

Aktivní řízení proudového pole syntetizovaným proudem v případě příčné obtékaného kruhového válce

Erik Flídr^{1,*}, Zuzana Broučková², Pavel Šafařík², Zdeněk Trávníček³

^{1,2} ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

³ Ústav Termomechaniky AV ČR, v.v.i., Dolejškova 1402, 182 00 Praha 8, Česká republika

Abstrakt

Tato experimentální práce se zaměřuje na aktivní řízení proudového pole při obtékání kruhového válce s využitím syntetizovaných proudů. Vliv aktivního řízení na obtékání válce byl zkoumán pomocí vizualizace prováděné v malém aerodynamickém tunelu. Dále byly vyhodnoceny frekvenční a výkonové charakteristiky generátoru syntetizovaného proudu, na základě měření rychlosti Pitotovou sondou. Rezonanční frekvence generátoru byla také určena teoretickým výpočtem a porovnána s experimentálními výsledky.

Klíčová slova: Obtékání válce, syntetizovaný proud, aktivní řízení proudového pole, vizualizace

1. Úvod

Řízení proudových polí je v současné době velmi studovanou oblastí mechaniky tekutin. Celkový pohled na dané téma podává např. Gad-El-Hak [1]. Řízením proudového pole při otáčení tělesa lze například zvýšit vztakovou, nebo snížit odporovou sílu. Řízení lze rozdělit na pasivní, kdy například úpravou povrchu obtékaného tělesa, nebo změnou geometrie změníme podmínky obtékání, a aktivní, kdy hlavní proud ovlivňujeme aktivním buzením, příkladem může být použití syntetizovaného proudu.

Řízení proudového pole při obtékání válce syntetizovaným proudem spojuje dohromady tři úlohy. První úlohou je samostatné obtékání válce, což představuje rozsáhlé téma, kterým se dopodrobna zabývá např. Zdravkovich [2]. Samostatnou částí je zvládnutí problematiky syntetizovaných proudů a návrh vhodného generátoru pro řízení proudového pole při obtékání. Poslední částí je samotné řízení proudového pole při obtékání, kdy experiment kombinuje předešlé dvě úlohy.

2. Obtékání válce

2.1 Podobnostní kritéria

Pro popis obtékání válce jsou zaváděna dvě podobnostní kritéria. Prvním je Reynoldsovo číslo Re , což je poměr mezi setrvačnými a vazkými silami, viz Noskievič [3]. Zdravkovich [2] ho uvádí ve tvaru:

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

kde U je rychlost nabíhajícího proudu tekutiny, d je průměr válce a ν je kinematická viskozita proudící tekutiny.

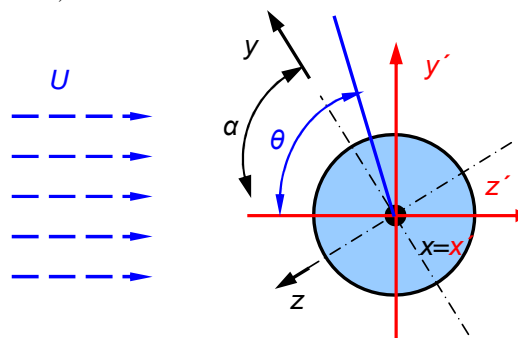
Dále je definováno Strouhalovo číslo St , což je poměr impulsních a setrvačných sil viz Noskievič [3], Zdravkovich [2] ho definuje ve tvaru:

$$St = \frac{fd}{U}, \quad (2)$$

kde f je frekvence úplavu.

2.2 Režimy obtékání

Se zvětšujícím se Reynoldsovým číslem dochází ke změnám v proudovém poli kolem válce. Tyto změny dělí Zdravkovich [2] na pět režimů a ty pak dále člení. V rozsahu $Re = (1 - 200)$ se jedná o laminární obtékání, v rozmezí $Re = (200 - 400)$ přechází úplav do turbulence. S dalším zvyšováním $Re = (400 - 2 \cdot 10^5)$ postupně přechází do turbulence i volné smykové vrstvy. Mezní vrstva přechází do turbulence v rozmezí $Re = (2 \cdot 10^5 - 6 \cdot 10^6)$. Posledním režimem je plně turbulentní obtékání válce. Přechody mezi jednotlivými režimy se výraznou měrou podléhají na změnách aerodynamických vlastností válce. Závislosti $Re - St$ a odporového součinitele na Reynoldsově čísle lze dohledat ve [4]. Tyto změny se rovněž projevují na úhlu odtržení θ , který je měřen od náběžné stagnační linie, viz Obr. 1.

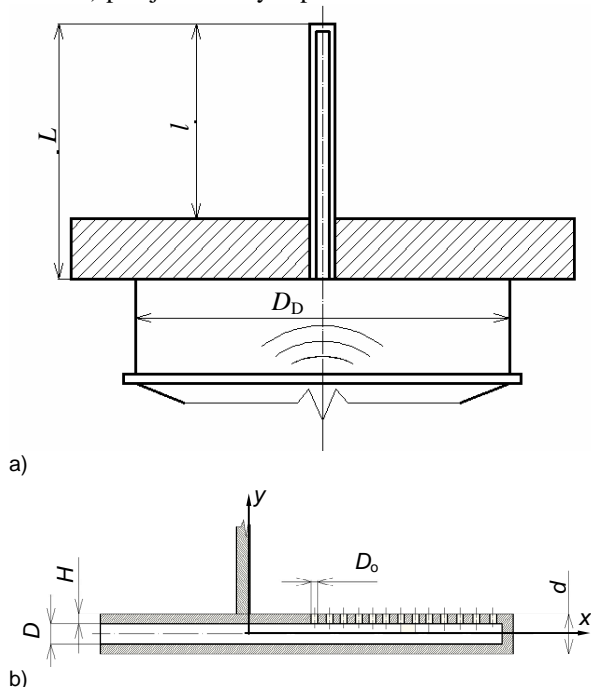


Obr. 1 Souřadné systémy.

