

PROUDĚNÍ V KAVITĚ VYVOLANÉ SMYKOVÝM TOKEM PŘI VELKÝCH REYNOLDSOVÝCH ČÍSLECH

Shear-driven cavity flow at high Reynolds numbers

Zdeněk Chára, Bohuš Kysela, Bohumír Hoření
Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v. v. i., Praha 6

Abstrakt

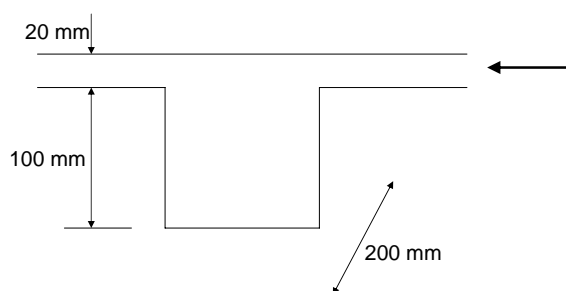
V příspěvku jsou prezentovány výsledky měření rychlostních polí v kavitě čtvercového průřezu, kdy je proudění vyvolané smykovým tokem. Hodnoty Reynoldsových čísel jsou v rozsahu 12000-100000. Pro měření byla použita metodika PIV s kontinuálním zdrojem světla. Získané výsledky byly ve vybraných profilech porovnány s měřeními pomocí LDA. Současně byly pro stejné rozsahy Reynoldsových čísel prováděny numerické simulace proudění pomocí standardního turbulentního modelu $k-\omega$, SST.

Úvod

Proudění v kavitě čtvercového průřezu je často používanou geometrií pro testování přesnosti řešení Navier-Stokesových rovnic. Nejčastěji se používá 2D geometrie s pohybující se horní stěnou. Tato geometrie byla numericky řešena řadou autorů na sítích o velikosti až 2048x2048 [1]. Takto rozměrné sítě kladnou značné nároky na výpočetní prostředky. K dosažení srovnatelných výsledků je možno použít metodu vyšších řádů, která dává přijatelné výsledky i na sítích o velikosti 20x20 prvků. Tento přístup je v současné době řešen na našem pracovišti a získané výsledky byly prezentovány např. v [2]. Pro verifikaci získaných výsledků byla použita publikovaná data pro 2D „lid driven cavity“. Numerické 3D řešení se v současné době připravuje a vzhledem k nedostatku publikovaných dat pro 3D úlohu byl realizován experiment, kde proudění v kavitě bylo vyvolané smykovým tokem – „flow driven cavity“. Dílčí výsledky jsou shrnuty v tomto příspěvku, kde je prezentováno srovnání dvou experimentálních technik PIV a LDA a současně je uvedeno i řešení pomocí standardního $k-\omega$, SST modelu.

Experimentální zařízení

Experimenty byly realizovány na hydraulickém uzavřeném kanálu a rozměrech 2 x 20 cm. Délka kanálu byla 2 m. Voda byla oběhovým čerpadlem dopravována do zásobní nádrže, kde byla pomocí stavitelného přepadu udržována konstantní hladina. Ve vzdálenosti 1,5 m od vtoku byla přes celou šířku dna umístěna kavita o rozměrech 10 x 10 cm. Schématický řez kavitou je ukázán na obr. 1. Celý model byl zhotoven z plexiskla. Pro vlastní měření byly použity dvě optické metody. Jednak byl použit dvousložkový systém LDA, s jehož pomocí je možné proměřit strukturu turbulentního proudu v jednotlivých bodech. Vzhledem k použité ohniskové vzdálenosti výstupní čočky nebylo možné měřit obě složky rychlosti v oblastech blízko stěn kavity. Výstupní signál z fotonásobiče byl zpracován pomocí dvou BSA procesorů, které vyhodnocují dopplerovský posun s použitím FFT.



Obr. 1 Schématický řez kavitou

Vedle LDA byl také použit zjednodušený systém PIV. Vzhledem k tomu, že v současné době je k dispozici pouze rychlá kamera Redlake MotionPro X III, bylo nutné nahradit pulzní laserový zdroj zdrojem kontinuálního bílého světla. Byl použit světelný zdroj LEICA KL2500 (výkon 250W) s optickým kabelem se štěrbinou vybavenou válcovou čočkou, která umožňuje fokusovat výstupní paprsek (minimální šířka paprsku je cca 3 mm). Pro vyhodnocení PIV snímků byl použit program GPIV – GNU General Public License (GPL) s využitím implementovaných algoritmů (Gauss - pixel interpolace, Validita- normalizovaný medián), [3]. Velikost vyhodnocovaných oblastí byla nastavena na 32 x 32 s překrytím 50%. V oblasti u stěny byla testována i velikost 16 x 16 s překrytím 50%. V tabulce 1 jsou shrnuty základní parametry použitého systému PIV. Pro získání delší časové řady (měření č. 6-8 v Tab. 1) byla kamera synchronizována pomocí externího generátoru WAVETEK DDS Function Generator 29A s nastavitelnou dobou expozice a dobou mezi dvěma dvojicemi snímků.

