



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

KRÁTKODOBÉ TURBULENTNÍ ROZRUCHY PŘI PULZAČNÍM PROUDĚNÍ

Josef Kořenář

Abstrakt

Při pulzačním proudění v trubicích v blízkosti přechodové oblasti mezi laminárním a turbulentním režimem proudění vznikají v kapalině krátkodobé turbulentní rozruchy, které trvají jen po část periody. Jejich počátek, doba trvání, průběh intenzity a konec v rámci periody závisí na parametrech toku jako je střední Reynoldsovo číslo, Womersleyovo číslo a průtokový poměr. Tyto rozruchy byly analysovány v rozsahu $Re_s=1000$ až 5000 , $\alpha=7$ až 16 a $\lambda=0,9$ a $0,45$.

Klíčová slova

Pulzační proudění, laminární režim proudění, turbulence, přechodová oblast, turbulentní rozruchy, laser-dopplerovská anemometrie

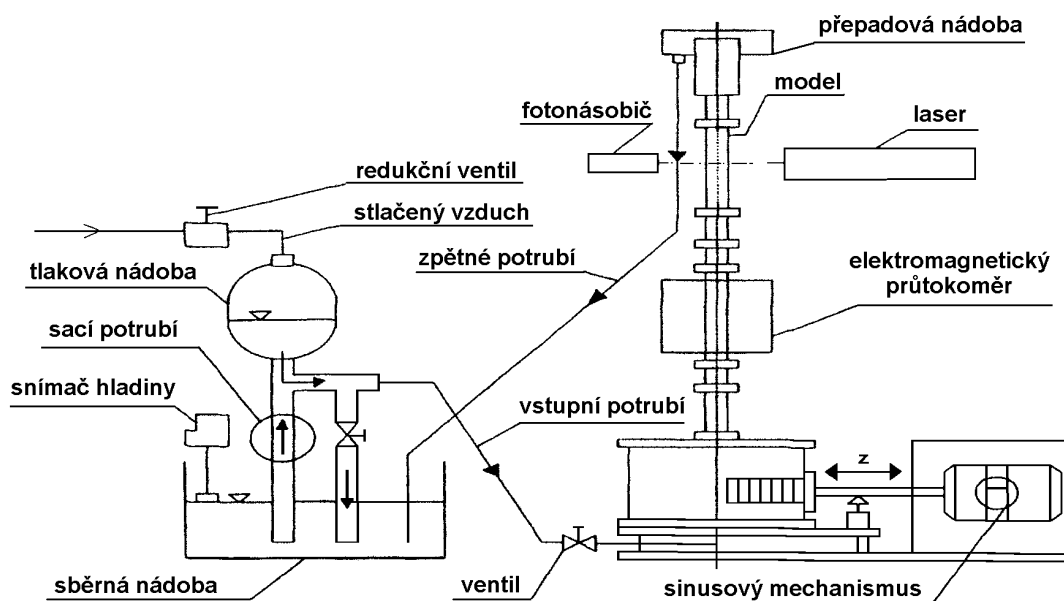
Experimentální zařízení

K výzkumu krátkodobých turbulentních rozruchů bylo použito stávající víceúčelové měřicí trasy (viz obr. 1).

Ze sběrné nádoby je kapalina čerpadlem přečerpána do tlakové nádoby (upravená tlaková nádoba domácí vodárny Darling), kde je kapalina udržována pod stálým tlakem 200 kPa pomocí tlakového vzduchu, přivedeného z kompresoru přes redukční ventil nad hladinu kapaliny. Tím je nahrazena stěží realizovatelná přepadová nádoba ve výšce 20 m.

Z tlakové nádoby proudí kapalina přes regulační ventil, kterým se nastavuje velikost stacionárního průtoku. Za ventilem následuje mísicí nádoba, do které zasahuje píst, vykonávající sinusový pohyb. Píst je poháněn stejnosměrným elektromotorem s tachodynamem s přesnou regulací nastavitelných otáček přes převod do pomala (vyšší otáčky motoru se lépe stabilizují) se setrvačником a sinusový mechanismus s možností nastavení zdvihu (amplitudy pohybu) pístu.

Z mísicí nádoby, kde dochází k superpozici sinusové a stacionární složky průtoku, proudí kapalina svisle vzhůru přes elektromagnetický indukční průtokoměr do pracovní (měřicí) části trasy, která v tomto případě sestává z úseku průhledné hladké kruhové trubice z organického skla, který je na obou koncích opatřen tlakovými odběry pro měření tlakové ztráty, a dále do přepadové nádoby se stálou (nastavitelnou) výškou hladiny. V přepadové nádobě je umístěn termostat, který udržuje po určité době ustálení konstantní teplotu kapaliny po celou dobu měření, kvůli zachování stálé hustoty a



obráz. 1. Schema měřicí aparatury

viskozity kapaliny. Z přepadové nádoby se kapalina vrací zpět do sběrné nádoby.