* Kontakt na autora: flidr@it.cas.cz

3. Syntetizovaný proud

Syntetizovaný proud (v angličtině "synthetic jet") je proud tekutiny vyvolaný oscilačním pohybem pístu nebo membrány v uzavřené dutině, propojené s okolím vhodným výstupním otvorem (Smith a Glezer [5]). Generátor syntetizovaného proudu je na Obr. 2a). Na Obr. 2b) pak je detail výstupní trubice.



Obr. 2 Generátor syntetizovaného proudu a) schéma, b) detail výstupní trubice.

3.1 Parametry a podobnostní kritéria

Při sinovém budícím signálu lze určit okamžitou rychlost syntetizovaného proudu vztahem:

$$u(t) = u_{\max} \sin(\omega t), \quad (3)$$

kde u_{\max} je maximální rychlost, t je čas a $\omega = 2\pi f_{sj}$ je úhlová rychlost.

Střední rychlost U_0 pak lze získat integrací rovnice (3):

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{u_{\max}}{\pi}. \quad (4)$$

Na základě takto získané střední rychlosti potom Smith a Glezer [5] definují Reynoldsovo číslo ve tvaru:

$$Re_{U_0} = \frac{U_0 D_o}{\nu}, \quad (5)$$

kde D_o je průměr výstupního otvoru.

Strouhalovo číslo je definováno ve tvaru:

$$St_{U_0} = \frac{f_{sj} D_o}{U_0}. \quad (6)$$

3.2 Rezonanční chování

Pro daný generátor byla odvozena teoretická rezonanční frekvence. Odvození je založeno rovnicí kontinuity a na transformaci potenciální energie membrány v kinetickou energii proudu. Rezonanční frekvence je pak dána vztahem:

$$f_{\text{teor}} = \frac{7}{\pi} \left[\frac{D_o^2}{D_D} \right] \sqrt{\frac{K_p}{\rho(D^2 L + 14 D_o^2 L_e)}}, \quad (7)$$

kde D je vnitřní průměr trubky, D_D je průměr membrány, L je délka trubky, ρ je hustota tekutiny, K_p je tuhost membrány a L_e je efektivní délka výstupního otvoru daná vztahem:

$$L_e = H + \frac{8}{3\pi} D_o, \quad (8)$$

kde H je tloušťka stěny trubky.

3.3 Průtočná hybnost proudu

Při určení průtočné hybnosti proudu se předpokládá, že výsledná hybnost proudu je ovlivněna pouze vyfukovací částí periody. Při sinovém signálu bude horní mez pro integraci $T/2$. Dosazením za časový průběh rychlosti z rovnice (3) dostaneme:

$$M_{sj} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \rho A u^2(t) dt, \quad (9)$$

kde A je plocha výstupního otvoru.

Po integraci a úpravě dostaneme vztah:

$$M_{sj} = \rho \left[\frac{U_0 \pi}{2} \right]^2 \frac{\pi D_o^2}{4}. \quad (10)$$

4. Řízení obtékání syntetizovaným proudem

Stručný přehled využití syntetizovaného proudu k řízení obtékání těles podává např. Zhang a kol. [6]. Ději, ke kterým dochází při vpravování syntetizovaného proudu do proudu hlavního, se zabývali Zhong a kol. [7], Chaudhry a Zhong [8] a Schaeffler [9].

Jednou z prvních prací na toto téma byl článek Amitaye a kol. [10]. Zabývali se dopadem řízení na odporový a vzlakový součinitel. Wang a kol. [11] ukázali, že umístění syntetizovaného proudu do předního stagnačního bodu ($\alpha = 0^\circ$, viz Obr. 1) má při malém Reynoldsově čísle za následek tvorbu uzavřené oblasti během vyfukovací části periody. Tato oblast se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem zvětšuje až nakonec dojde k vytvoření otevřené oblasti, která obklopuje celý válec. Feng a Wang [12] a Feng a kol. [13] pak zkoumali vliv změny budícího signálu na řízení, tak že měnili poměr nasávací a vyfukovací části periody, a touto změnou byli schopni měnit součinitel

hybnosti C_μ (viz odstavec 4.1) beze změny frekvence, nebo výkonu generátoru. Wang a Feng [14] ukázali, že vlivem řízení dochází k šesti režimům odplouvání vírů v závislosti na C_μ a budící frekvenci.

4.1 Parametry řízení

Pro popis úlohy řízení je vhodné zavést poměry rychlostí, frekvencí a průtočných hybností. Poměr rychlostí lze zavést ve tvaru:

$$C_u = \frac{U_0}{U}. \quad (11)$$

Poměr frekvencí je pak:

$$C_f = \frac{f_{sj}}{f}. \quad (12)$$

Bezrozměrný koeficient hybnosti Glezer a kol. [10] uvádí ve tvaru:

$$C_\mu = \frac{M_{sj}}{M}, \quad (13)$$

kde M je hybnost nabíhajícího proudu tekutiny určená pro plochu dl , tj. plochu průmětu válce do roviny kolmé k vektoru nabíhajícího proudění.

5. Experimentální zařízení, přístroje a metody

5.1 Generátor syntetizovaného proudu

Generátor je tvořen reproduktorem a válcovou dutinou, viz Obr. 2a). Propojení s okolím je realizováno válcovou trubicí o vnitřním průměru $D = 3$ mm, vnějším průměru $d = 4$ mm, délkou $L = 54$ mm, z toho část o délce $l = 29$ mm zasahuje do měřicího prostoru a tloušťkou stěny $H = 0,5$ mm, v jejíž stěně je vyvrtáno $n = 14$ otvorů o průměru $D_o = 1,05$ mm s roztečí 2 mm. Byl použit reproduktor Monacor SP-7/4S s membránou o průměru $D_D = 53$ mm, jejíž tuhost je $K_p = 4,8 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$. Uzavřená dutina má výšku 10 mm. Reprodukční byl napájen sinovým signálem z generátoru funkcí FG7002C vedeným přes zesilovač BW-1120B.