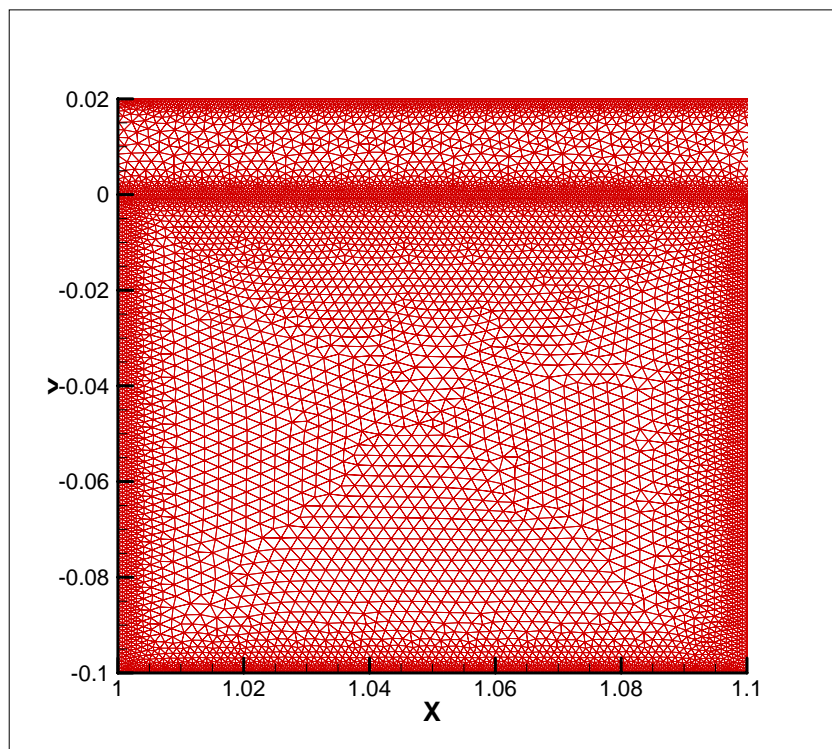
Měření se uskutečnila pro rozsah Reynoldsových čísel $Re=12500-107500$. Hodnota Reynoldsova čísla byla určována na základě střední rychlosti v kanále a výšky kavity ($L=0,1m$).

Tab.1 Základní parametry PIV systému

měření	průtok [l/sec]	Re	rozlišení [pix/mm]	interval mezi snímky [ms]	prodleva [ms]
1	0.5	12500	9	3,33	-
2	0.5	12500	9,5	3,33	-
3	1.2	30000	9,5	3,33	-
4	1.2	30000	9,5	2	-
5	1.75	43700	9,5	2	-
6	0.5	12500	11,6	4	200
7	0.5	12500	11,6	4	400
8	1.75	43700	11,6	2,5	25

Numerické simulace byly prováděny v prostředí Fluent 6.3, kde bylo simulováno 2D proudění v kanále a kavitě. Délka vstupního úseku byla zvolena 1 m. Byla použita

nestrukturovaná síť, která byla zahuštěna v okolí stěn a na rozhraní kanálu a kavity, viz. obr. 2. Pro vlastní výpočet byl použit turbulentní model $k-\omega$, SST v nestacionárním režimu. Výpočty probíhaly na počítači IBM se 4 procesory Power 5 a 32 GB RAM.



Obr. 2 Část výpočetní sítě pro model $k-\omega$, SST (bez vtokové a výtokové části)

Přehled dosažených výsledků

Na obr. 3 jsou ukázány měřené profily podélné složky rychlosti normalizované střední nátokovou rychlostí. Vzhledem k nízkým hodnotám rychlosti sběru data (data rate) v oblasti nízkých rychlostí a tím značnému nárůstu doby měření při měřeních pomocí LDA, byly rychlostní profily proměřeny po celé výšce kavity pouze pro vysoké hodnoty Reynoldsových čísel, pro nižší hodnoty Re byla měření realizována pouze ve smykové oblasti hlavního toku. Na druhé straně metoda PIV umožňuje měřit v širokém rozsahu rychlostí, ale z důvodů použití kontinuálního světla s omezeným světelným výkonem byla PIV měření omezena do hodnoty $Re=43700$. Počátek souřadného systému je na přilehlé (s ohledem na přitékající proud) horní hraně kavity. Na obr. 3 jsou vyneseny rychlostní profily ve třech vzdálenostech od nátoky ($x=0,015$; $0,05$ a $0,75$ m). V ose kavity ($x=0,05$ m) byly metodou LDA měřeny profily i pro nižší hodnoty Re , v ostatních polohách byly profily měřeny pouze pro hodnotu $Re=107000$. Z bezrozměrných profilů podélné složky rychlosti měřených pomocí LDA se ukazuje, že jsou prakticky nezávislé na daných hodnotách Reynoldsových čísel. Z obr. 3 je patrná poměrně dobrá shoda mezi oběma optickými metodami, a to především ve smykové oblasti.