Poměrně vysoký tlak použitý k realizaci stacionární složky průtoku je použit z toho důvodu, aby pohyb pístu, vyvolávající oscilační složku, nezpůsobil zpětný tok do tlakové nádoby. Trasa je vybavena přístroji, popsány v následující kapitole.

Metodika měření a vyhodnocování

K měření axiální složky okamžitých rychlostí v jednotlivých bodech podél průměru trubice bylo použito laser-dopplerovské anemometrie. Z laseru je světelný paprsek veden do speciální optiky, kde dochází k jeho rozštěpení a současně u jednoho z paprsků k frekvenčnímu posunu (shift). Paprsky se protínají uvnitř kapaliny v měřeném bodě. Na jejich průsečík je zaostřena optika fotonásobiče, ze kterého jde elektronický signál do LDA procesoru, kde je dále zpracován. Jeho výstupem je okamžitá rychlost v digitální formě.

V každém měřeném bodě bylo měřeno po dobu 50 period (u velmi nízkých frekvencí pulzací z časových důvodů 30 period), přitom v každé periodě byla snímána hodnota okamžité rychlosti v 720 fázích pohybu, časově ekvidistantních. Okamžiky snímání byly časově synchronizovány s pohybem pístu. To nám umožňuje provádět středování přes periody (assembly average), které u periodického děje nahrazuje středování v čase, používané u stacionárních dějů. K získání celkového obrazu o rychlostním poli se měření provádí v bodech podél celého průměru trubice.

K realizaci synchronního měření je trasa vybavena několika nezbytnými přístroji:

- rotační snímač polohy, spojený s hřídelí sinusového mechanismu, který indikuje jednak začátek každé periody, jednak každou periodu rozděluje časově ekvidistantně na 3600 fází
- synchronizátor, sestavený v našem ústavu, který zpracovává impulsy z rotačního snímače, může jejich frekvenci dělit (není vždy zapotřebí a ani uskutečnitelné měřit 3600 fází každé periody) a přenáší je dále do interface

- synchronizovaný interface, rovněž sestrojený v ústavu, který je řízen přes měřicí kartu z počítače a který předává data z LDA procesoru do počítače, může zpracovávat současně 2 kanály
- měřicí karta, zasunutá ve slotu počítače, která slouží k řízení interface a k načítání naměřených dat z interface

Naměřené hodnoty okamžitých rychlostí byly uloženy do počítačových souborů k dalšímu zpracování. Pomocí středování přes periody z nich byly odvozeny střední rychlosti přes periody a tím i střední rychlostní profily, Reynoldsova normálová napětí a dále energetická spektra, získaná pomocí Fourierovy analýzy okamžitých a středovaných rychlostí.

Analyzujeme nyní hlavní aspekty, ovlivňující přesnost měření, objem dat, potřebný k zaznamenání požadovaných veličin, časovou náročnost měření a požadovanou četnost měření (data rate).

Měřený rychlostní profil je tvořen řadou po sobě následujících bodů jdoucích napříč průměru trubice s vzájemným odstupem (krokem) 0,5 mm na vnějším traverzovacím zařízení. To dává při korekčním koeficientu posuvu cca 1,4 (ten je způsoben lomem laserových paprsků a závisí na indexu lomu kapaliny a na úhlu mezi laserovými paprsky) cca 0,7 mm uvnitř trubice. Pro trubici o vnitřním průměru 20 mm je tedy profil tvořen cca 30 body. Menší krok by jednak vedl k dalšímu zvýšení náročnosti na kapacitu ukládaných dat a k větší časové náročnosti, jednak by už neměl velký fyzikální význam, neboť délka měřicí „sondy“ činí při zvolené optické konfiguraci laseru cca 0,8 mm, takže by došlo k částečnému překrývání měřeného rychlostního profilu.

Jak již bylo uvedeno, v každém bodě byly měřeny okamžité hodnoty rychlosti v průběhu 50 nebo 30 period. Počet period je omezen zdola požadavkem, aby bylo možno věrohodně počítat střední hodnoty přes periody (absolutním minimem se jeví asi 10 period) a shora několika vlivy:

- je vhodné, aby měření v jednom bodě proběhlo před vyprázdněním tlakové nádoby, aby během měření nedošlo k čerpání z rezervoáru (tlak v tlakové době musí být ustálen). Tento aspekt je závislý na velikosti tlakové nádoby, na velikosti stacionárního průtoku a na frekvenci pulzací. V našem případě činila kapacita tlakové nádoby cca 30 litrů, maximální stacionární průtok byl 5 l/min a minimální frekvence pulzací byla cca 0,2 Hz.
- kapacita paměti počítače umožňuje naměřit omezený počet dat v jedné nepřetržité serii (bez záznamu na pevný disk), neboť při přímém záznamu dat na pevný disk by při vyšší frekvenci pulzací a větším počtu dat na jednu periodu docházelo ke ztrátě dat.
- je vhodné, aby byl rychlostní profil změřen v poměrně krátké době, například během jedné pracovní směny, neboť přes předpokládanou reprodukovatelnost měření se mohou některé dlouhodobější vlivy nepříznivě projevit, například teplota kapaliny, která se musí (v závislosti na teplotě v laboratoři) ustalovat až hodinu, koncentrace částic v kapalině, přesnost nastavení stacionárního průtoku. Při nepříznivé shodě odchylek by se mohl na rychlostním profilu objevit menší či větší „zub“, který by měření znehodnotil. Doba měření profilu se prodlužuje s klesající frekvencí pulzací, s rostoucím počtem period v jednom bodě a s klesající vzdáleností mezi měřicími body.

Naměřené výsledky

Při stacionárním proudění v tuhé kruhové trubici je v podstatě jediným

parametrem majícím vliv na charakter proudění Reynoldsovo číslo Re . Při $Re < 2300$ je laminární proudění stabilní, takže náhodný turbulentní rozruch je rychle utlumen.

Pulzační proudění v tuhé trubici je charakterizováno třemi bezrozměrnými parametry: Středním Reynoldsovým číslem $Re_s = v_s \times d / \nu$, Womersleyovým číslem (frekvenční podobnostní parametr) $\alpha = d/2 \times \sqrt{(\omega/\nu)}$ a průtokovým poměrem $\lambda = Q_{pm}/Q_s$, kde $v_s = Q_s/S$ je průtoková střední hodnota stacionární složky rychlosti, S je průřez trubice, d její vnitřní průměr, ν je kinematická viskozita kapaliny, ω je úhlová rychlost oscilační složky pohybu kapaliny, Q_s je stacionární složka průtoku a Q_{pm} je amplituda oscilační složky průtoku.

Na časových průbězích okamžitých rychlostí a Reynoldsových normálových napětí se při podmínkách v blízkosti přechodové oblasti mezi laminárním a turbulentním režimem proudění objevují krátkodobé turbulentní rozruhy, které se v detailech navzájem liší periodu od periody, ale celkový charakter jevu je zřejmý: v určité fázi pohybu v rámci periody vznikne turbulentní rozruch, který má zpočátku rostoucí amplitudu, po určité době v rámci téže periody vymizí. Časový počátek rozruhu, jeho amplituda a časový konec v rámci periody závisí na parametrech proudění, popsaných výše.

Jako hlavní strategický cíl studia dočasných turbulentních rozruchů bylo stanoveno vymezit oblast parametru pulzačního proudění, kdy je proudění trvale laminární, trvale turbulentní, a v přechodové oblasti zjistit časovou korelaci mezi periodami pohybu a počátky a konci rozruchů a jejich amplitudy v závislosti na parametrech Re_s , α a λ .

V návaznosti na dřívější výsledky byla provedena měření pro další hodnoty parametrů proudění, zejména pro $\lambda=0,9$ a pro stacionární průtoky 3 a 4 l/min. byly proměřeny celé profily pro $\alpha=7$ (resp. 8) až 16. Objem naměřených dat je tak rozsáhlý, že výsledky z roku 2001 jsou zatím zpracovány jen částečně, tedy kompletní výsledky zatím nejsou k dispozici, jejich výsledky a závěry budou publikovány později.

Z naměřených hodnot byly vypočteny střední hodnoty rychlostí, fluktuace rychlostí, Reynoldsova normálová napětí a energetická spektra středních a okamžitých průběhů rychlosti. Pro výpočet bylo použito následujících vzorců:

$$\langle v_k \rangle = \frac{1}{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} v'_{jk} \quad , \quad v'_{jk} = v_{jk} - \langle v_k \rangle$$

