České vysoké učení technické v Praze

Czech Technical University in Prague

Ing.Václav Uruba, CSc

Dynamika přechodových mezních vrstev

Dynamics of transitional boundary layers

Summary

The turbulent and transitional flow in a boundary layer is introduced as a dynamical process, the flowing fluid is shown as an extended dynamical system with number of effective degrees of freedom depending on the state of the system.

The laminar-turbulent transition process is demonstrated on the canonical case of a flat-plate boundary layer. The known scenarios of early stage transition are reviewed.

The main attention is paid to mechanisms of turbulence production in later phases of transition, when nonlinearities are important. The role of coherent structures in this process is analyzed, as they are essential for its dynamics. In the end, interconnection between hairpin vortices, quasi-streamwise low-speed streaks and bursting phenomenon is explained in detail.

Souhrn

Turbulentní a přechodové proudění v mezní vrstvě je představeno jako dynamický proces, proudící tekutina potom jako typický rozlehlý dynamický systém s počtem aktivních stupňů volnosti daným jeho stavem.

Na nejjednodušším příkladu mezní vrstvy na rovinné desce je demonstrován proces přechodu mezní vrstvy z laminárního stavu do turbulence. Jsou ukázány dosud známé scénáře ranných fází přechodu.

Hlavní pozornost je zaměřena na mechanismy produkce turbulence v pozdějších fázích přechodu při uplatnění nelinearit. Je rozebírána úloha koherentních struktur v tomto procesu, které jsou určující pro jeho dynamiku. Nakonec je podrobně ukázána souvislost vlásečnicových vírů se vznikem pruhů nízké rychlosti a *bursting phenomenon*.

Klíčová slova

Mezní vrstva, stabilita, dynamický systém, turbulence, přechod do turbulence, koherentní struktura

Key words

Boundary layer, stability, dynamical system, turbulence, transition to turbulence, coherent structure

Obsah

Summary 2
Souhrn 3
Klíčová slova 4
Key words 4
Obsah 5
1. Úvod 6
2. Proudící tekutina jako dynamický systém 6
3. Scénáře přechodu do turbulence 7
4. Koherentní struktury 9
4.1. Vlásečnicové víry 10
4.2. Pruhy nízké rychlosti a *bursting phenomenon* 12
5. Závěr 16
6. Literatura 16
6.1. Odkazy 16
6.2. Relevantní práce autora 18
7. Curriculum vitae 22

1. Úvod

Chování tekutin při proudění je důležitou součástí mnoha přírodních dějů a je též klíčovým momentem v četných technických aplikacích v dnešním industriálním světě. Jednou z nejdůležitějších charakteristik tekutiny proudící ve smykové oblasti je stav tohoto proudění: laminární, turbulentní nebo přechodový.

Laminární proudění (*laminar flow*) je typické buďto velmi pomalým pohybem nebo vysokou hodnotou vazkosti, částice tekutiny se pohybují uspořádaně, vzájemně po sobě kloužou ve vrstvách (lamina je latinsky vrstva, plátek), odtud tedy laminární. Naproti tomu turbulentní proudění (*turbulent flow*) (turbulentus je latinsky neuspořádaný) je charakterizováno rychlým pohybem nebo nízkou viskozitou, kdy malé poruchy v proudu nekontrolovatelně rostou a způsobují tak nepředvídatelné lokální chování tekutiny a intenzivní vířivé promíchávání v celé oblasti. Proces vývoje původně laminárního proudění směrem ke zcela vyvinutému turbulentnímu proudění se nazývá přechod z laminárního do turbulentního stavu (*laminar-turbulent transition*).

Ambicí odborníků v oboru dynamiky tekutin je předpověď chování proudící tekutiny a případné řízení tohoto procesu. Pro dosažení takového cíle je nezbytné správné a pokud možno úplné pochopení mechanismů, které tento proces vytvářejí. Z tohoto hlediska je důležitý výzkum přechodu do turbulence, protože při něm lze studovat podstatu vznikající turbulence. Zdá se, že i po více než století intenzivního výzkumu je pochopení turbulence v celé šíři ještě stále v nedohlednu.

Terminologie z oblasti fyziky turbulentních a přechodových proudů není v českém jazyce ustálena. Proto budu uvádět při prvním výskytu daného termínu kurzívou v závorce anglický tvar (*English term*) spolu s českým ekvivalentem, pokud tento ovšem existuje.

