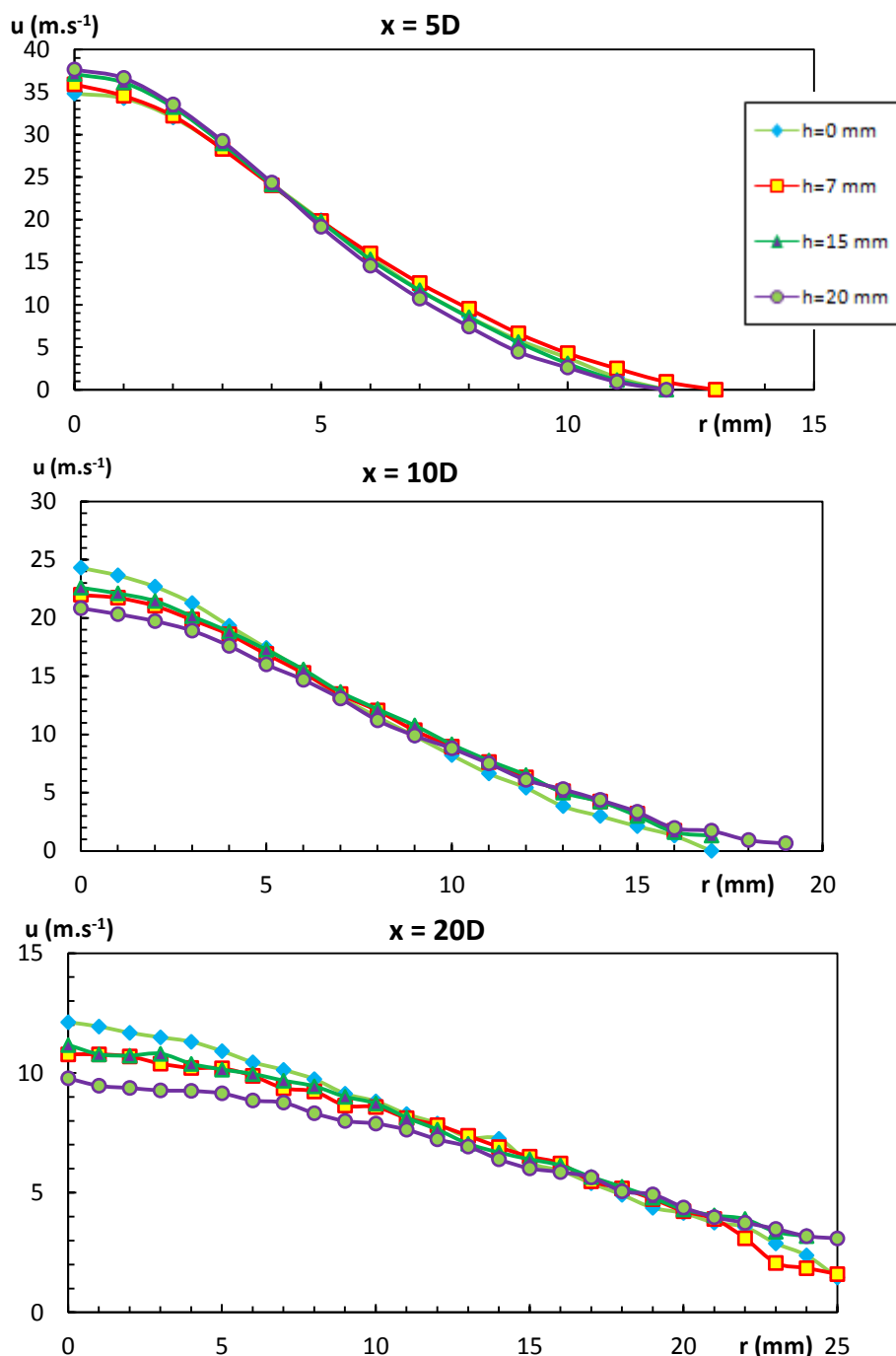
Obr. 38. Rychlostní profily v bezrozměrných souřadnicích pro $Re = 30\,000$

Porovnání rychlostních profilů a předvedení vlivu pasivního řízení rezonátorem je ukázáno na obrázcích 39 a 40. Na nich jsou zobrazeny rychlostní profily vždy pro určitou výšku x nad tryskou ($x = 5D, 10D$ a $20D$) a různé objemy rezonátoru – tj. pro $h = (0, 7, 15$ a $20)$ mm.