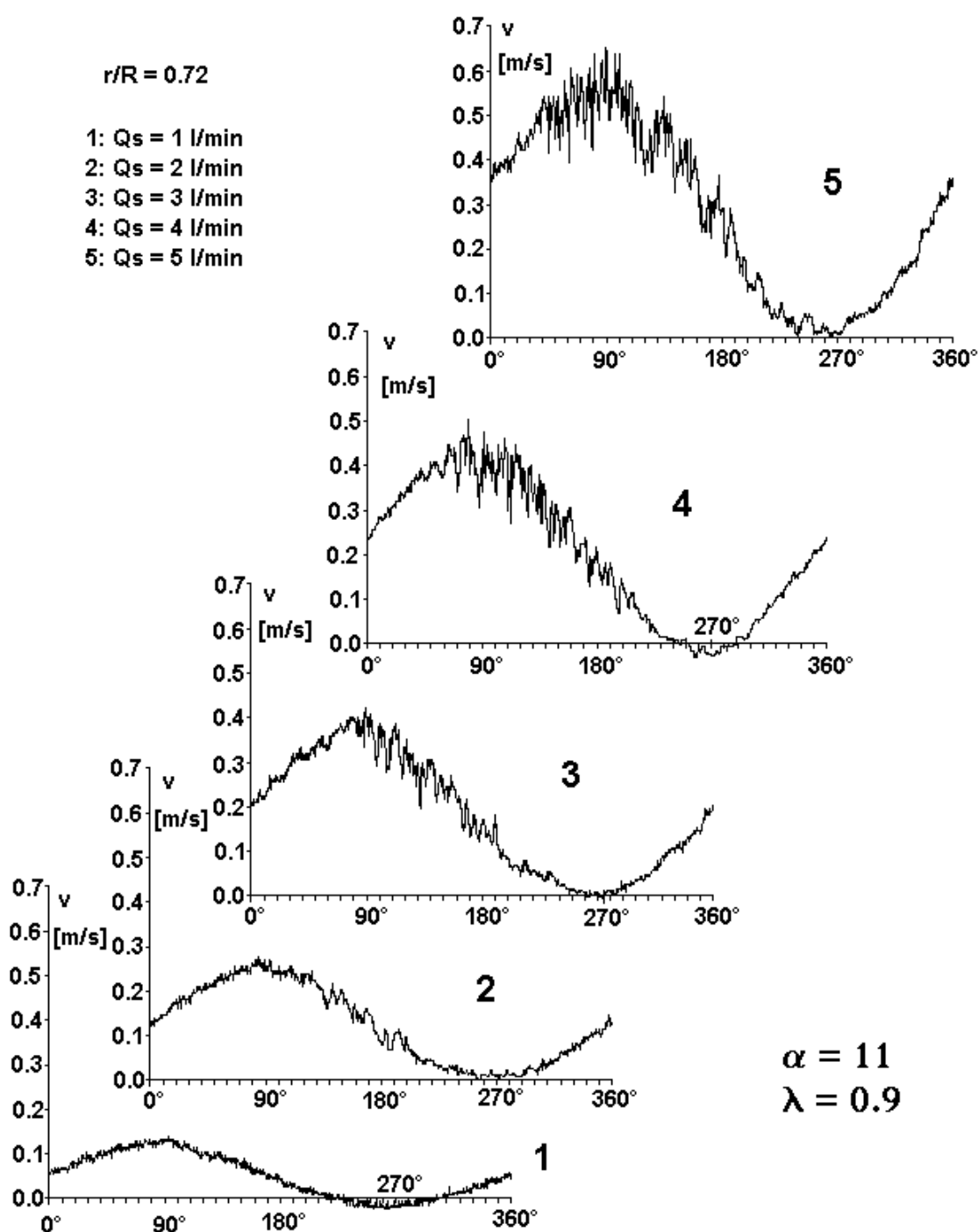
$$\sigma = \rho \langle v_k'^2 \rangle = \frac{\rho}{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} v_{jk}'^2 \quad , \quad \text{kde } N_p \text{ je počet měřených period, } v_{jk} \text{ je}$$

okamžitá hodnota rychlosti v periodě j a o fázi k , $\langle v_k \rangle$ je k -tá fáze rychlosti vystředované přes periody, v'_{jk} je fluktuace rychlosti v periodě j a fázi k , ρ je hustota kapaliny a σ je the Reynoldsovo normálové napětí. Symboly $\langle \dots \rangle$ značí středování přes periody příslušné veličiny.