Na obr. 4 jsou vykresleny bezrozměrné profily svislé složky rychlosti. I zde nebyl pozorován výrazný vliv Reynoldsových čísel na průběh rychlostí. V porovnání obou metod se ukazuje, že metoda PIV dává v převážné míře nižší hodnoty svislé složky rychlosti než metoda LDA, nicméně vzájemné rozdíly jsou v řádu 2-3 cm/s.

Průběhy RMS (Root Mean Square) hodnot podélné i svislé složky rychlosti jsou ukázány na obr. 5 a 6. RMS hodnoty jsou normalizovány střední nátokovou rychlostí v kanále. Jak se dá předpokládat, nejvyšší RMS hodnoty byly pozorovány ve smykové oblasti na rozhraní hlavního proudu a kavity. V této oblasti se také ukazuje vliv Reynoldsových čísel, kdy normalizované RMS hodnoty klesají s rostoucí hodnotou Reynoldsova čísla. Pro $Re=43700$ a $Re=107500$ jsou RMS hodnoty prakticky totožné. Shoda RMS hodnot získaných metodou PIV s hodnotami z LDA je velmi dobrá u podélné složky rychlosti, u svislé složky se byly pozorovány výrazné rozdíly především ve smykové oblasti.

Na obr. 7-9 je ukázáno porovnání výsledků numerické simulace s měřenými hodnotami pomocí metody LDA. Numerické simulace byly prováděny pro stejnou hodnotu Reynoldsova čísla jaké bylo použito při experimentu, a proto jsou příslušné hodnoty rychlostních charakteristik vykresleny v absolutních hodnotách. Na obr. 7 jsou ukázány průběhy podélné složky rychlosti ve třech svislých řezech. V oblasti osy kanálu, kde jsou maximální rychlosti, dává numerická simulace nižší hodnoty podélné složky. To je způsobeno tím, že je uvažován 2D model se stejnou střední rychlostí nátokového proudu jako při reálném experimentu, kde vlivem bočních stěn je v ose vyšší rychlost. Na obr. 8 jsou ukázány průběhy svislé složky rychlosti a na obr. 9 průběhy kinetické energie, které jsou přímým výstupem z numerického modelu. Proto bylo nutné vypočítat hodnoty kinetické energie na základě měření RMS hodnot podélné a svislé složky rychlosti. Z obr. 7-9 je patrná velmi dobrá shoda 2D numerického modelu s LDA měřeními, a to pro všechny sledované turbulentní charakteristiky.

Vedle měření středních hodnot rychlostí a směrodatných odchylek byla provedena také frekvenční analýza časových řad podélné složky měřených na vertikální ose kavity ve vzdálenosti 3,7 cm pod horní hranou kavity ($x=0,05$ m, $y=-0,037$ m). V tomto bodě byly metodou LDA měřeny dostatečně dlouhé časové řady pro pět hodnot Reynoldsových čísel. Pro metodu PIV byla použita externí synchronizace a tím byla prodloužena doba záznamu kamery. Pro měření č.6 (Tab.1) byla doba měření 324 sec, pro měření č. 7 to bylo 648 sec a pro měření č. 8 byla doba sběru dat kamerou 40 sec. Na obr. 10 je ukázána část časové řady měřené LDA a PIV pro $Re=12500$ a pro délku záznamu kamery 648 sec. Hodnoty z PIV jsou pro názornost posunuty o rychlost 0,03 m/s. FFT analýzou byly určeny průběhy frekvenčních spekter, které byly následně normovány rozměrem kavity a střední rychlostí nátokového proudu. V levé části obr. 11 jsou ukázány průběhy frekvenčních spekter pro LDA měření. Z obrázku je patrná dominantní frekvence odpovídající hodnotě Strouhalova čísla 0,07. V pravé části obr. 11 je doplněn průběh z PIV metody ($Re=12500$, $T=648$ sec), který dává podobnou hodnotu jako LDA měření, nicméně další průběh pro vyšší hodnoty Strouhalova čísla se již odlišuje. Další průběhy měřené metodou PIV (měření č. 6 a 8) již neumožňovaly zachytit tuto dominantní frekvenci.

Závěr

Byly měřeny rychlostní profily pomocí LDA a zjednodušené metody PIV. Současně byly provedeny numerické simulace pomocí standardního modelu $k-\omega$, SST implementovaného v prostředí Fluent 6.3. Z porovnání obou experimentálních technik se ukazuje, že i zjednodušená metoda PIV dává uspokojivé výsledky a rozdíly mezi PIV a LDA se pohybují do cca 12%.