Obr. 39. Porovnání rychlostních profilů pro $Re = 5\,000$

Lze dobře porovnat, jak určitý rezonátor ovlivňuje rychlostní profil v určité výšce. U Reynoldsova čísla 5 000 (obrázek 39) dochází k nejvýraznější změně pro hloubku $h = 8$ mm, kdy nastává pokles rychlosti na ose proudu v nejbližším okolí trysky ($x = 5D$). U Reynoldsova čísla 30 000 (obrázek 40) lze pozorovat ovlivnění proudu, které systematicky vzrůstá s objemem rezonátoru. Nejvíce je tedy pokles rychlosti a rozšíření proudu vidět na profilu při hloubce rezonátoru $h = 20$ mm a ve výšce $x = 20D$.



Obr. 40. Porovnání rychlostních profilů pro $Re = 30\,000$

6. Vyhodnocení experimentu

Rychlostní profily proudů byly dále zpracovány. Integrací se vypočítaly hodnoty objemového toku, průtočné hybnosti a dále průtočné kinetické energie. Vztahy pro výpočet potřebných hodnot byly převzaty z Noskievič [17]. Vypočítané průběhy se dále porovnávaly s údaji z literatury – (Blevins [5], Kotsovinos [20], Rajaratnam [6]).

Objemový tok byl vypočítán z:

$$Q_v = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^{\infty} u \cdot r \cdot dr \quad (15)$$

Průtočná hybnost ze vzorce:

$$M_v = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \int_0^{\infty} u^2 \cdot r \cdot dr \quad (16)$$

A průtočná kinetická energie z:

$$E_v = \pi \cdot \rho \cdot \int_0^{\infty} u^3 \cdot r \cdot dr \quad (17)$$

Na obrázcích číslo 41 a 42 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]:

$$Q = 0,16 \cdot \frac{2x}{D} \cdot Q_0 \quad (18)$$

Jak lze vyčíst z grafů, objemový tok ve vzrůstající vzdálenosti od trysky narůstá díky přisávání vzduchu z okolí. K přisávání dochází u režimů s $Re = 5\,000$ méně než u režimů s $Re = 30\,000$.

Na obrázcích 41 a 42 jsou vyneseny také hodnoty průtočné hybnosti v bezrozměrných souřadnicích. Jak je vidět z křivky popisující průtočnou hybnost, měla by hybnost zůstat téměř konstantní – viz Kotsovinos [20]. Vztah vypadá:

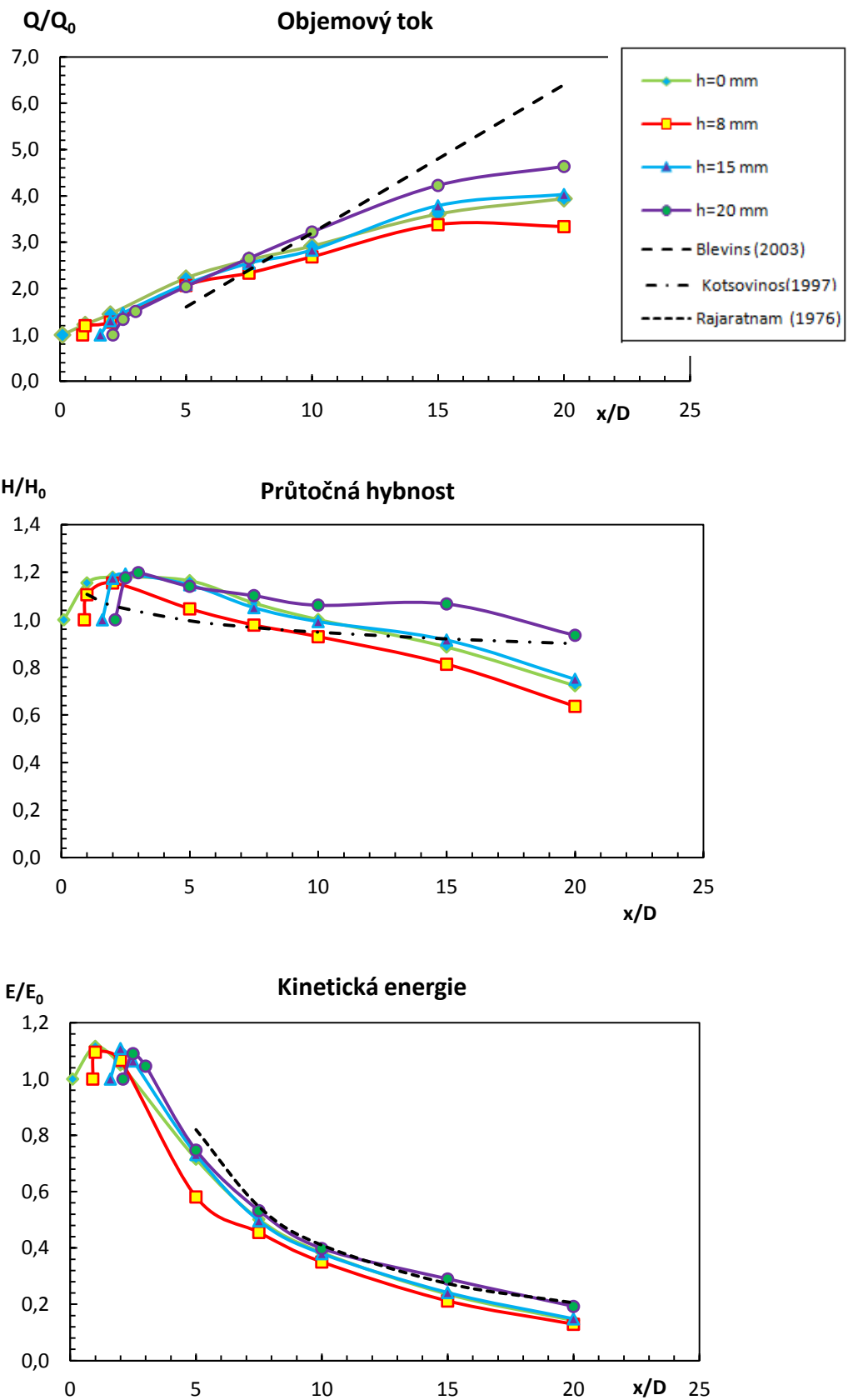
$$\frac{M}{M_0} \cong 0,983 - 0,0693 \cdot \ln\left(\frac{x}{6D}\right) \quad (19)$$

Pokles hybnosti je patrný pro obě Reynoldsova čísla. Pro $Re = 5\,000$ je pokles nejvýraznější u objemu rezonátoru o hloubce dutiny $h = 8$ mm. V bodě $x/D = 20$ je pokles 10 % oproti režimu bez řízení (obr. 41). Pokles hybnosti pro $Re = 30$, $h = 20$ mm v bodě $x/D = 20$ činí 27 % oproti režimu bez řízení (obr. 42).