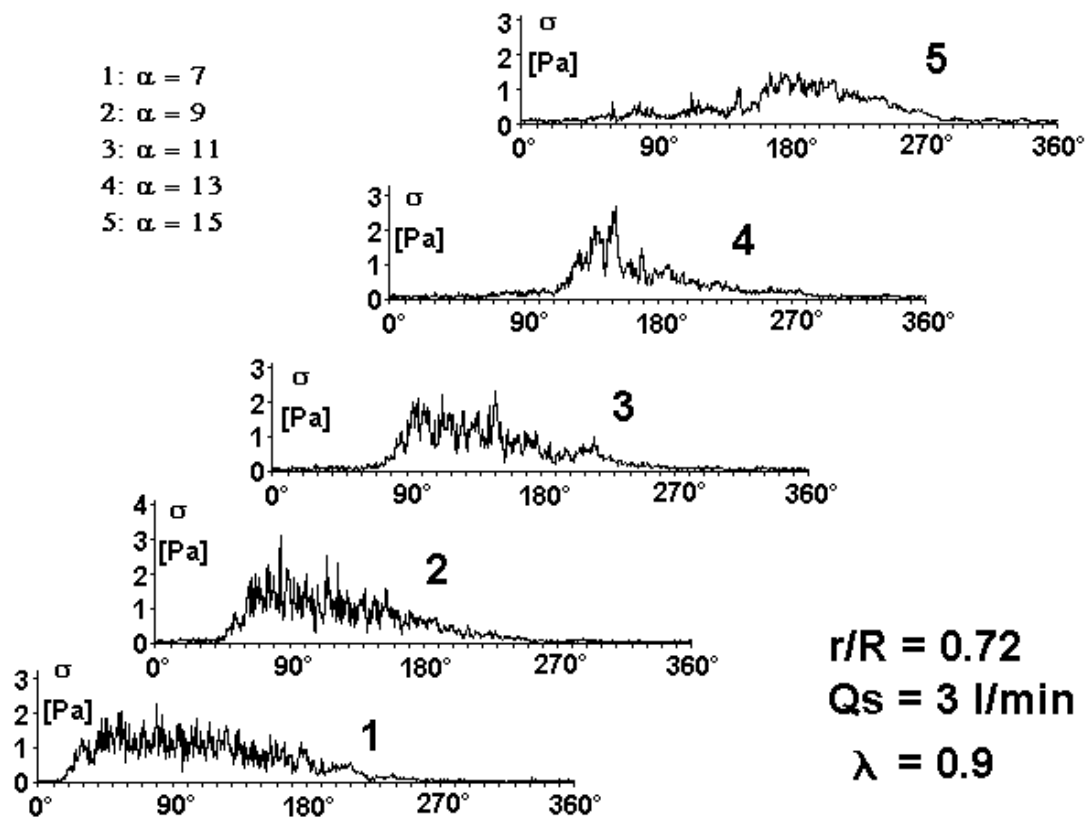
Z velkého množství materiálu bylo vybráno několik obrázků, charakteristických pro tuto oblast proudění. Na obrázku 2 jsou vidět časové průběhy okamžité rychlosti pro různé střední průtoky, na obrázku 3 jsou časové průběhy Reynoldsových normálových napětí pro různé hodnoty α , na obr. 4 totéž pro různé velikosti stacionárního průtoku, na obr. 5 jsou okamžité průběhy rychlostí v různé vzdálenosti od stěny trubice, a obr. 6 je axonometrické zobrazení Reynoldsových normálových napětí pro jednu sadu parametrů a na obr. 7 je průběh spektrální hustoty energie.

Nejnižší měřená hodnota stacionárního průtoku byla 1 l/min. To odpovídá střednímu Reynoldsovu číslu 1045 a tedy laminární oblasti proudění. Získané rychlostní profily byly porovnány s teoretickými, získanými z analytického řešení pro laminární proudění a byla konstatována dobrá shoda. V literatuře je popisován spontánní vznik turbulentních oblastí v intermitentním stacionárním proudu a sledována jeho frekvence.