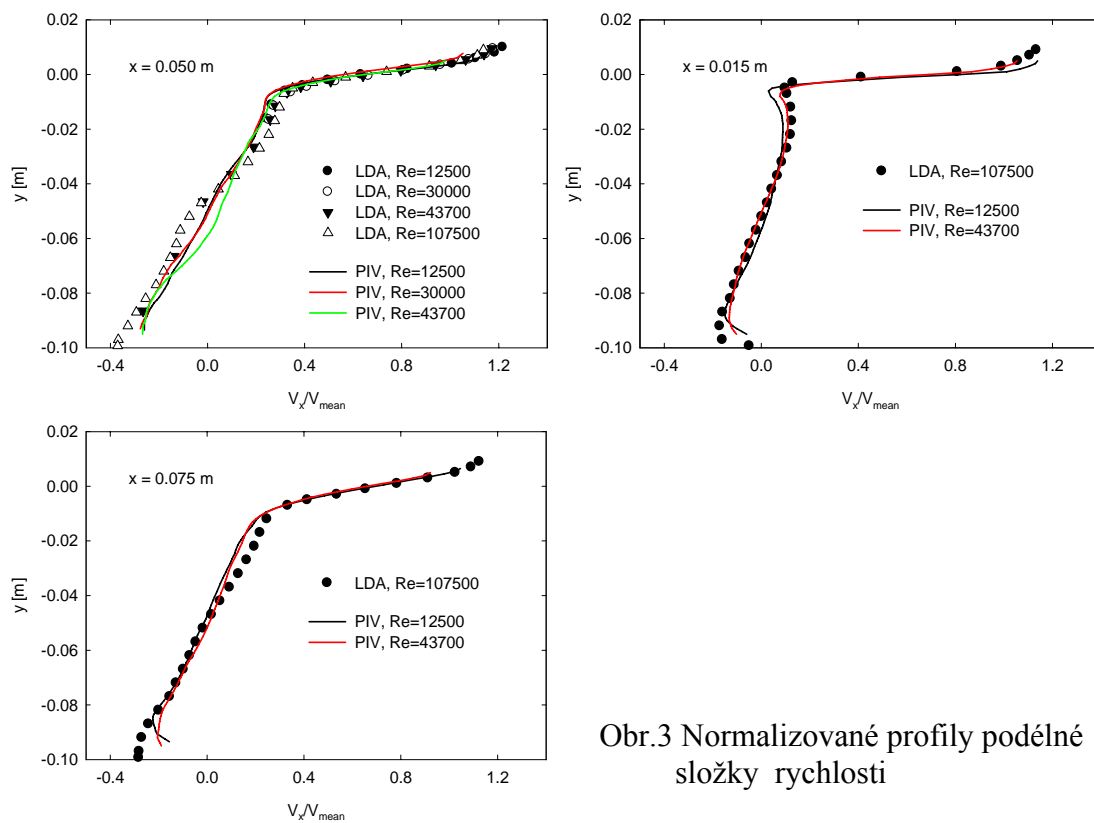
Shoda testované numerické simulace s experimentálními daty byla v měřených profilech velice dobrá, a to i v případě průběhů kinetické energie.

Poděkování

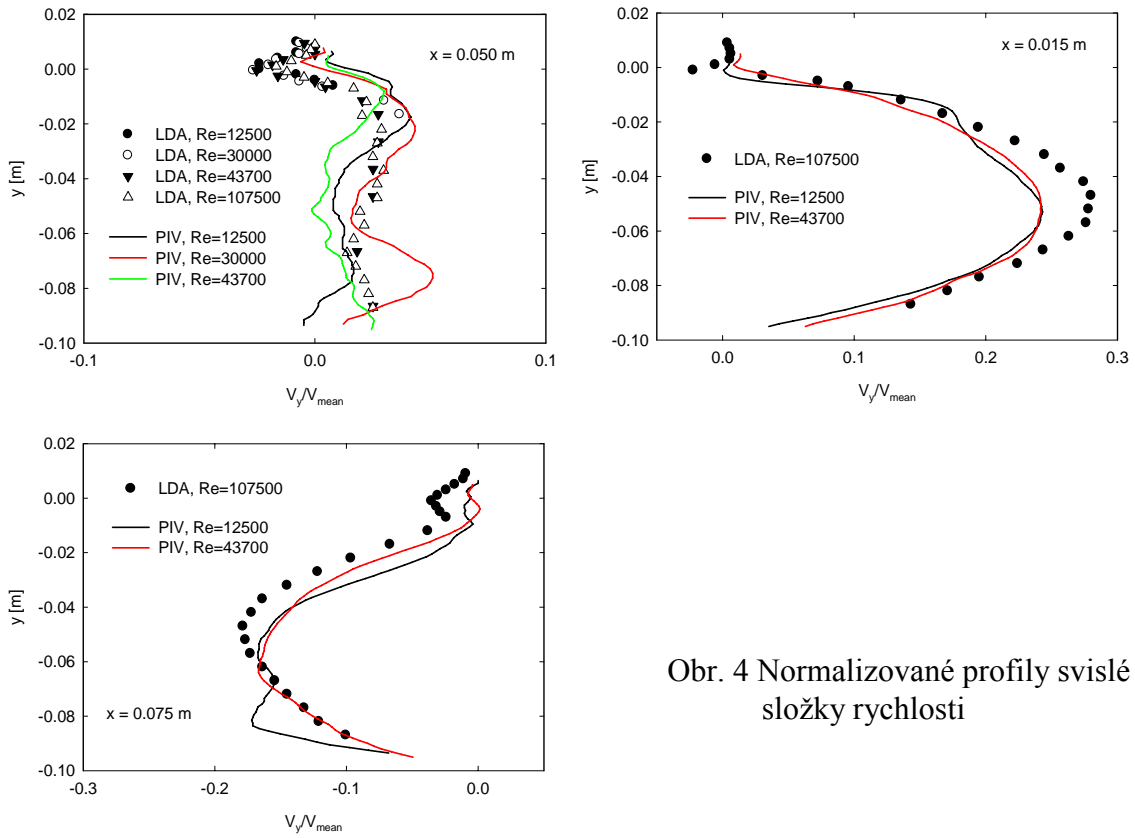
Projekt byl řešen za finanční podpory projektů Grantové agentury ČR č. 101/05/0675 a 103/07/0136 a výzkumného záměru č. AV0Z20600510.