2. Proudící tekutina jako dynamický systém

Na proudící tekutinu můžeme pohlížet jako na systém, který v čase obecně proměnný, tedy dynamický. Je popsán soustavou Navier-Stokesových parciálních nelineárních rovnic.

Pokud jsou okrajové podmínky neměnné, potom se při laminárním proudění jeho obraz v čase nemění, odhlédneme-li od mikroskopických jevů typu Brownova pohybu. Můžeme tedy tvrdit, že v tomto případě není žádný dynamický stupeň volnosti systému aktivní. V Lagrangeovském smyslu se přitom každá částice chová dynamicky – mění svou polohu v čase a v prostoru. Díváme-li se však na systém jako na celek Eulerovským pohledem, potom je tento ve statickém stavu.

Při změně podmínek proudění, zpravidla při zvýšení rychlosti, může dojít k přechodu systému do stavu nestability daného způsobu chování. Okrajovými podmínkami je určen nový stabilní stav systému, ke kterému jeho vývoj směřuje

– atraktor. Těsně po ztrátě stability je chování systému poměrně jednoduché, aktivuje se pouze velmi malý počet stupňů volnosti, výchylky od nestabilního rovnovážného stavu jsou malé a chování systému lze popsat s dostatečnou přesností linearizovaným modelem. Později, při zvětšování výchylek, dochází k uplatnění nelinearit, struktura je stále složitější a méně uspořádaná až dochází ke vzniku stavu deterministického chaosu – turbulence. V tomto stavu počet aktivních stupňů volnosti dramaticky roste. Jedná se potom o rozlehlý systém (*extended system*), jehož atributem je skutečnost, že vzájemná korelace změn stavu ve dvou bodech s odlehlostí rychle klesá k nule.

Pokud se na laminární proudění podíváme z hlediska měřítek srovnatelných s volnou dráhou molekul, potom můžeme tento systém klasifikovat jako čistě chaotický, protože pokud bychom jej chtěli modelovat, potom musíme modelovat každou molekulu. Je-li při turbulentním proudění velikost nejmenší struktury blízká volné dráze molekul, potom lze tvrdit, že turbulentní proudění vykazuje na této úrovni větší uspořádanost než proudění laminární. Více k této problematice viz Uruba (2005, 2006c).

Tekutinový systém ve stavu turbulence mění v čase svou strukturu. Přesto i pro popis turbulentního proudění existují statické modely, které využívají statistického popisu pomocí statistických momentů. Jedná se o modely založené na Reynoldsových rovnicích v literatuře jsou označované jako RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) modely. Tento přístup však neumožňuje studium dynamického chování systému. K tomu je třeba studovat dynamické struktury vznikající v proudu. Dnes je již nade vší pochybnost prokázáno, ze turbulentní proudění není zcela náhodné, ale skládá se ze struktur deterministického charakteru – koherentních struktur (viz např. Lesieur 1997).

3. Scénáře přechodu do turbulence

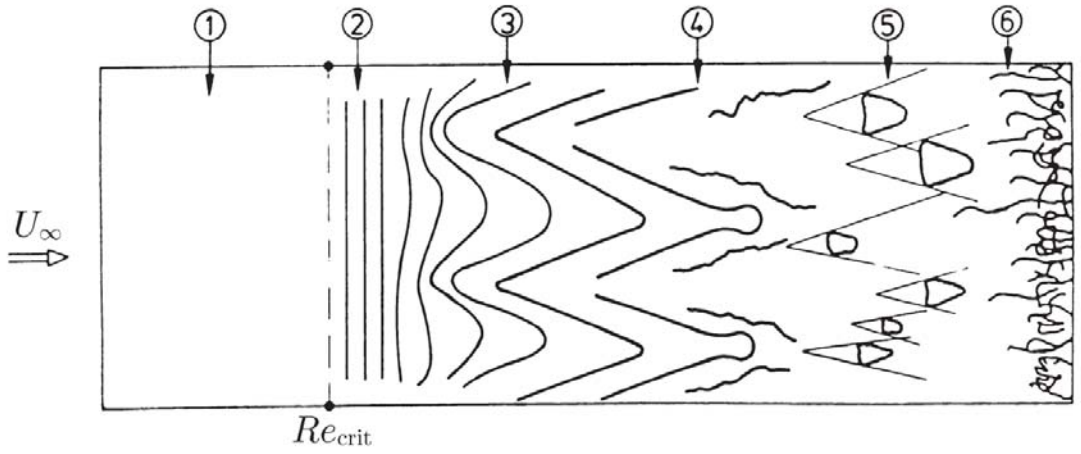
Klíčovým bezrozměrným parametrem určujícím zda proudění je laminární či turbulentní je Reynoldsovo číslo Re, které lze definovat jako poměr setrvačných a vazkých sil, které působí na částice tekutiny. Proudění při nízkých hodnotách Re je laminární. Například proudění potrubím kruhového průřezu bude turbulentní pro Reynoldsova čísla větší než několik tisíc, přesná hodnota závisí na úrovni poruch na vstupu a na drsnosti stěn trubky. Reynoldsova čísla charakterizující prakticky důležité případy proudění mohou dosahovat hodnot milionů až miliard. Toto platí do značné míry obecně pro různé případy smykových proudů. Ačkoli laminární řešení Navier-Stokesových rovnic lze získat pro libovolně vysoké hodnoty Reynoldsova čísla, toto řešení se při jistém konečném kritickém Reynoldsově čísle Re_{crit} stává nestabilním vzhledem k poruchám. V přesně definovaném případě posloupnost lineárních a nelineárních nestabilit (tj. primárních, sekundárních a vyšších řádů) vede přes více či méně rozsáhlý přechodový stav ke zcela vyvinutému turbulentnímu stavu.