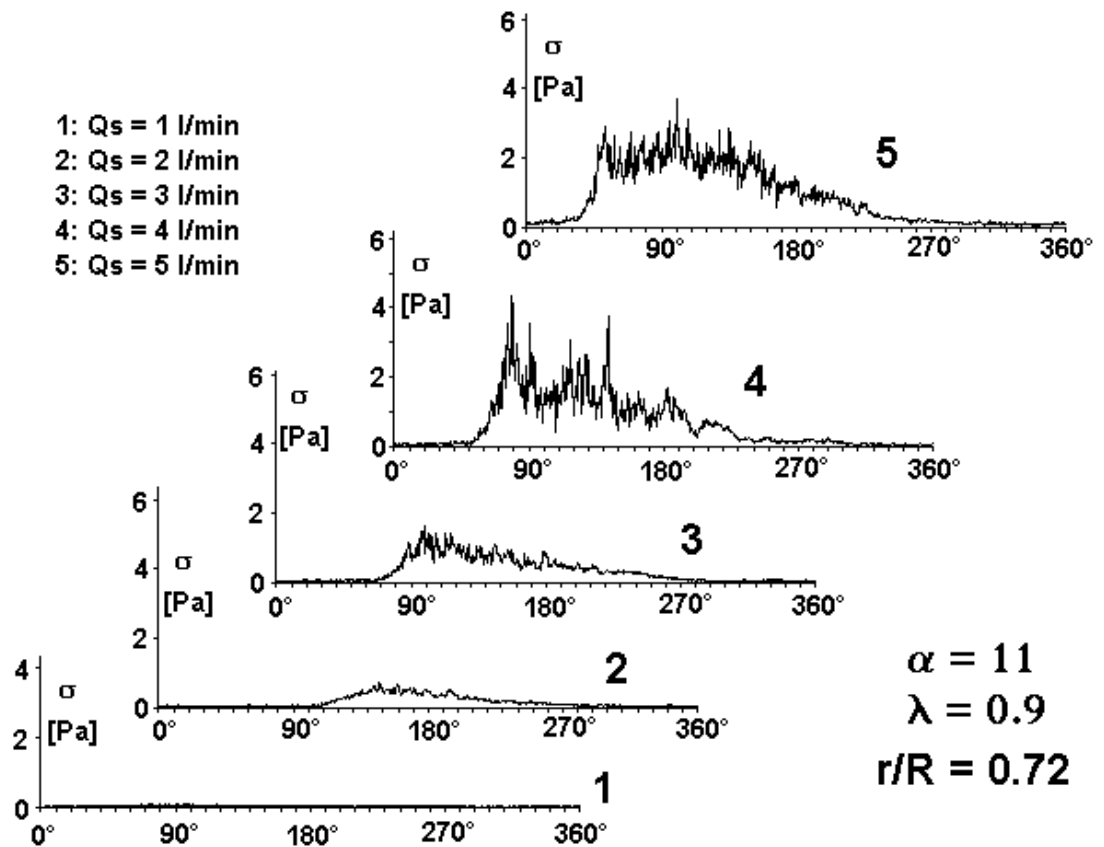
V případě nestacionárního proudění je situace složitější. Při malých Re_s byl sledován vznik rozruchů a studována jejich frekvence, jejich vazba na určitou část periody a závislost na α a λ . Při vyšších hodnotách Re se objevuje v retardační části časového průběhu turbulentní rozruch (plug), který je v každé periodě pouze jeden a jeho začátek je fázově vázán na určité místo periody s malými odchylkami v jednotlivých periodách.



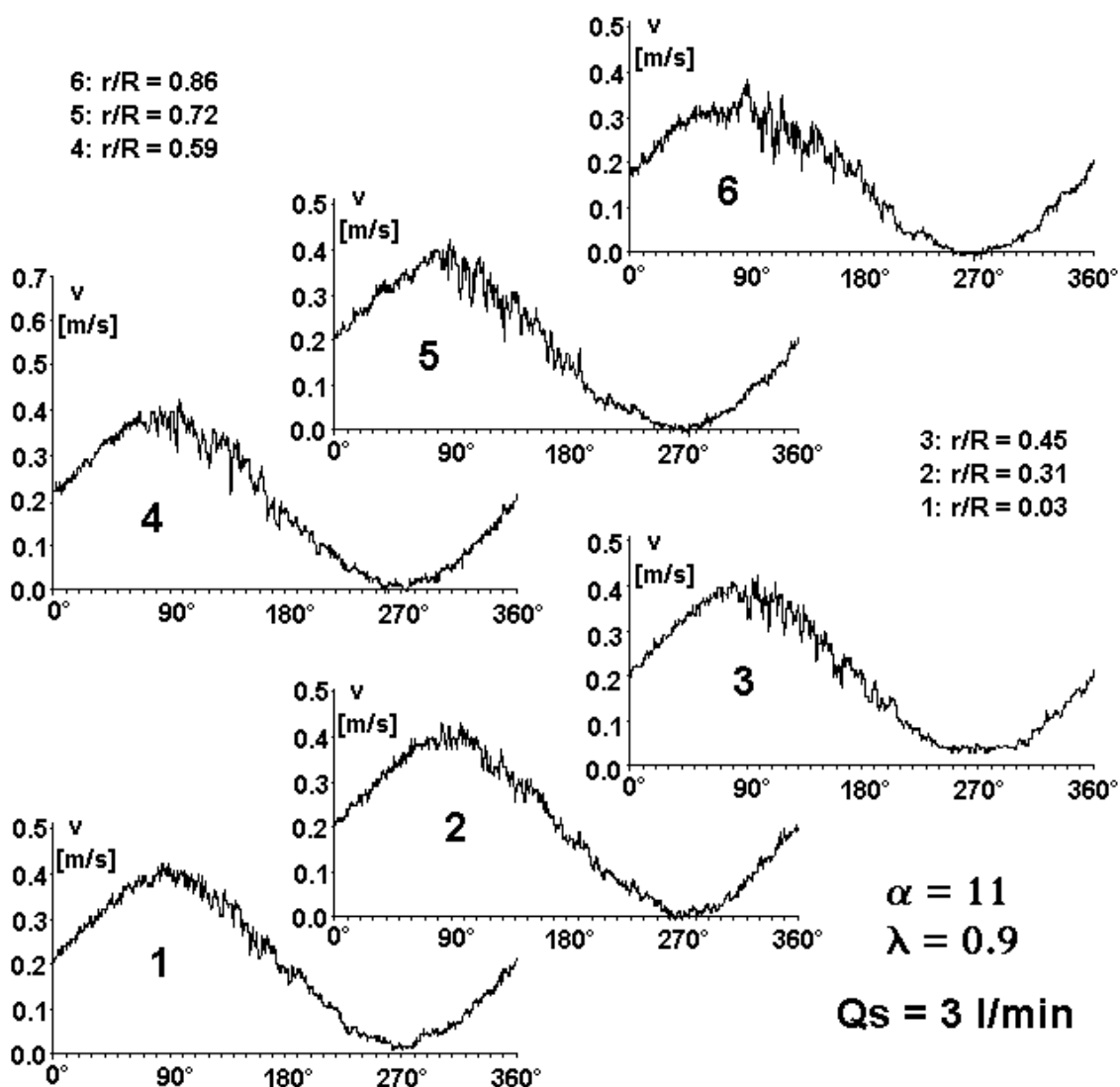
obr. 2. Časové průběhy okamžité rychlosti pro různé střední průtoky