5.2 Malý aerodynamický tunel - vizualizace

Vizualizace byla prováděna v malém aerodynamickém tunelu otevřeného typu, Rezníček [15], který je na Obr. 3. Jako vizualizační médium zde byla použita vodní mlha vytvářena ultrazvukovým generátorem Mini Nebler (14) umístěným ve sklenici s deionizovanou vodou (13). Mlha byla tlakovým vzduchem přiváděna do měřicího prostoru (4) o rozměrech $(460 \times 350 \times 29)$ mm = (délka \times výška \times

šířka). Proudění bylo vyvoláno ventilátorem (6), který byl poháněn elektromotorem (7). Předřazením odporu lze snížit otáčky motoru z $n_1 = 25,0 \text{ s}^{-1}$ (čemuž odpovídá rychlost proudění $U = 0,77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) na $n_2 = 22,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (čemuž odpovídá $U = 0,70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Experimenty byly prováděny při $U = 0,77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Podrobný popis tunelu lze dohledat ve zprávě [16].

Osvětlení tunelu zajišťuje 10 kusů bílých diod umístěných na jednom chladiči. Osvětlení může pracovat ve dvou režimech, kontinuálním a stroboskopickém, mezi kterými lze libovolně přepínat. Podrobný popis je opět uveden v [16].

Při vizualizaci byl použit digitální fotoaparát Canon PowerShot G7, který byl ovládán pomocí PC. V této práci byla délka expozice nastavena na 1 s.

5.3 Měření stavových veličin

Teplota v laboratoři byla měřena teploměrem Labortherm – N s rozlišením $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Barometrický tlak byl měřen staničním barometrem Fischer se stupnicí s rozlišením 1 hPa.

Při měření tlaku Pitotovou sondou byl použit tlakový převodník GMSD 2,5MR s rozsahem $0 - 250$ Pa, přesností $\pm 0,2$ % FS (hystereze a linearita), ± 1 % FS (vliv teploty) a s rozlišením 0,1 Pa. Z tlakového převodníku byl signál veden na elektronický manometr GMH 3156 s přesností $\pm 0,1$ % FS ± 1 digit.

5.4 Měření rychlosti Pitotovou sondou

Pitotova sonda je trubice, jejíž otevřený konec je otočen proti proudící tekutině. Na druhé straně je uzavřena manometrem. Pitotova sonda měří celkový tlak, pokud je znám tlak statický, lze z Bernoulliho rovnice určit rychlost proudění [3]:

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (14)$$

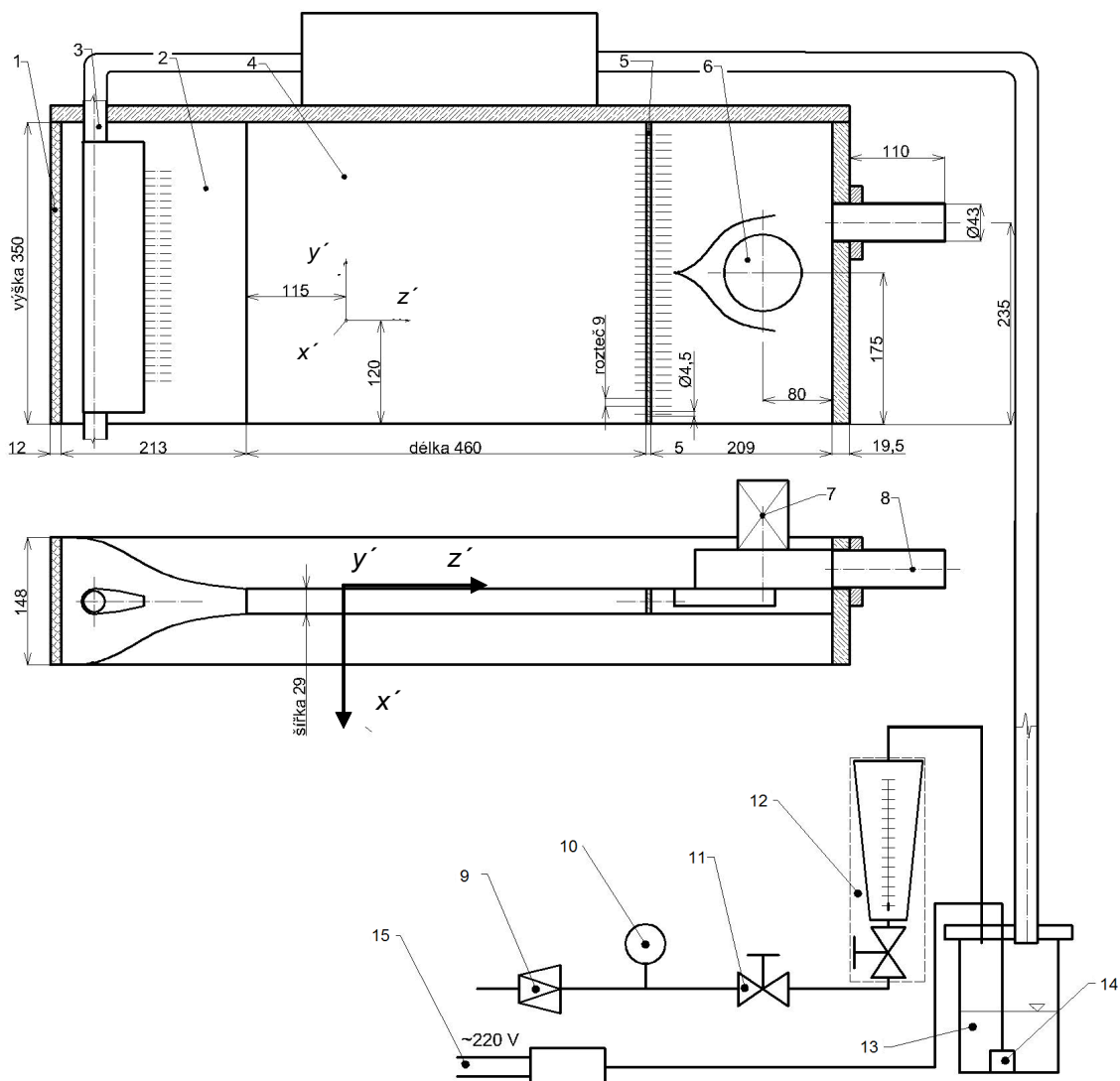
kde $\Delta p = p_c - p_s$ (rozdíl celkového a statického tlaku) je tlak kinetický.