Historii výzkumu přechodu do turbulence lze sledovat až do klasických experimentů prováděných Osbornem Reynoldsem v 19. století – Reynolds

(1883). Později Orr (1907) a Sommerfeld (1908) nezávisle na sobě odvodili linearizovanou rovnici stability. Orr-Sommerfeldovy rovnice mají dodnes základní význam ve výzkumu přechodu do turbulence. Podle teoretického popisu lineární fáze přechodu do turbulence, který provedli Tollmien (1929) a Schlichting (1933), byl proveden experiment s uměle vybuzenými Tollmien-Schlichtingovými vlnami v mezní vrstvě na desce Schubauer & Skramstad (1947). To znamenalo zásadní průlom v porozumění mechanismu přechodu. Zavedení teorie sekundární nestability Herbert (1988) umožnilo teoretické uchopení přechodu do turbulence a jeho prvních prostorových fází. Přehled výsledků získaných při výzkumu přechodu do turbulence je v článku Kachanov (1994) pro mezní vrstvu a v monografii Schmid & Henningson (2001). Pro případ inženýrských proudů podává přehled Mayle (1991).

Přehled přechodu laminárního proudění do turbulence je schematicky ukázán na obr. 1 pro kanonický případ mezní vrstvy na desce v pohledu kolmo na desku. Tekutina proudí podél desky laminárně (pozice ①), dokud se její pohyb v jistém místě, označeném jako Re_{crit}, nestane nestabilním. Dále po proudu jsou v mezní vrstvě generovány rovinné poruchy (pozice ②) známé jako Tollmien-Schlichtingovy vlny, které se rychle vyvíjejí v prostorové poruchy trojúhelníkového tvaru (pozice ③). Tyto vírové struktury potom mají tendenci se rozpadat a vytvářet lokální skvrny turbulence (*turbulence spot*) tím, že vytvářejí výrazné vlásečnicové víry (pozice ④). Ty dále rostou a interagují spolu, vznikají v prostoru náhodně distribuované skvrny turbulence (pozice ⑤), nakonec vzniká zcela vyvinutá mezní vrstva (pozice ⑥). Tím je přechod do turbulence ukončen.

Chování poruch v oblasti lze popsat linearizovaným modelem, růst poruch je tedy v čase exponenciální. Vývoj poruch v oblastech ③ a ④ může být charakterizován topologií, která je dána okrajovými podmínkami a na tvarem poruch. Typologii scénářů přechodu do turbulence rozpracoval Kachanov



Obr. 1 – Schéma klasické představy o přechodu mezní vrstvy na desce z laminárního stavu do turbulence

(1994). Obr. 1 odpovídá klasické topologii poruch v jedné řadě, jedná se o K-typ (Klebanoff). Další možností je výraznější uplatnění subharmonických procesů, potom dostáváme prostřídanou topologii struktur, scénář potom nazýváme H-typ (Herbert) nebo též N-typ (Novosibirsk). Jedním z dalších scénářů je tzv. O-typ (oblique), který vzniká při působení poruch ve tvaru šikmých vln Schmidt & Henningson (1992). Tyto scénáře jsou obvykle nazývány vynuceným přechodem (*forced transition*) a představují nejvýznamnější typy rozpadu při nízké úrovni okolní turbulence (intenzita turbulence Tu < 1%).