obr. 3. Časové průběhy Reynoldsových normálových napětí pro různé hodnoty α



obr. 4. Časové průběhy Reynoldsových normálových napětí pro různé střední průtoky



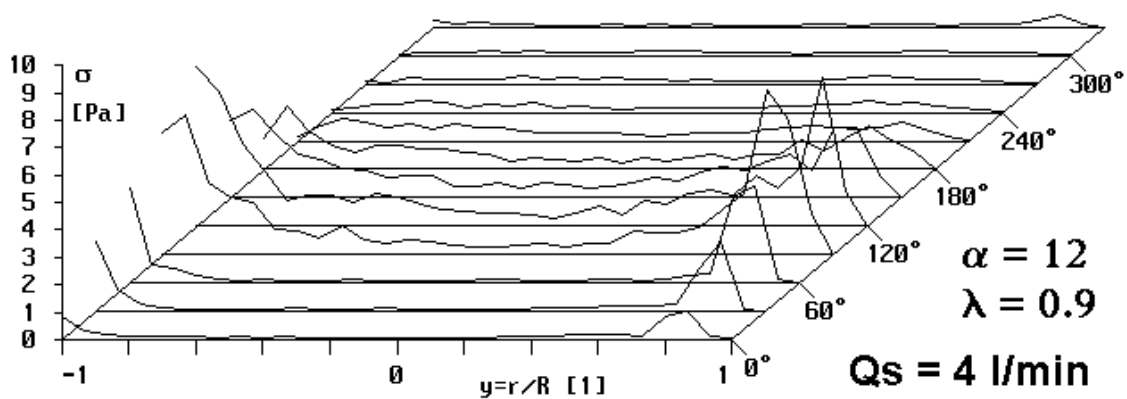
Obr. 5. Časové průběhy okamžité rychlosti v různých vzdálenostech od stěny

Poloha začátku tohoto rozruchu, jeho délka a intenzita závisí na parametrech experimentu α , λ a Q_s a také na vzdálenosti bodu, ve kterém se měří, od stěny trubice.