Hustota byla určena ze stavové rovnice ideálního plynu:

$$\rho = \frac{p_b}{rT^*}, \quad (15)$$

kde p_b je barometrický tlak, r je měrná plynová konstanta ($r = 288 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, kde je zohledněna vlhkost vzduchu v laboratoři za běžných podmínek) a T^* je termodynamická teplota.

Pitotova sonda použita v této práci byla kolmo zabroušená trubka o vnějším průměru 2 mm a světlosti 1,5 mm. Tato sonda byla připojena na tlakový převodník silikonovou hadičkou.



Obr. 3 Vizualizační tunel: 1 – laminarizační síta, 2 – tryska, 3 – letecký profil, 4 – měřicí prostor, 5 – přepážka, 6 – ventilátor, 7 – elektromotor, 8 – výstupní trubice, 9 – redukční ventil, 10 – manometr, 11 – regulační ventil, 12 – manometr, 13 – sklenice s vodou, 14 – ultrazvukový generátor vodní mlhy Mini Nebler, 15 – napájení střídavým elektrickým proudem.

6. Výsledky provedených experimentů

6.1 Frekvenční a výkonové charakteristiky

Frekvenční charakteristiky

Pitotova sonda byla umístěna ve vzdálenosti $y/D_0 = 6$. Krok traverzace podél vodorovné osy x pak byl 2 mm s prvním měřením v bodě $x = 14$ mm a $z = 0$ mm. Frekvenční charakteristiky byly vyhodnoceny pro rozsah frekvencí $f = 30 - 150$ Hz. Při vyhodnocení frekvenční charakteristik byl nastaven konstantní výkon generátoru na hodnotu $P = 2$ W, kdy výkon je dán vztahem:

$$P = EI, \quad (16)$$

kde E je napětí a I je proud.

Obr. 4 ukazuje frekvenční charakteristiky měřené ve 14 bodech podél osy x . Z výsledků je vidět, že ve všech případech byla rezonanční frekvence téměř stejná a byla zhruba 45 Hz. Šipka v grafu vyznačuje

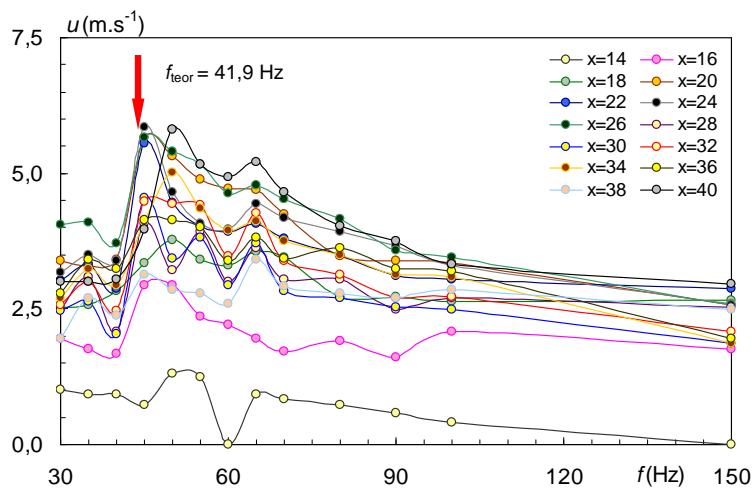
teoretickou rezonanční frekvenci získanou vztahem (7), jejíž hodnota je $f_{\text{teor}} = 41,9$ Hz.

Výkonové charakteristiky

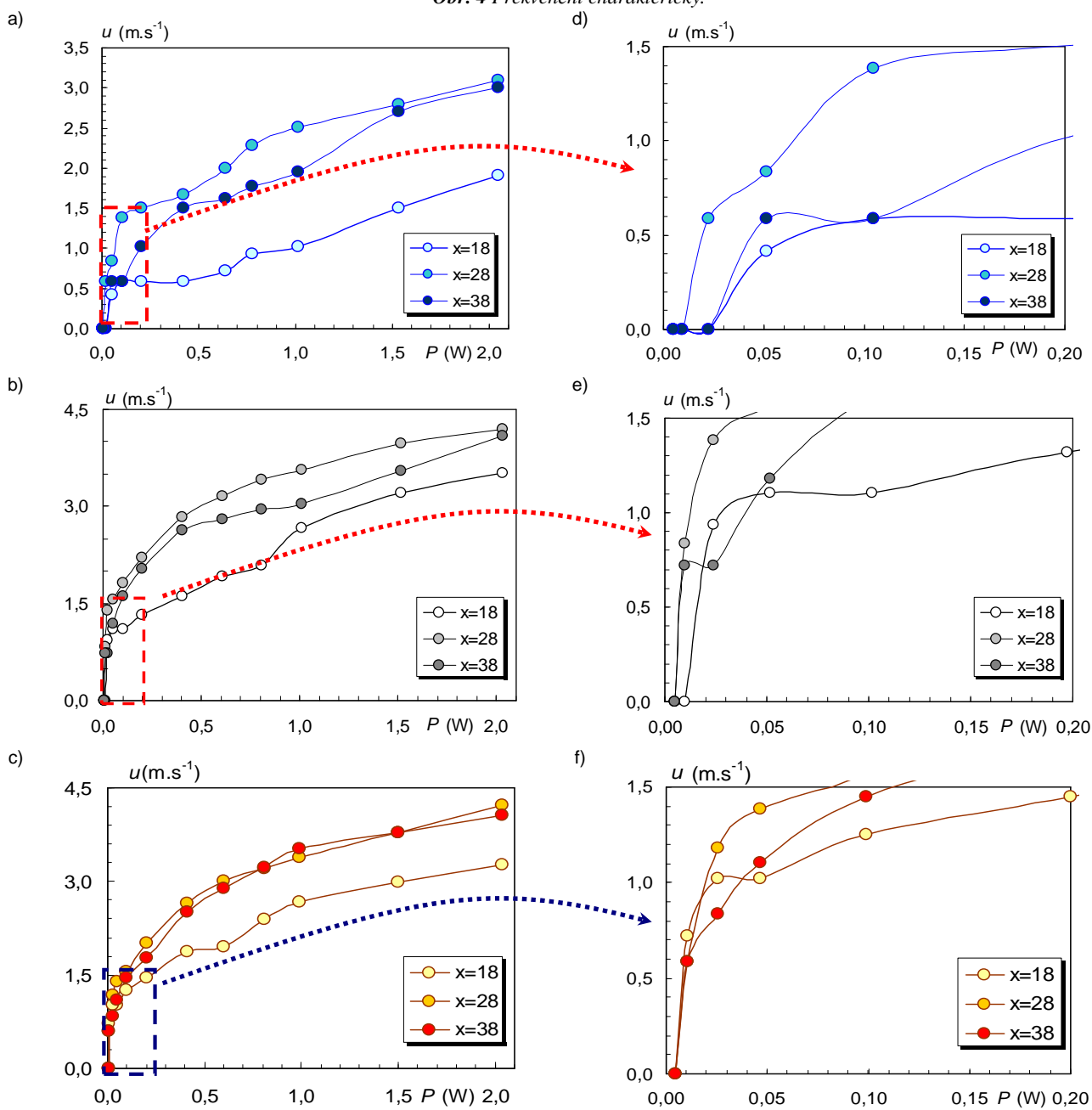
Při změně frekvence syntetizovaného proudu dochází ke změně jeho rychlosti, a tím i ke změně součinitele hybnosti C_{μ} . Tuto změnu lze vykompenzovat změnou výkonu generátoru.