Před rokem 1940 nebyli experimentátoři schopni identifikovat Tollmien-Schlichtingovy vlny jakož i následné sekundární nestability v mezní vrstvě nebo v proudění v kanále. Mělo se za to, že přechod je způsoben jinými poruchami a jinými mechanismy jejich růstu. Morkovin (1969) prohlásil, že „můžeme mechanismus Tollmien-Schlichtingovy vln zcela přeskočit (*bypass*)“, tento typ přechodu do turbulence se od té doby nazývá „*bypass transition*“ čili zkrácený přechod. Při zkráceném přechodu se uplatňuje poněkud jiný mechanismus než exponenciální růst modálních vln podle lineárního modelu. Později se ukázalo, že tento mechanismus skutečně může být nastartován velkými poruchami, např. vysokou úrovní okolní turbulence. Nemodální růst poruch může vést k turbulenci při mnohem nižších Reynoldsových číslech, zdánlivě se přitom zcela přeskočí exponenciální růst, viz Reshotko (2001).

Dnes je již jasné, že všechny výše uvedené scénáře zahrnují v té či oné míře stejné prvky a mechanismy, které souvisejí se vznikem a vývojem koherentních struktur ve smykové vrstvě.

4. Koherentní struktury

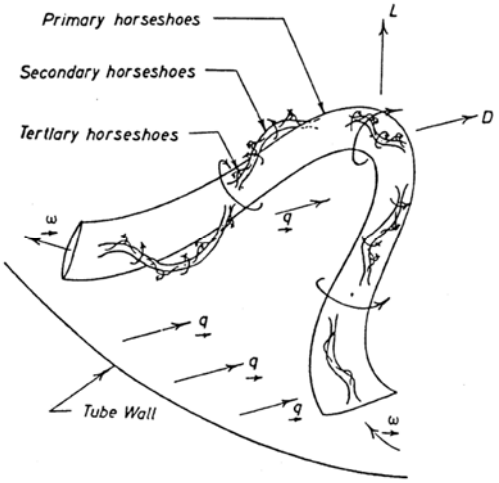
Dynamika turbulentního proudového pole a tedy i přechodu do turbulence je dána koherentními strukturami (*coherent structure*). Jedná se o silně dynamické útvary, které v proudící tekutině vznikají, bouřlivě se vyvíjejí, navzájem spolu interagují a opět zanikají či se přetvářejí. Je příznačné, že pro koherentní strukturu neexistuje ustálená definice. V tom nejobecnějším pojetí představuje oblast v proudící tekutině, která v daném čase vykazuje určitý stupeň organizovanosti vzhledem k nějaké veličině charakterizující proudění (rychlost, vířivost, tlak, hustota, teplota apod.). Někdy je pojem koherentní struktury ztotožňován s koherentním vírem v tekutině, tato definice je však příliš svazující, diskvalifikuje některé struktury, např. pruhy nízké rychlosti.

V přednášce se budeme podrobněji zabývat koherentními strukturami, které se vyskytují v přechodových a turbulentních mezních vrstvách. Konkrétně se jedná o vlásečnicové víry, podélné pruhy nízké rychlosti a tzv. „*bursting phenomenon*“.

Otázka identifikace koherentních struktur úzce souvisí s diskretizací spojitého systému, jakým je tekutina za účelem zkoumání jeho dynamického chování (Uruba 2006a, 2006b).

4.1. Vlásečnicové víry

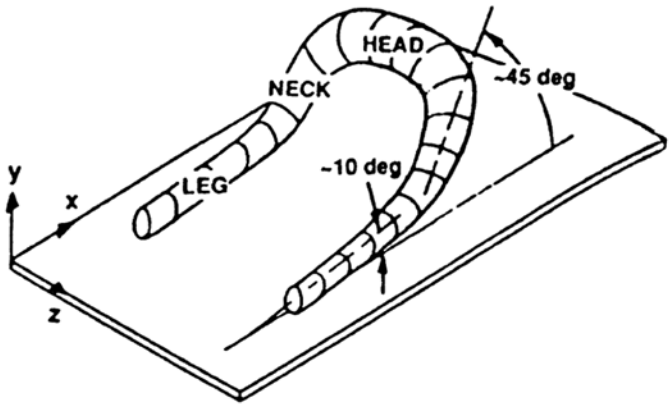
Vlásečnicové víry (*hairpin vortex*), též podkovovité (*horse-shoe*) či lambda víry, jsou obecně považovány za typické struktury, které se uplatňují při přechodu mezní vrstvy do turbulence. Jsou vlastně prostorovou fází vývoje Tollmien-Schlichtingových vln. Ukazuje se však, že tyto útvary hrají stejně důležitou roli v procesu „samoudržování“ (*self-sustaining*) či regenerace již zcela vyvinuté turbulentní mezní vrstvy.