Literatura

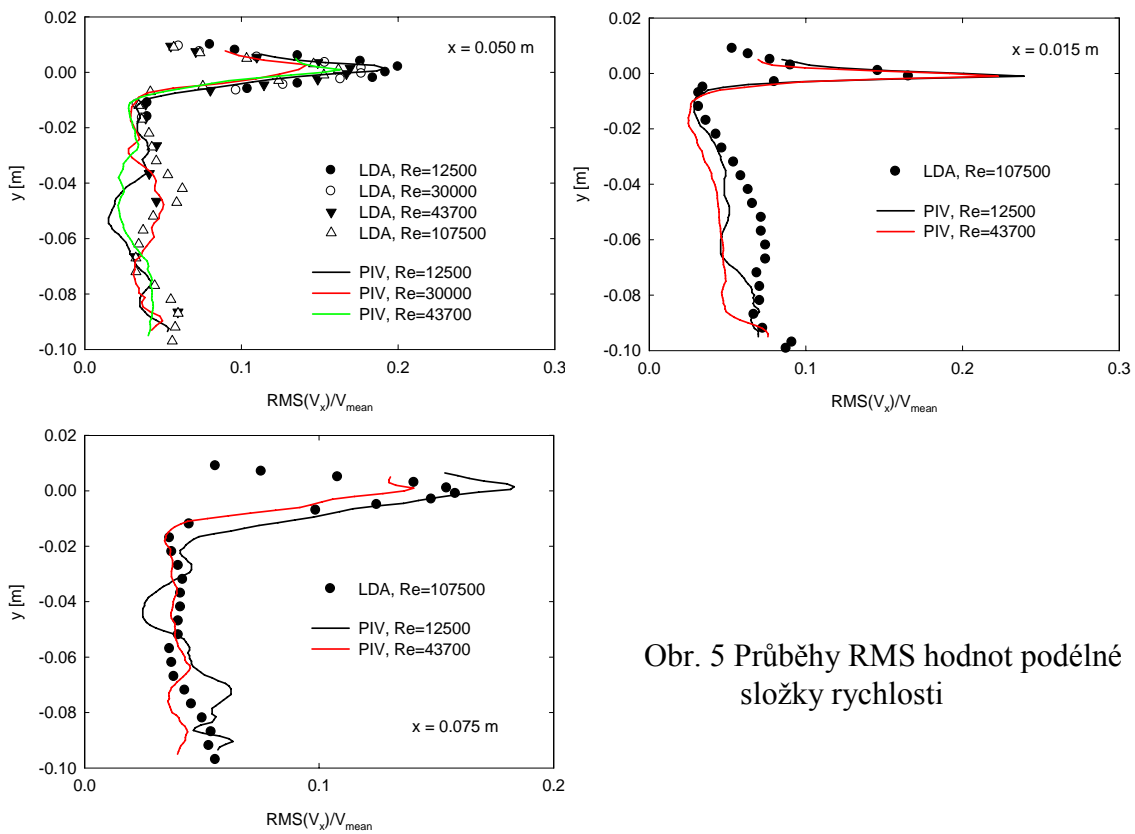
- [1] Ch.-H. Bruneau, M. Saad. The 2D lid-driven cavity problem revisited. *Computers & Fluids* 35 (2006) 326–348
- [2] B. Hoření, Z. Chára. The 2D lid-driven cavity flow at high Reynolds numbers. ICNAAM 2007, Sept. 2007, Greece
- [3] <http://gpiv.sourceforge.net/dac.html>