Výkonové charakteristiky byly měřeny pro tři frekvence generátoru, a to pro $f = 30, 45$ a 60 Hz. Pitotova sonda byla opět umístěna ve vzdálenosti $y/D_0 = 6$. Charakteristiky byly měřeny ve třech bodech $x = 18, 28$ a 38 mm a $z = 0$ mm. Na Obr. 5a – c) jsou výkonové charakteristiky pro $f = 30, 45$ respektive 60 Hz.

Z charakteristik je patrné, že s nižším výkonem dochází k poklesu rychlosti. Obr. 5d – f), ukazují detaily nízkých hodnot výkonu. Je vidět, že při malém výkonu již není generován syntetizovaný proud, což je ve shodě s výsledky Trávníčka a kol [17].



Obr. 4 Frekvenční charakteristiky.



Obr. 5 Výkonové charakteristiky a) $f = 30$ Hz, b) $f = 45$ Hz, c) $f = 60$ Hz, d) detail pro $f = 30$ Hz, e) detail pro $f = 45$ Hz, f) detail pro $f = 60$ Hz.

6.2 Vizualizace řízení

Nejprve byla provedena vizualizace obtékání válce při kontinuálním osvětlení. Následně byla vyfotografována vírová řada za válcem při stroboskopickém osvětlení. V obou těchto případech byl syntetizovaný proud vypnut. Následovala vizualizace řízení obtékání při poměrech frekvencí $C_f = 1,00$; 1,52 a 1,99, a různých úlech α . Hodnota bezrozměrného součinitele hybnosti je určena vztahem:

$$C_\mu = \frac{nM_{sj}}{M} = \frac{14\rho \frac{\pi D_o^2}{4} \left(\frac{\pi U_0}{2}\right)^2}{\rho d l U^2} = \frac{7\pi^3 D_o^2 U_0^2}{8 d l U^2}. \quad (17)$$

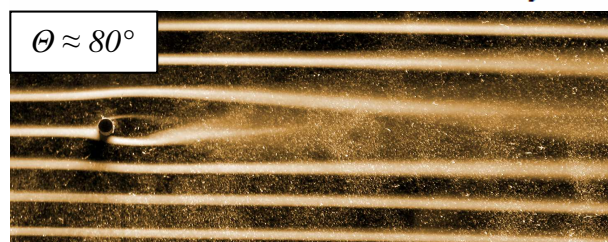
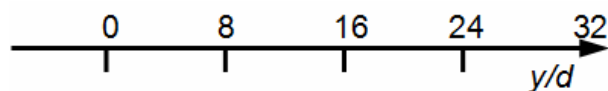
Ve všech případech byla $C_\mu = 0,21$. Poměr rychlostí byl určen z rovnice (11), přičemž rychlost $U_0 = 0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ byla stanovena jako průměr z naměřených rychlostí u . Během všech experimentů byla rychlost proudění v tunelu $U = 0,77 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tomu odpovídá $C_u = 0,91$ a Reynoldsovo číslo válce $Re = 192,5$. Přirozená frekvence vírové řady za válcem činila $f = 27,12 \text{ Hz}$ a té odpovídá $St = 0,14$. Parametry provedených vizualizačních experimentů shrnuje Tabulka 1.

Tabulka 1: Přehled provedených experimentů

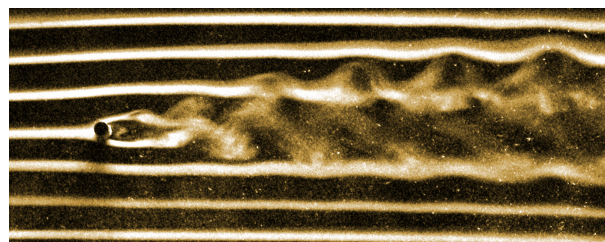
α (°)	P (W)	f_{sj} (Hz)	St_{U_0} (1)	C_f (1)
0	0,08	27,24	0,041	1,00
75				
120				
180				
0	0,015	41,22	0,062	1,52
75				
120				
180				
0	0,015	53,97	0,081	1,99
75				
120				
180				

Působení tíhové síly na kapičky mlhy se projevilo mírným poklesem kapek mlhy během jejich průchodu měřicí oblastí. Z tohoto důvodu jsou všechny fotografie pootočený o úhel $1,5^\circ$.