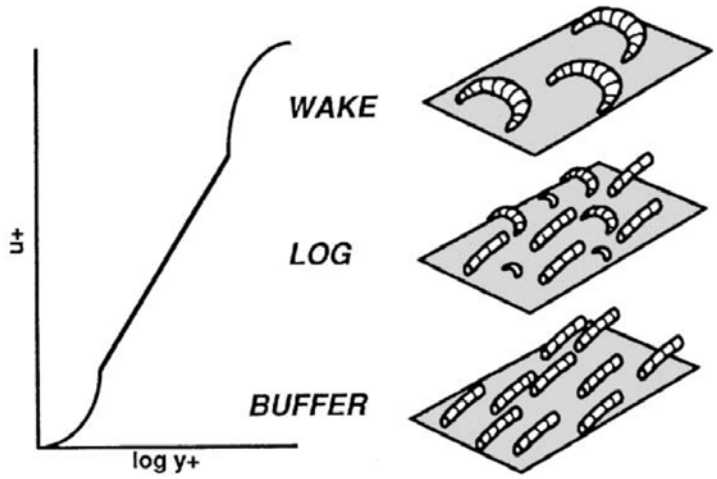
Obr. 2 – Podkovovitý vír dle Theodorsena

Theodorsen (1952) zkoumal mechanismy v turbulentním proudu při proudění v trubce a zavedl model podkovovitého vlásečnicového víru. Struktura tohoto dynamického útvaru sestávající z vírových útvarů je na originálním obrázku Theodorsena – obr. 2. Na obrázku je q rychlost proudění, L je vztlaková a D odporová síla, tyto silové účinky způsobují naznačenou deformaci vírového vlákna, která pokračuje v čase. Je zde také naznačen fraktální charakter tohoto útvaru, na primární struktuře vznikají sekundární a další pomocí stejného mechanismu.

Další pokrok při zkoumání těchto struktur poskytly výsledky přímé numerické simulace. Robinson (1991) podrobně zkoumal výsledky simulace získané Spalardem (1988). Robinson podrobně popisuje strukturu vlásečnicového víru, na obr. 3 je schematicky znázorněn typický tvar podkovovitého víru, který se skládá z čela, krků a ramen (*head, neck, legs*). Vlásečnicový vír na obr. 3 je v ideálním stavu, v proudu se však mohou vyskytovat různě deformované nebo i nekompletní struktury, pravidelný tvar je spíše výjimkou. Vlásečnicový vír je dynamickým útvarem s bouřlivým vývojem, který je dán interakcí se smykovým proudem vzniklým vlivem vnějšího proudu jakož i interakcí se sousedními strukturami. Vlivem