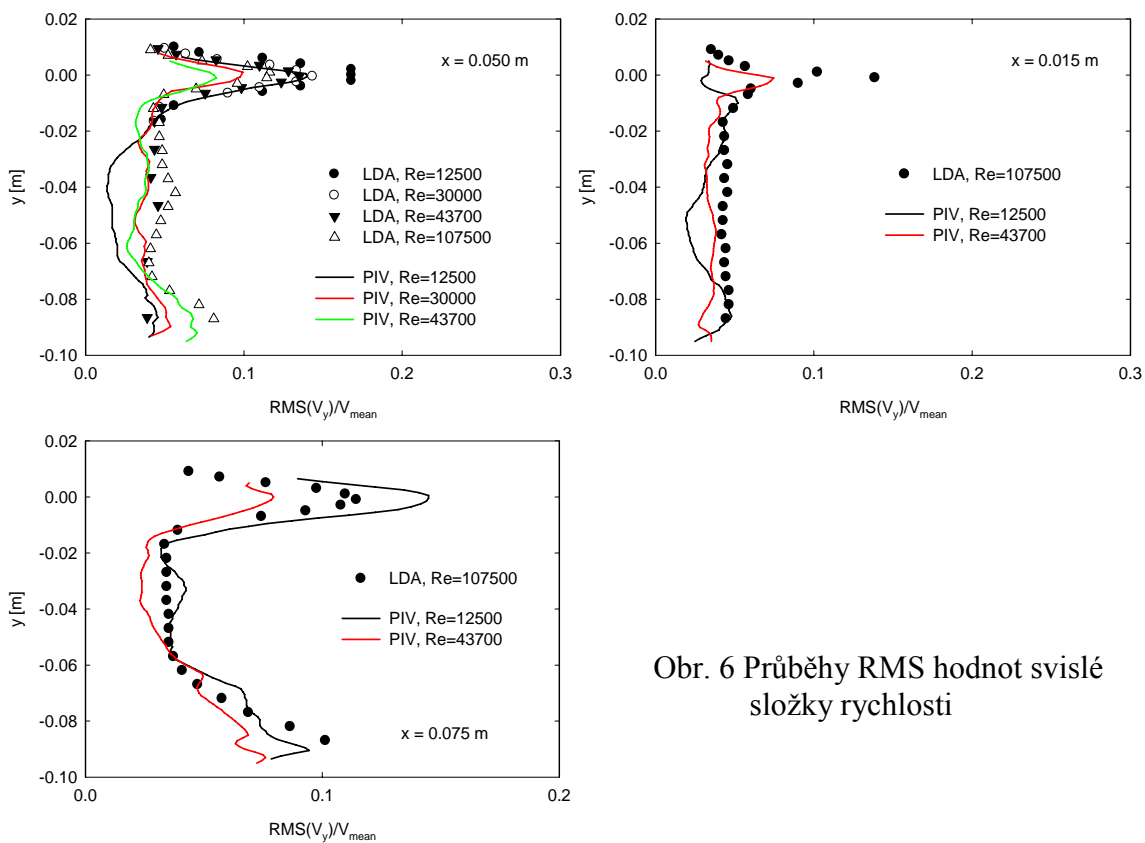
Obr.3 Normalizované profily podélné složky rychlosti



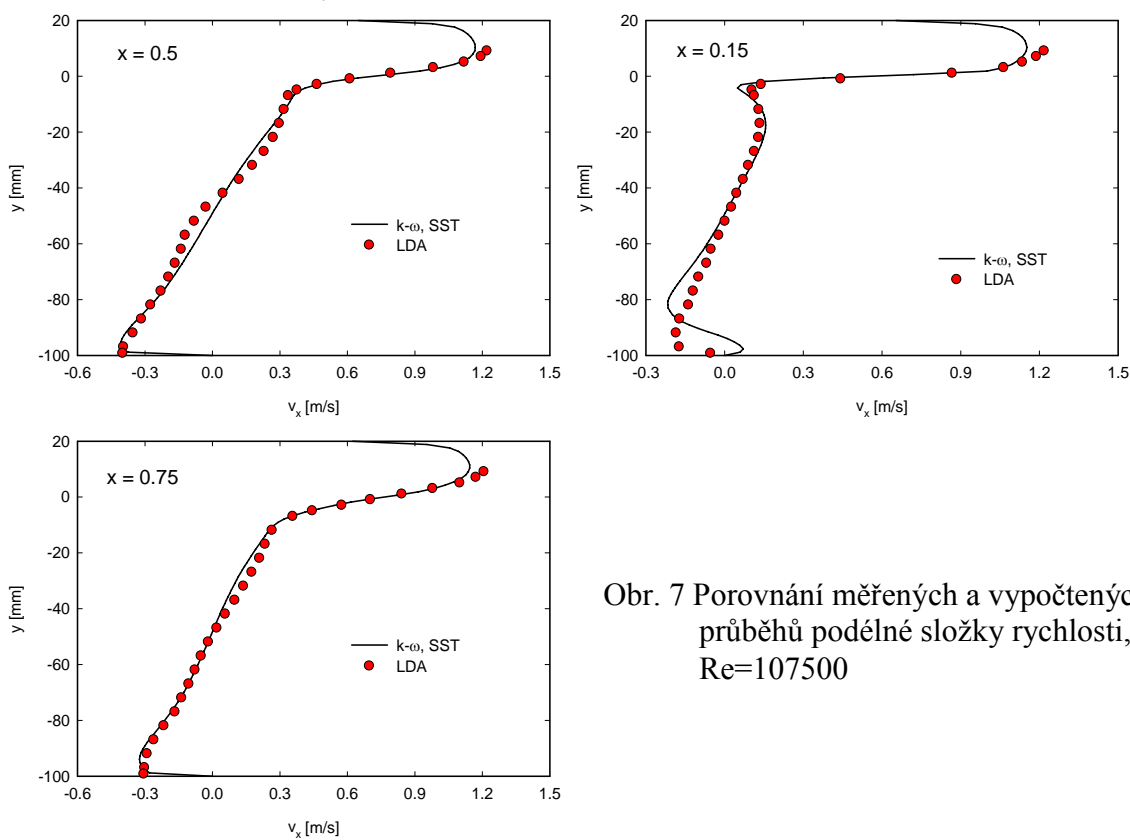
Obr. 4 Normalizované profily svíslé složky rychlosti