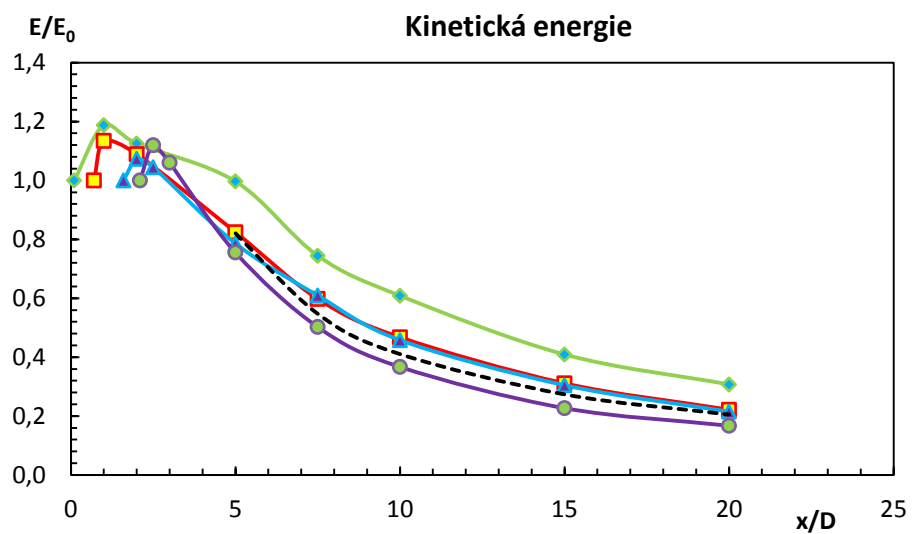
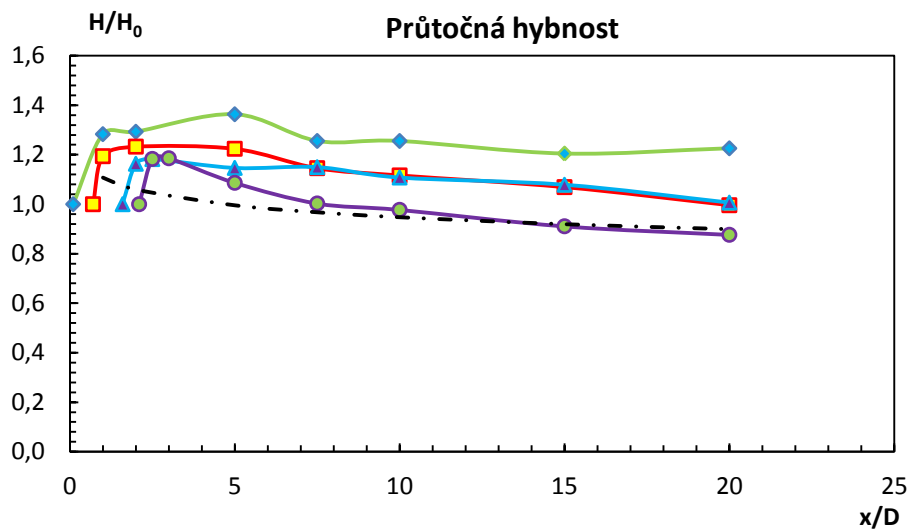
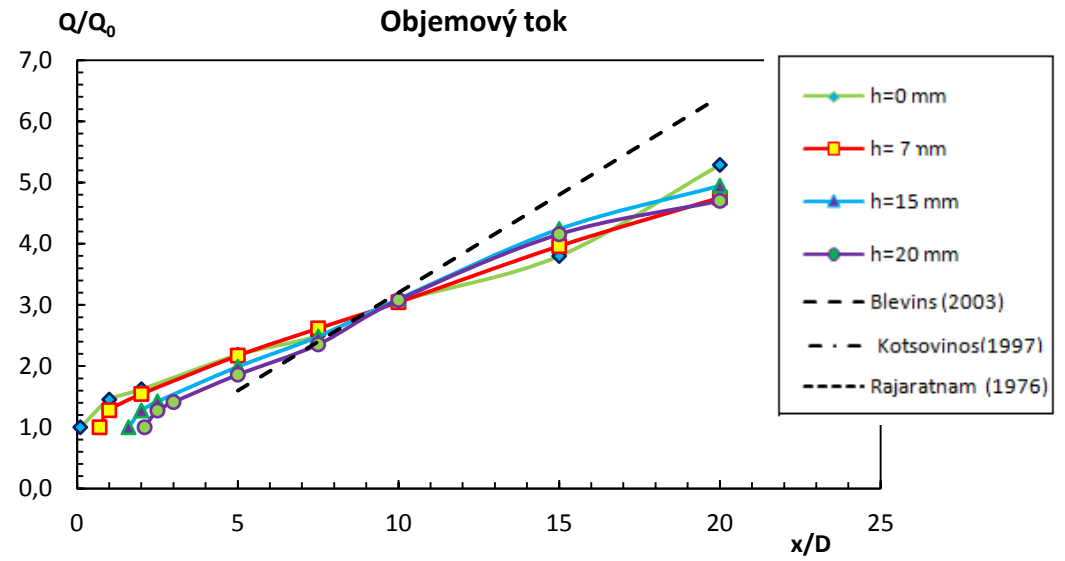
Poslední jsou na obrázcích 41 a 42 zobrazeny bezrozměrné průběhy kinetické energie. Ta se vzrůstající vzdáleností od ústí trysky klesá. Křivky dobře odpovídají tvaru křivky dle Rajaratnama [6]:

$$\frac{E}{E_0} = 4,1 \cdot \frac{D}{x} \quad (20)$$

Vliv rezonátoru na pokles průtočné kinetické energie má systematický charakter, nejlépe identifikovatelný je pro největší zkoumané rychlosti, tj. pro $Re = 30\,000$, viz obrázek 42. Zvětšování objemu dutiny zvětšováním délky h způsobuje pro $x/D > 4$ pokles průtočné kinetické energie. Například pro $x/D = 20$ (obr. 42) činí tento pokles 46 % oproti výchozímu stavu bez dutiny ($h = 0$). Dochází k intenzivnějšímu směšování s okolním prostředím a tím pádem klesá kinetická energie mnohem dříve, než v případě bez řízení



Obr. 41. Integrální hodnoty proudu – $Re = 5\,000$



Obr. 42. Integrální hodnoty proudu – $Re = 30\,000$

7. Závěr

V práci bylo podrobně popsáno experimentální zařízení, které bylo schopné vytvářet osově symetrický proud vzduchu. Hlavními částmi zřízení byly tryska a rezonátor. Tryska sloužila k vytvoření osově symetrického proudu vzduchu. Rezonátor byl použit s cílem ovlivňovat chování proudu. Zařízení tedy sloužilo k ověření schopnosti rezonátoru pasivně řídit osově symetrický proud. Samotné zrealizování experimentu spočívalo v použití rezonátoru pro různé objemy jeho dutiny a pro různá Reynoldsova čísla proudu ($Re = 1600, 5000, 10000, 30000$).

Protože se v experimentu uvažovalo použití rezonátoru v režimu Helmholtzova rezonátoru, bylo provedeno před samotným experimentem ověření, jak chování použitého rezonátoru odpovídá teoretickým poznatkům. Toto ověření se provedlo pomocným měřením, kdy rezonance byly vyhodnoceny ze spektrální výkonové hustoty (zpracování signálu mikrofonu). Kromě samotného rezonátoru, byly navíc použity dvě další nádoby. Z tohoto ověření vyplynulo, že vyhodnocené rezonanční frekvence dobře odpovídají teoretickým hodnotám. V případě použitého rezonátoru je odchylka maximálně 10 procent.

V experimentu s pasivním řízením proudu se použila vizualizace, vyhodnocení spektrální výkonové hustoty a proměrování rychlostního pole proudu (rychlostní profily a poklesy rychlostí podél osy) pomocí Pitotovy sondy. Vizualizace sloužila k ověření funkce zařízení pomocí zviditelnění proudu vzduchu vodní mlhou a získání kvalitativních údajů. Vyhodnocení spektrální výkonové hustoty sloužilo k identifikaci parametrů, relevantních pro řízení proudu. Byly přitom vybrány takové objemy dutiny rezonátoru, u kterých docházelo k významnějším ovlivněním proudu. Měření rychlosti Pitotovou sondou pak byly získány kvantitativní údaje.

Vizualizace ukázala chování případu bez vlivu řízení i s pasivním řízením. Vyhodnocení spektrální výkonové hustoty prokázalo vliv pasivního řízení na akustické projevy. Pro menší hodnoty Reynoldsova čísla $Re = 1\ 600$ a $Re = 5\ 000$ byly akustické projevy malé. Ovšem pro větší hodnoty Reynoldsova čísla $Re = 10\ 000$ a $30\ 000$ byly akustické projevy výrazné. Na základě těchto výsledků byly vybrány případy proudění pro $Re = 5000$ a $Re = 30000$, které byly dále proměřovány.

Pitotovou sondou byly naměřeny tlakové profily v různých vzdálenostech podél proudu a pokles tlaku v ose proudu. Naměřená data byla dále zpracována do podoby rychlostních profilů. Vyhodnocen byl poklesu rychlosti proudu podél osy, který indikuje účinnost řízení proudu rezonátorem. U režimu $Re = 30\ 000$ docházelo ke znatelnému ovlivnění proudu. Vyhodnocena byla rovněž pološířka proudu, která toto tvrzení potvrdila. Zrychlil se pokles rychlosti a rychlostní profil se rozšířil. Došlo tedy k intenzifikaci směšování proudu s okolím.