Na Obr. 6a) je vizualizace při kontinuálním osvětlení, úhel odtržení proudu je zhruba 80° . Na Obr. 6b) pak je vizualizace Kármánovy vírové řady za válcem při stroboskopickém osvětlení s frekvencí 27,12 Hz.

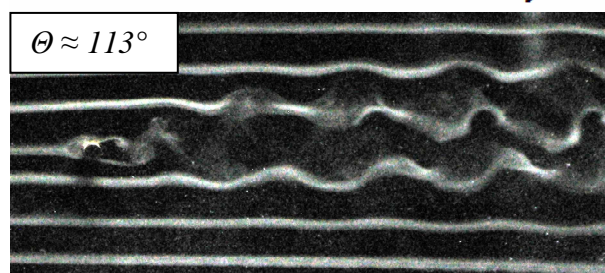
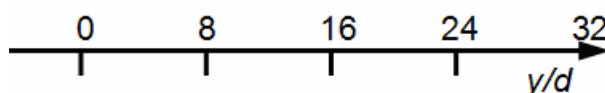


a)

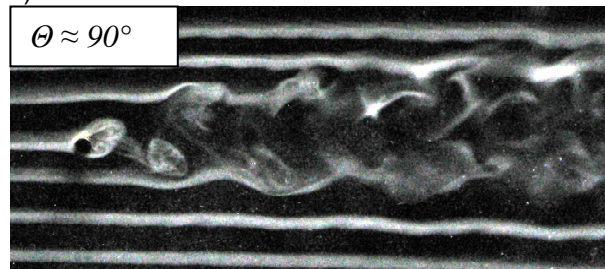


b)

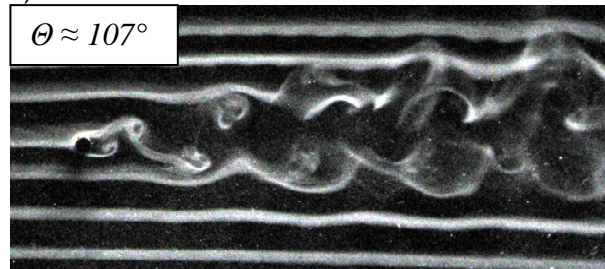
Obr. 6 Vizualizace obtékání válce a) kontinuální osvětlení, b) stroboskopické osvětlení



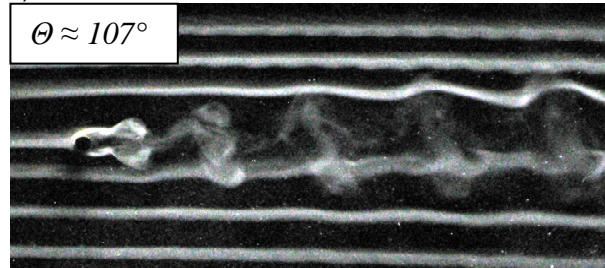
a)



b)



c)

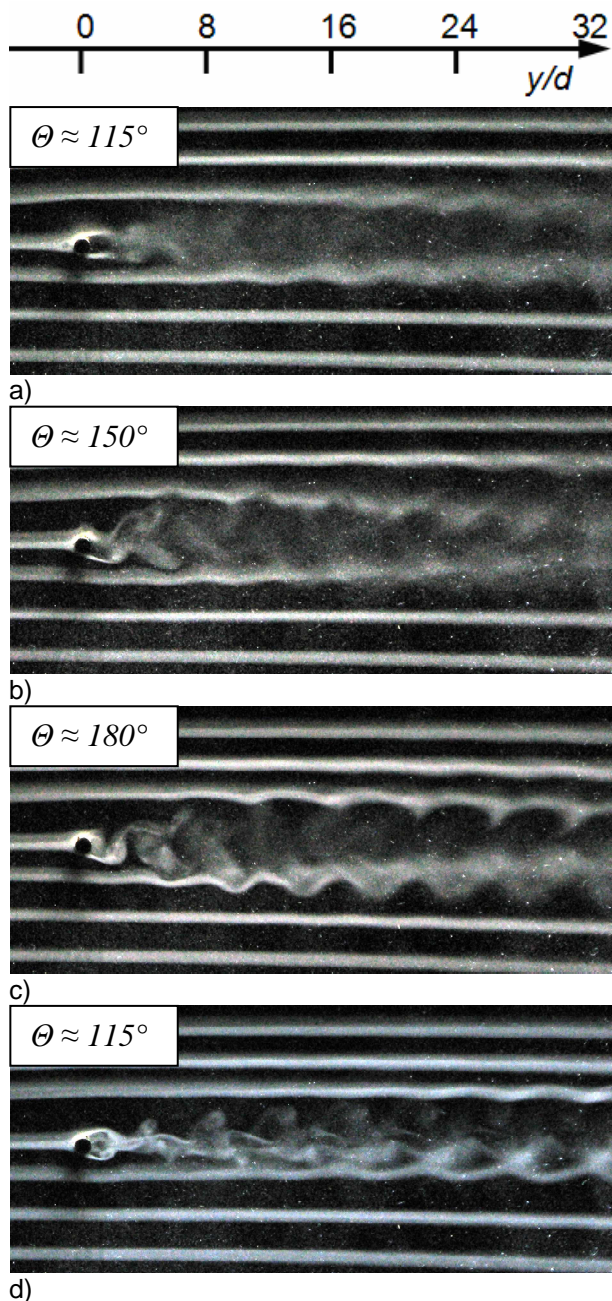


d)

Obr. 7 Vizualizace řízení při $C_f = 1,00$ a) $\alpha = 0^\circ$, b) $\alpha = 75^\circ$, c) $\alpha = 120^\circ$, d) $\alpha = 180^\circ$.