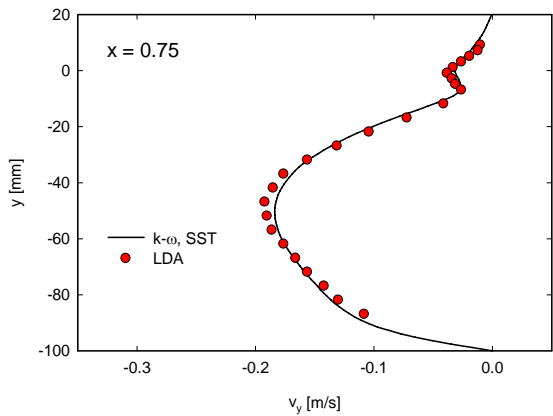
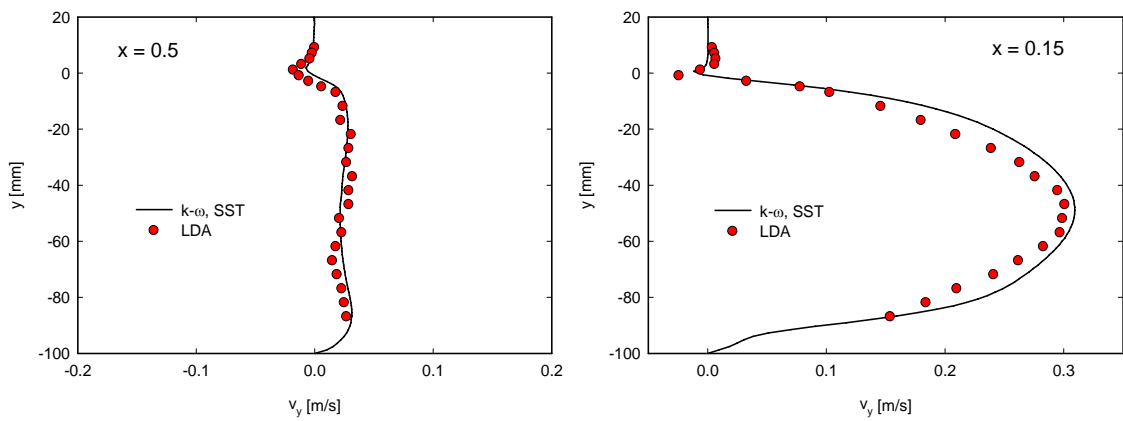
Obr. 5 Průběhy RMS hodnot podélné složky rychlosti