Obr. 3 – Vlásečnicový podkovovitý vír

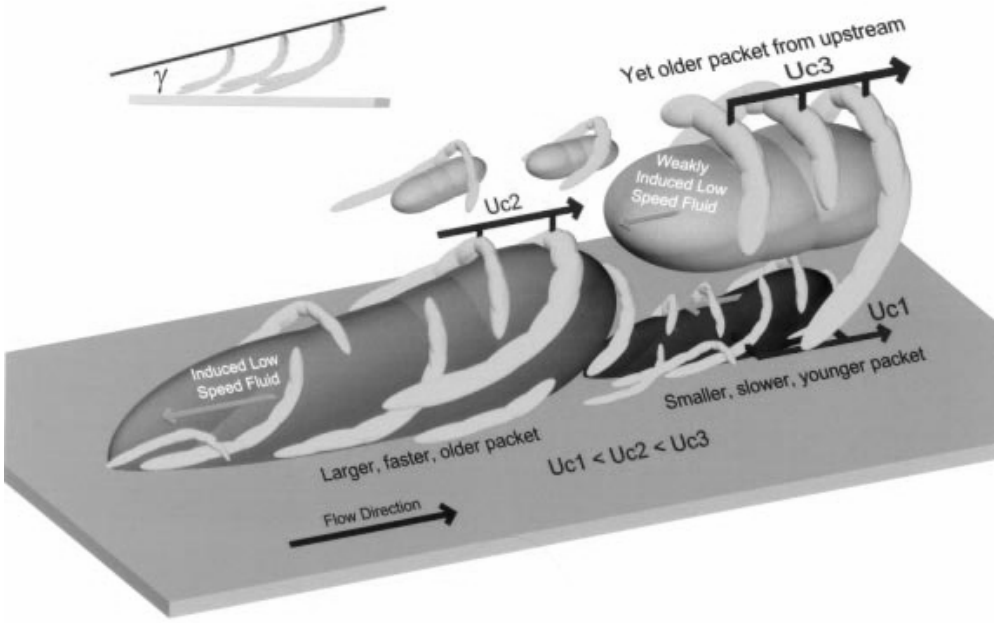


Obr. 4 – Typy koherentních vírů v turbulentní mezní vrstvě

konvekce dochází k protahování ramen, které potom tvoří podélné víry. Tyto víry hrají významnou roli v mechanismu vzniku a udržování turbulentní struktury v mezní vrstvě. Výše popsaný mechanismus vzniku podélných vírů je pouze jednou z více možností.

Z tvaru vlásečnicového víru na obr. 3 je zřejmé, že podélné víry se vyskytují převážně ve vnitřní části mezní vrstvy v blízkosti stěny v zásobníkové vrstvě (*buffer layer*), zatímco v blízkosti vnějšího okraje v oblasti úplavu (*wake*) jsou převážně příčné vírové struktury. V oblasti mezi výše jmenovanými (oblast logaritmického zákona) můžeme pozorovat směs obou typů vírových struktur. Situace je znázorněna na obr. 4.

Vlásečnicové víry se mohou sdružovat do „balíků“ (*packets*). Koncepce balíků vlásečnicových vírů byla navržena Adrianem et al. (2000). Na obr. 5 jsou schematicky zobrazeny 3 balíky vlásečnicových vírů. Světlou barvou je naznačena vířivost vlásečnicových vírů, zatímco velké tmavé struktury



Obr. 5 – Balíky vlásečnicových vírů

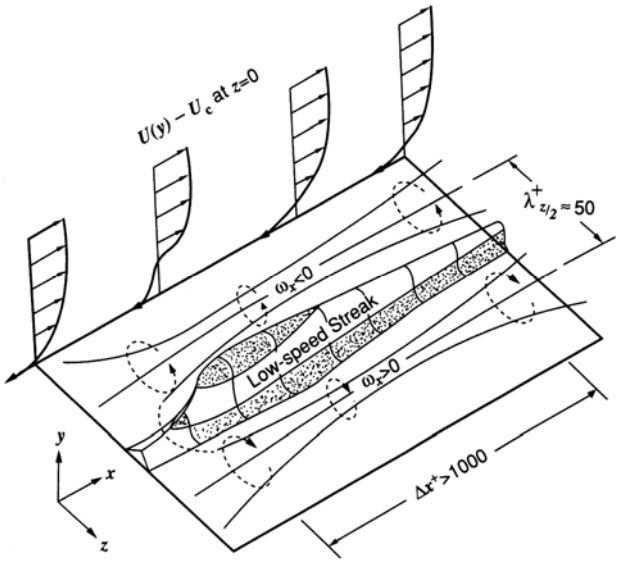
představují oblasti nízké rychlosti. Vlásečnicové víry jsou generovány v balíku, v první fázi jsou drženy dohromady během růstu, později se přesouvají do oblasti vnějšího proudění. Adrian dále pozoroval výskyt poměrně velkých oblastí téměř konstantní rychlosti v příčném směru a soudí, že jsou tvořeny balíky organizovaných vírů, přičemž počet vírů v jednotlivém balíku je funkcí Reynoldsova čísla. Struktura těchto balíků je složitá, fraktální – uvnitř velkých balíků se vyskytují menší. Výsledky na obr. 5 odpovídají Reynoldsovu číslu $Re = 6845$, tato hodnota je všeobecně považována za dostatečně vysokou, aby turbulentní proudění v mezní vrstvě bylo zcela vyvinuté. Velikost balíku vlásečnicových vírů je asi $0{,}8\,\delta$ na výšku a $2\,\delta$ podélně ve směru proudění (δ je tloušťka mezní vrstvy).