Z rychlostních profilů byly vyhodnoceny integrální charakteristiky proudu: objemový tok, průtočná hybnost proudu, průtočná kinetická energie proudu. Vypočítané charakteristiky byly porovnány s údaji v literatuře. Vliv řízení byl dobře patrný především pro režim $Re = 30\ 000$ s největší hloubkou rezonanční dutiny $h = 20$ mm. Ve výšce $x = 200$ mm nad tryškou byl zaznamenán pokles průtočné hybnosti o 27 % oproti stejnému režimu bez řízení. Průtočná kinetická energie poklesla dokonce pro stejný režim o 46 % oproti případu bez řízení.

Cíle práce byly splněny. Bylo ověřeno chování proudu v základním případě bez řízení a výsledky byly v přijatelné shodě s dostupnou literaturou. Vliv pasivního řízení na intenzifikaci směšování proudu s okolím byl experimentálně prokázán.

Použitá literatura

1. FERNHOLZ, H. H.: *Management and Control of Turbulent Shear Flows*, ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 73, 1993, (11), str. 287-300
2. HILL, W. G., GREENE, P. R.: *Increased Turbulent Jet Mixing Rates Obtained by Self-Excited Acoustic Oscillations*, Journal of Fluids Engineering, 1977, 520-525
3. HENRYWOOD, R. H., ARGAWAL A.: *The aeroacoustics of a steam kettle*, AIP Physics of fluids, 1994, ISSN 1070-6631
4. SCHLICHTING, H.: *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill, New York, 1979, ISBN 0-07-055334-3
5. BLEVINS, R. D.: *Applied Fluid Dynamics Handbook*, Krieger Publishing Company, Florida 2003, ISBN 1-57524-182-X
6. RAJARATNAM, N.: *Turbulent jets*, Amsterdam, Elsevier scientific publishing company, 1976, ISBN 0-444-41372-3
7. NOŽIČKA, J.: *Mechanika tekutin*, ČVUT, Praha, 2004
8. BROUČKOVÁ, Z.: *Aktivní řízení proudu v koaxiálním uspořádání*, diplomová práce, ČVUT, Praha, 2012
9. NOVÝ, R.: *Hluk a chvění*, ČVUT, Praha, 2000
10. TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*, Štramberk 1997, ISBN 80-901936-1-7
11. HLAVÁČ, V., SEDLÁČEK, M.: *Zpracování signálu a obrazu*, ČVUT, Praha, 2002, ISBN 80-01-02114-9
12. OLSHAUSEN, B. A.: *Aliasing*, [online], Publikováno: říjen 2000, [cit. 2015-06-17], Dostupné z: <http://redwood.berkeley.edu/bruno/npb261/aliasing.pdf>
13. BEJČEK, L., VACULÍK, J.: *Snímače tlaku*, AUTOMA [online], Publikováno: 2011, [cit. 2015-06-18], Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/42719.pdf>
14. JIRSÁK, M.: *Experimentální zařízení a metody v mechanice tekutin*, ČVUT, Praha, 1977
15. DOEBELIN, E. O.: *Measurement Systems (Applications and Design)*, Mc Graw-Hill, Boston, 2003
16. JAROŠ, K.: *Zvuková technika*, SŠRT MICHAEL, Praha, 2011, ISBN 978-80-905074-5-6
17. NOSKIEVIČ, J. a kol.: *Mechanika tekutin*, SNTL, Praha, 1987

18. ŘEZNIČEK, R.: *Visualisace proudění*, ČSAV, Praha, 1972
19. BROUČKOVÁ, Z.: *Řízení proudu vzduchu syntetizovaným proudem*, bakalářská práce, ČVUT, Praha, 2010
20. 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
21. Oficiální stránky THE UNIVERSITY OF NEW SOUTH WALES SYDNEY [online], [cit. 2015-06-12], Dostupné z:
<http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/Helmholtz.html>
22. ČAJKA, L.: *Analýza vnitřní termodynamiky spalovacího motoru*, diplomová práce, VUT, Brno, 2010
23. Oficiální stránky THERMOPEDIA [online], 8.2.2011, [cit. 2015-06-15], Dostupné z: <http://www.thermopedia.com/content/1100/>