Obr. 7a – d) ukazuje řízení při $C_f = 1,00$. Ve shodě s výsledky Wang a kol [11] je na Obr. 7a) vidět malá uzavřená oblast na náběžné straně. Díky tomu dochází k posunu bodu odtržení po povrchu válce, které má za následek zmenšení úplavu. Dále je z Obr. 7a – c) vidět,

že oproti případu bez řízení dochází ke zkrácení oblasti, ve které dochází k tvorbě vírů. V případě, kdy je syntetizovaný proud umístěn v zadním stagnačním bodě ($\alpha = 180^\circ$), je patrné zmenšení šířky úplavu a celé obtékání je symetrické, kdy vlivem řízení dochází k odplouvání vírů po obou stranách válce zároveň.

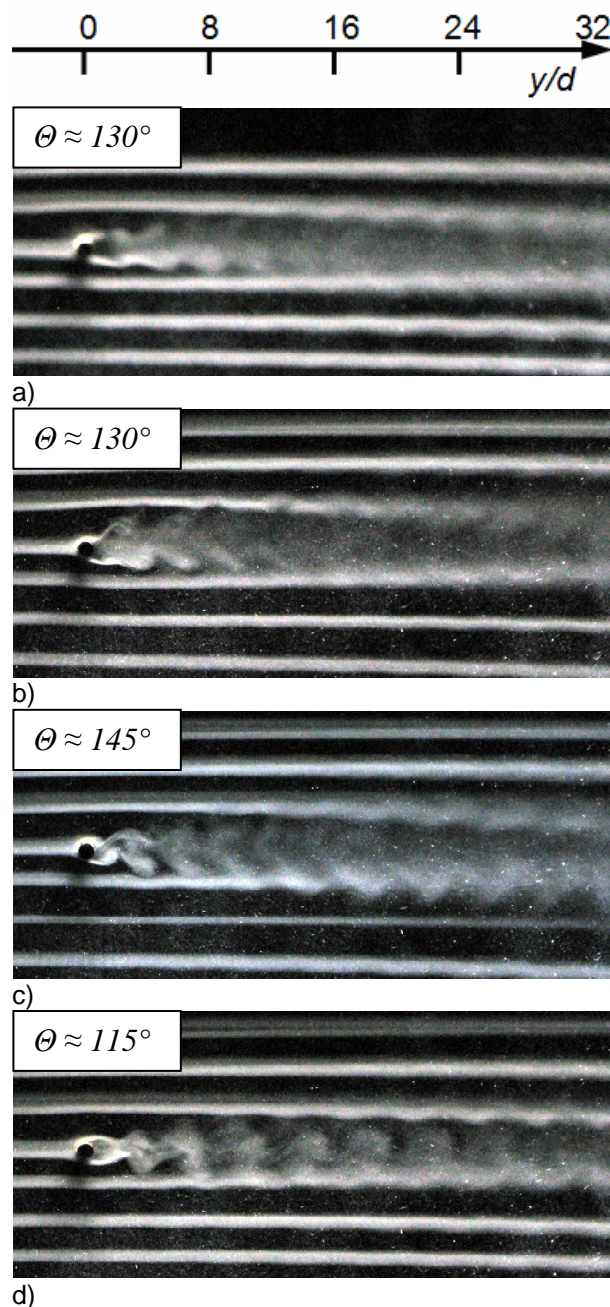


Obr. 8 Vizualizace řízení při $C_f = 1,52$ a) $\alpha = 0^\circ$, b) $\alpha = 75^\circ$, c) $\alpha = 120^\circ$, d) $\alpha = 180^\circ$.

Obr. 8a – d) ukazuje vizualizaci při $C_f = 1,52$. Z Obr. 8 je patrný vliv větší frekvence řídicího proudu, než je přirozená frekvence vírové řady. Dochází k výraznému zjemnění struktury a zmenšení šířky úplavu. Navíc je patrný posun bodu odtržení. V případě Obr. 8a) a d) je obtékání navíc symetrické. V případě umístění syntetizovaného proudu pod úhlem $\alpha = 75^\circ$ (Obr. 8b)) je patrný velký posun bodu odtržení na vrchní straně válce, zatímco na spodní straně válce se proud odtrhává zhruba pod stejným úhlem jako

v případě bez řízení. V případě $\alpha = 120^\circ$ (Obr. 8c)) nedochází na horní straně válce k odtržení vůbec, kdežto na spodní straně dochází k posunutí bodu odtržení.

Se zvýšením poměru frekvencí na $C_f = 1,99$ je vidět další zjemnění vírových struktur za válcem a s tím související zmenšení šířky úplavu. Opět je ve všech případech vidět jasný posun bodu odtržení oproti případu bez řízení. Tentokrát však není tolik patrná uzavřená oblast na přední straně válce při úhlu $\alpha = 0^\circ$, viz Obr. 9a).



Obr. 9 Vizualizace řízení při $C_f = 1,99$ a) $\alpha = 0^\circ$, b) $\alpha = 75^\circ$, c) $\alpha = 120^\circ$, d) $\alpha = 180^\circ$.

Provedené experimenty ukázaly významný vliv použitého aktivního řízení na periodický úplav za válcem. Byly zjištěny tyto čtyři hlavní vlivy řízení:

- Zvýšení frekvence syntetizovaného proudu má za následek zjemnění struktury úplavu.
- Bylo dosaženo výrazného posunutí bodu odtržení až na hodnoty $\theta \approx 130 - 150^\circ$.
- Řízením vždy došlo ke zmenšení šířky úplavu.
- Při umístění řídicího proudu do předního nebo zadního stagnačního bodu ($\alpha = 0^\circ$ nebo 180°) dochází k tvorbě symetrického úplavu, kdy víry po obou stranách válce odplouvají současně, viz Obr. 7d), 8a,d), 9a,d).

7. Závěr

V rámci této práce byly proměřeny frekvenční a výkonové charakteristiky generátoru syntetizovaného proudu použitého pro řízení proudového pole kolem válce. Vyhodnocení bylo založeno na měření rychlosti proudění pomocí Pitotovy sondy.