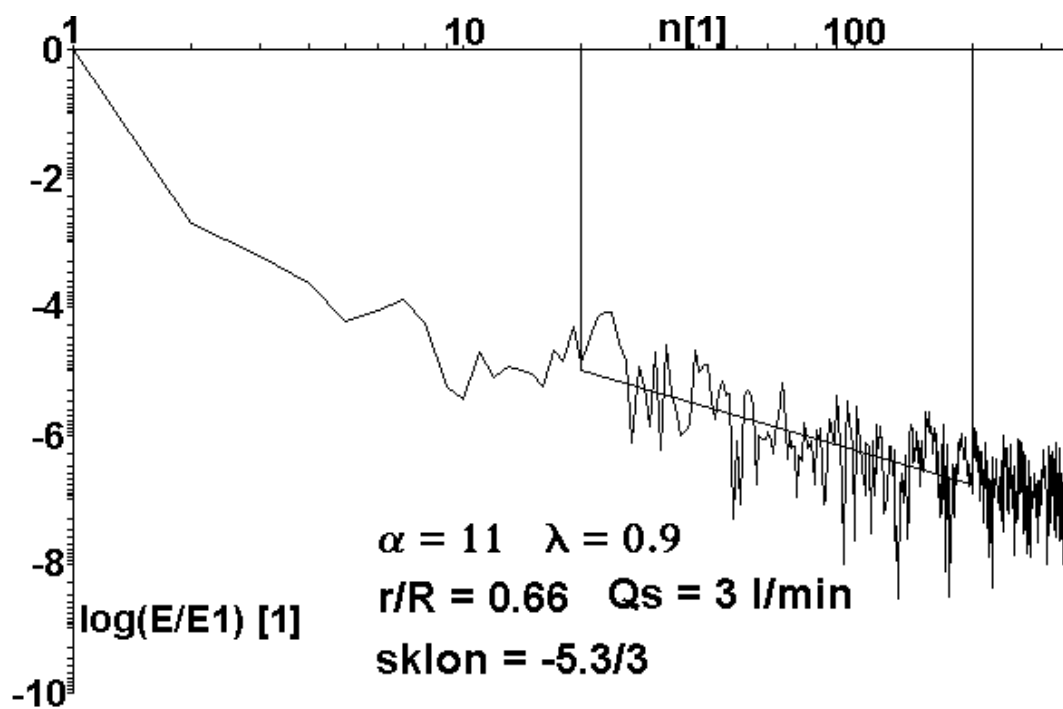
Závěr

Z uskutečněných měření se ukazuje, že dosah rozruchu směrem od stěny trubice k jejímu středu roste s rostoucím Re_s a klesá s hodnotou α . Dále je vidět, že s rostoucím Re_s se časový počátek rozruchu posunuje směrem k začátku periody. Vazba turbulentních rozruchů na určitou fázi v periodě je dobře vidět i na časovém průběhu Reynoldsových normálových napětí.

Další výzkum bude pokračovat měřením při dalších hodnotách Q_s a α při synchronním měření rychlosti a tlakové ztráty s cílem vymezit oblast vzniku jednotlivých turbulentních rozruchů jak co do časového průběhu, tak co do prostorového rozložení a jejich charakter a tím přispět ke studiu zákonitostí pulsačního proudění v trubicích.



Obr. 6. Axonometrické zobrazení Reynoldsových normálových napětí pro jednu sadu parametrů



Obr. 7. Průběh spektrální hustoty energie pro uvedené parametry

Výzkum proběhl v rámci Programu rozvoje badatelského výzkumu v klíčových oblastech vědy reg. č. K 2076106.

Literatura

- Šrámek,B.Bo, Valenta,J., Klimeš,F.: Biomechanics of the cardiovascular system, Czech Tech. Univ. Press, Prague, 1995
- Donovan,Jr.,F.,M., Mellwain,R.,W., Mittman,D.,H., Taylor,B.,C.: Experimental Correlations to Predict Fluid Resistance for Simple Pulsatile Laminar Flow of Incompressible Fluids in Rigid Tubes, Transactions of the ASME, Vol. 116,

- September 1994, pp. 516-521
- Kwong,A.,H.,M., Dowling,A.,D.: Unsteady Flow in Diffusers, Transactions of the ASME, Vol. 116, December 1994, pp. 842-847
- Tu,S.,W., Ramaprian,B.,R.: Fully developed periodic turbulent pipe flow. Part 1. Main experimental results and comparison with predictions. Part 2. The detailed structure of the flow, J. Fluid Mech., Vol. 137, 1983, pp. 31-58
- Eckman,D.,M., Grothberg,J.,B.: Experiments on transition to turbulence in oscillatory pipe flow, J. Fluid Mech. 222, 1991, pp. 351-368
- Adamec,J., Kořenář,J.: Měření rychlosti při pulzačním proudění v trubicích kruhového průřezu, sborník Kolokvia Dynamika tekutin '97, Ústav termomechaniky AV ČR, Praha, 1997, str. 1-2
- Klimeš,F.: Transition, turbulence and shear stresses in pulsatile flow, Proc. International conference on new frontiers in biomechanical engineering, Tokio (Japonsko), 1997, pp. 139-142
- Kořenář,J.: Experimental aspects in hydrodynamics of unsteady flow with applications in biomechanics of cardiovascular system and in technology (in Czech), Ph.D. thesis, Faculty of Mechanical Engineering CTU, Prague, 1997, 95 pages
- Kořenář,J., Klimeš,F.: Experimental investigation of steady and pulsatory flow through a circular tube with axisymmetric sudden expansion and contraction, Engineering Mechanics Vol. 6, 1999, No. 3, pp. 147-158
- Kořenář,J., Adamec,J.: Contribution to experimental research of pulsatile flow in tubes near the transient zone, Proc. International conference IH AS CR Problems in Fluid Mechanics and Hydrology, June 23-26, 1999, Vol. 1, pp. 92-99
- Adamec,J., Nožička,J. and Kořenář,J.: Investigation of the pulsatile pipe flow, Heat & Technology (Italy, ISSN 0392-8764), Vol. 18, n. 2, 2000, pp. 17-22
- Adamec,J., Nožička J., Hanus D. and Kořenář J.: Experimental investigation of pulsatile flow in circular tubes, J.Propulsion, Vol. 17, No. 5: Technical notes, pp. 1133-1136