Vznik balíků vlásečnicových vírů souvisí s kladnou zpětnou vazbou mezi procesem generování pruhů nízké rychlosti vlásečnicovým vírem a naopak nových vlásečnicových vírů účinkem pruhů.

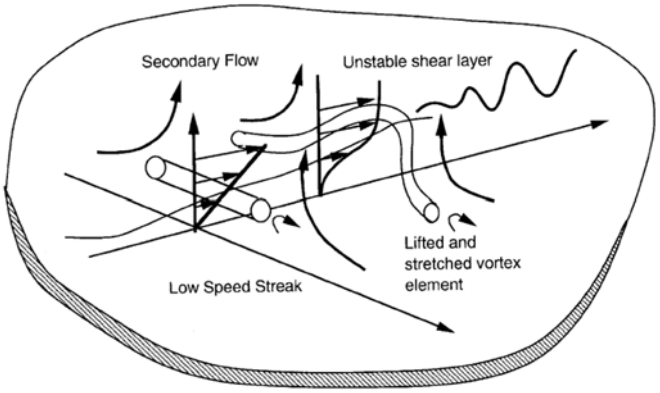
4.2. Pruhy nízké rychlosti a *bursting phenomenon*

Pruhy nízké rychlosti hrají velmi důležitou roli v procesu generování turbulence. Byly pozorovány v oblasti blízko stěny, mají orientaci ve směru proudu – viz obr. 6.

Produkce Reynoldsových napětí má intermitentní povahu. Tento proces produkce se nazývá *bursting phenomenon* (neexistuje ustálený český ekvivalent). Proces začíná protaženou vírovou dvojicí proti sobě rotujících vírů, které jsou orientovány ve směru hlavního proudu s průměrem asi $40\nu/u_\tau$. Tyto víry, mohou jimi být ramena vlásečnicového víru, jsou ovlivněny silným smykem a indukují oblasti nízké a vysoké rychlosti mezi nimi. Víry a další struktury se vyskytují náhodně v prostoru i v čase, avšak pseudoperiodicky, střední vlnová délka v příčném směru je asi 80 až 100 stěnových jednotek, jak poprvé pozoroval Kline et al. (1967). Kline také zaznamenal, že oblasti nízké rychlosti se po proudu vyvíjejí, vznikají profily střední rychlosti s inflexním bodem, které jsou nestabilní i podle nevazké teorie. V těchto místech dochází k oscilacím mezi oblastmi nízké a vysoké rychlosti, toto je příznakem vzniku



Obr. 6 – Pruh nízké rychlosti dle *Blackweldera (1978)*



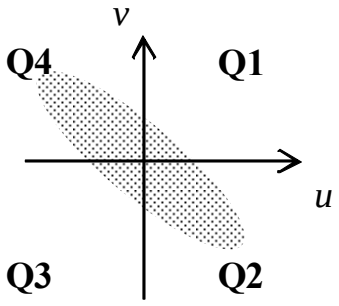
Obr. 7 – Klinova představa mechanismu *bursting phenomenon*

sekundární nestability. Oblasti nízké rychlosti jsou potom odtlačovány směrem od stěny (*lift-up*) při zvyšující se amplitudě oscilací a následuje náhlý přechod do turbulence. Tento proces je velmi rychlý, Kline jej proto nazývá *burst*. Corino a Brodkey (1969) ukázali, že oblasti nízké rychlosti jsou poměrně úzké a mohou mít i nezanedbatelnou složku v příčném směru. Prakticky veškerá produkce turbulentní kinetické energie v oblasti blízko stěny probíhá pomocí tohoto mechanismu.

Na význam pruhů nízké rychlosti již poukázal Kline et al. (1967). Termín pruh (*streak*) souvisí s vizualizací proudění pomocí kouře, kouř se shromažďuje právě v oblastech s nízkou rychlostí. Obecněji jsou pruhy chápány jako oblast proudění s oscilacemi rychlosti v příčném směru, složka vířivosti ve směru hlavního proudu je zde zanedbatelně malá. Výskyt pruhů má důležité důsledky pro stabilitu proudění v mezní vrstvě. Kline pozoroval, že kouř se postupně oddaluje od stěny, začíná oscilovat a náhle exploduje, tento jev nazval *bursting phenomenon* – viz obr. 7.