Rezonanční frekvence generátoru určená měřením měla hodnotu 45 Hz, což je ve velmi dobré shodě s teoretickým výpočtem, který udává hodnotu 41,9 Hz. Naměřené výkonové charakteristiky ukazují na fakt, že přestože s nízkým výkonem membrána reproduktoru stále kmitá, nedochází již k tvorbě syntetizovaného proudu, což je ve shodě s literaturou.

V případě řízení obtékání válce byla provedena vizualizace proudového pole kolem válce. Z Obr. 7 – 9 je patrný vliv řízení, kdy se zvyšující se frekvencí generátoru dochází ke zjemňování struktur tvořících se za válcem a zároveň ke zmenšení šířky úplavu. Ve všech případech došlo k posunutí bodu odtržení.

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 „Pokročilá technologie pro výrobu tepla a elektřiny“, kód projektu TE01020036.

Seznam symbolů

C_f	Poměr frekvencí	(1)
C_u	Poměr rychlostí	(1)
C_μ	Hybnostní součinitel	(1)
d	Vnější průměr válce	(m)
D	Vnitřní průměr válce	(m)
D_o	Průměr výstupního otvoru	(m)
D_D	Průměr membrány	(m)
E	Napětí	(V)
f	Frekvence vírové řady	(Hz)
f_{teor}	Teoretická rezonanční frekvence	(Hz)
f_{sj}	Frekvence syntetizovaného proudu	(Hz)
H	Tloušťka stěny trubky	(m)
K_p	Tuhost membrány	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
I	Proud	(A)
l	Délka trubky zasahující do měřicí oblasti	(m)
L_e	Efektivní délka výstupního otvoru	(m)
M	Průtočná hybnost nabíhajícího proudu tekutiny	($\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
M_{sj}	Průtočná hybnost syntetizovaného proudu	($\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
p_b	Barometrický tlak	(Pa)

p_c	Celkový tlak	(Pa)
p_s	Statický tlak	(Pa)
r	Měrná plynová konstanta	($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
T	Perioda	(s)
T^*	Termodynamická teplota	(K)
u	Měřená rychlost	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
u_{max}	Maximální rychlost syntetizovaného proudu	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
U	Rychlost proudění v tunelu	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
U_0	Časově střední rychlost	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
x, y, z	Kartézské souřadnice	(m)
α	Úhel mezi hlavním a řídicím proudem	($^\circ$)
ρ	Hustota vzduchu	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ν	Kinematická viskozita	($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
θ	Úhel odtržení proudu	($^\circ$)
Re	Reynoldsovo číslo dle (1)	(1)
St	Strouhalovo číslo dle (2)	(1)
Re_{U_0}	Reynoldsovo číslo dle (5)	(1)
St_{U_0}	Strouhalovo číslo dle (6)	(1)

Literatura

- [1] M. Gad-El-Hak, Flow Control, Cambridge, University Press, New York 2000.
- [2] M. M. Zdravkovich, Flow around a Circular Cylinders, Oxford University Press, 1997.
- [3] J. Noskievič, a kol., Mechanika tekutin, Praha: SNTL 1987.
- [4] Springer, Handbook of Experimental Fluid Mechanics, Eds. C. Tropea, A.L. Yarin, J.F. Foss. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2007.
- [5] B.L. Smith, A. Glezer, The Formation and Evolution of Synthetic Jets, Physics of Fluids, vol. 10, pp. 2281 – 2297, 1998.
- [6] P-F. Zhang, J-J. Wang, L-H. Feng, Review of Zero-Net-Mass-Flux Jet and its Application in Separation Flow Control, Science in China Series E - Technological Sciences, vol. 51, pp. 1315 – 1344, 2008.
- [7] S. Zhong, M. Jabbar, H. Tang, L. Garcillan, F. Guo, N. Wood, C. Warsop, Towards the Design of Synthetic-jet Actuator for Full-scale Flight Conditions, Part 1: The Fluid Mechanics of Synthetic-jet Actuator, Flow Turbulence Combust, vol. 78, pp. 283 – 307, 2007.
- [8] I. A. Chaudhry, S. Zhong, A Single Circular Synthetic Jet Issued into Turbulent Boundary Layer, Journal of Visualization, vol. 17, pp. 101 – 111, 2014.
- [9] N. Schaeffler, The Interaction of a Synthetic Jet and Turbulent Boundary Layer, AIAA Paper 2003-643, 2003.
- [10] M. Amitay, A. Honohan, M. Trautman, A. Glezer, Modification of the Aerodynamic Characteristics of Bluff Bodies Using Fluidic Actuators, AIAA Paper 97-2004, 1997.
- [11] J-J. Wang, L-H. Feng, Ch-J. Xu, Experimental Investigations on Separation Control and Flow Structure around a Circular Cylinder with

- Synthetic Jet, E - Technological Sciences, vol. 50, pp. 550 –559, 2007.
- [12] L-H. Feng, J-J. Wang, Ch. Pan, Effect of Novel Synthetic Jet on Wake Vortex Shedding Mode of a Circular Cylinder, *Journal of Fluid and Structures*, vol. 26, pp. 900 – 917, 2010.
- [13] L-H. Feng, J-J. Wang, Synthetic Jet Control of Separation in the Flow over a Circular Cylinder, *Experiments in Fluids*, vol. 53, pp. 467 – 480, 2012.
- [14] L-H. Feng, J-J. Wang, Modification of a Circular Cylinder Wake with Synthetic Jet: Vortex Shedding Modes and Mechanism, *European Journal of Mechanics B/ Fluids*, vol. 43, pp. 14 – 32, 2014.
- [15] R. Řezníček, *Visualizace proudění*, Praha: ACADEMIA 1972.
- [16] E. Flídr, Z. Broučková, M. Pavelka, Z. Trávníček, *Malý aerodynamický tunel pro vizualizaci proudového pole*, Výzkumná zpráva ÚT AV ČR Z1520/15, Praha 2015.
- [17] Z. Trávníček, Z. Broučková, J. Kordík, Formation Criterion for Axisymmetric Synthetic Jets at High Stokes Numbers, *AIAA Journal*, vol. 50, pp. 2012 – 2017, 2012.