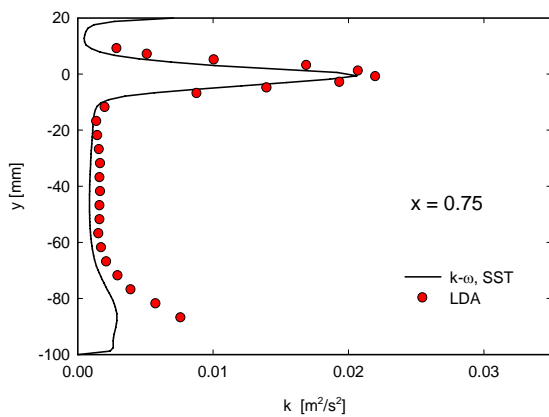
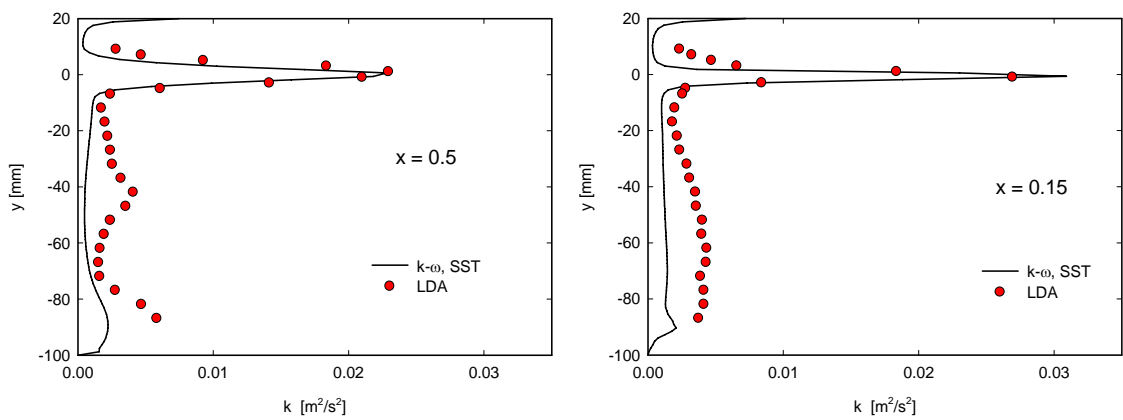
Obr. 6 Průběhy RMS hodnot vísle složky rychlosti



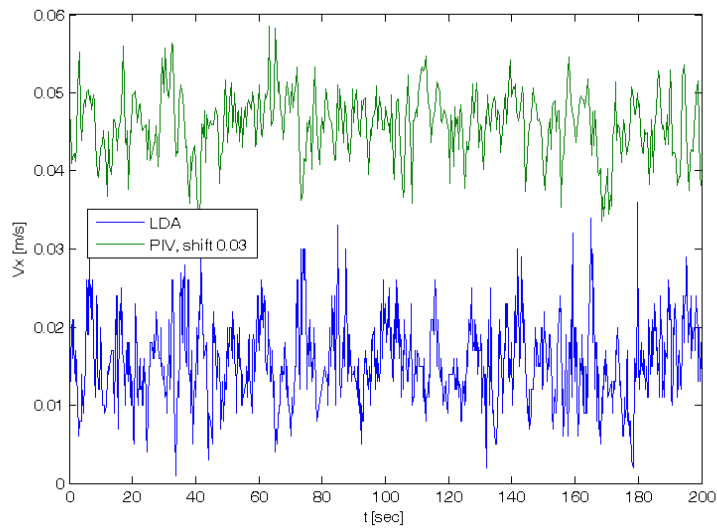
Obr. 7 Porovnání měřených a vypočtených průběhů podélné složky rychlosti, $Re=107500$



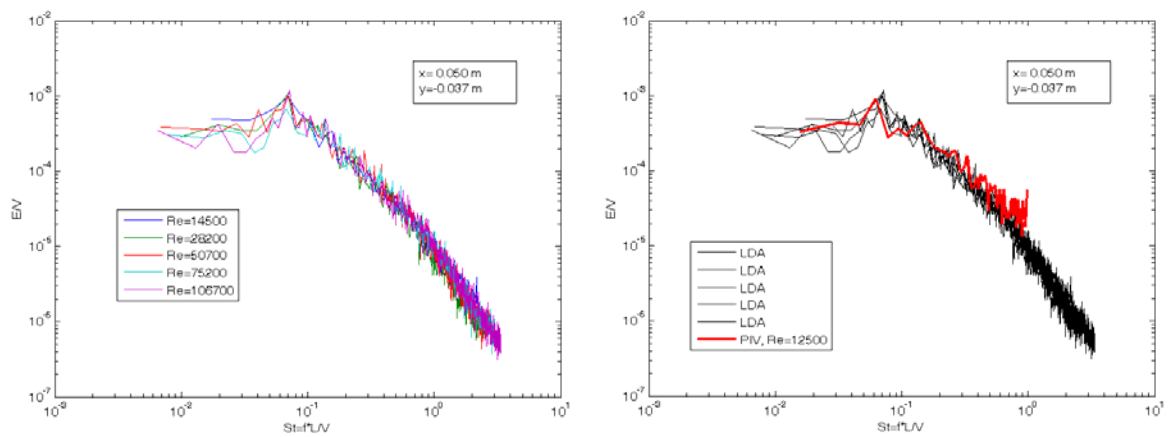
Obr. 8 Porovnání měřených a vypočtených průběhů svíslé složky rychlosti, $Re=107500$



Obr. 9 Porovnání hodnot kinetické energie, $Re=107500$



Obr. 10 Časové řady z měření PIV a LDA v bodě [0,05 -0,037]. PIV data jsou posunuta o 0,03 m/s



Obr. 11 Frekvenční spektra měřená v bodě [0,05 -0,037]