Corino a Brodkey (1969) doplnili Klinovu představu o poslední fázi, totiž proniknutí tekutiny z vnějšku. Tak byla dopracována představa *bursting phenomenon* jako dvojice koherentních událostí vypuzení (*ejection*) a proniknutí (*sweep*). Bogard a Tiederman (1987) později ukázali, že jeden *burst* typicky obsahuje více fází vypuzení. Jednotlivé vlásečnicové víry mohou generovat události typu vypuzení, zatímco balík vlásečnicových vírů (viz obr. 5) generuje celou sérii těchto událostí, která je typická pro *bursting phenomenon*.

Fluktuace rychlosti ve směru hlavního proudu u a kolmo ke stěně v můžeme zobrazit v grafu na obr. 8 rozděleném na 4 kvadranty. Stavy znázorněné v kvadrantech Q2 a Q4 představují produkci Reynoldsova napětí. Q2 lze interpretovat jako událost proniknutí a Q4 potom jako vypuzení.



Obr. 8 – Definice kvadrantů „událostí“

Až v poslední době byl *bursting phenomenon* podrobněji prozkoumán. Falco (1991) ukázal, že typický vír vzniklý vytlačením tekutiny od stěny, který se pohybuje

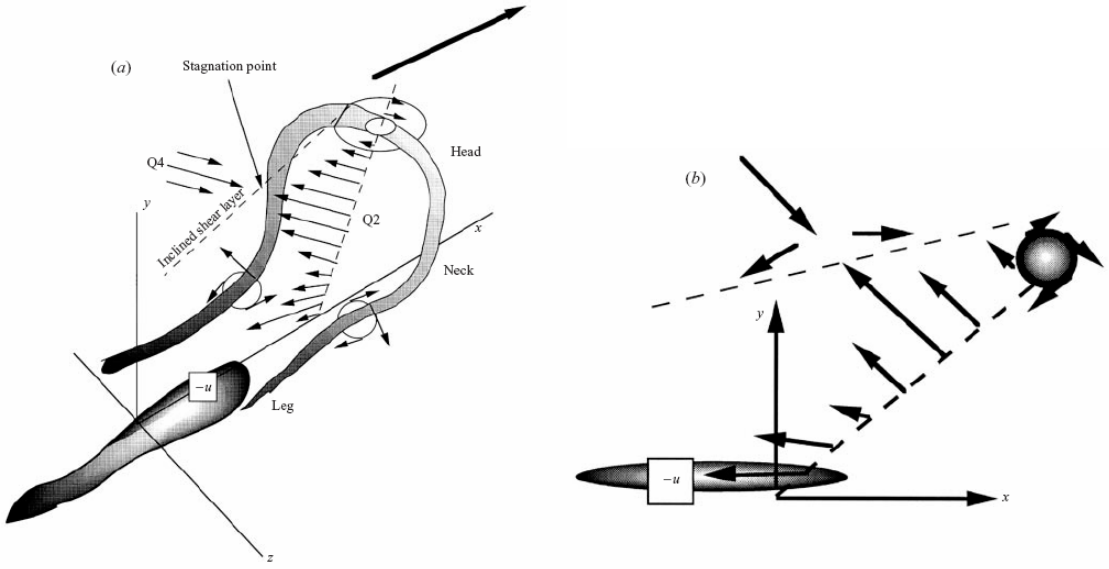
proti stěně, indukuje silnou událost proniknutí charakteristickou vysokou hodnotou $\overline{uv}$ (u kladné, v záporné). Oblast u stěny je neustále bombardována takovými balíky tekutiny s vysokou rychlostí, které mají svůj původ v logaritmické nebo vnější oblasti. To má za následek tendenci ke vzniku a dalšímu zesilování inflexního charakteru profilu rychlosti zesilováním okamžitého smyku, tím se podporuje vznik a zesilování nestabilit.

Termín „*bursting phenomenon*“ poprvé použil Rundstadler et al. (1963) v souvislosti s produkcí turbulence v mezní vrstvě pomocí náhlé erupce tekutiny v bezprostřední blízkosti stěny, jev samotný popsal již Klebanoff et al. (1962). Tato definice je obvyklá v literatuře zabývající se fyzikou turbulentního proudění. Význam termínu se však vyvíjel během času, postupně se rozšiřoval, dodnes není ustálený. Uvedeme nyní některá typická pojetí:

- náhlý rozpad pruhu nízké rychlosti po oddálení (*lift-up*) od stěny (Rundstadler et al. 1963, Kline et al. 1967),
- proces vývoje pruhu nízké rychlosti ve 3 fázích: 1. oddálení (lifting) od stěny, 2. oscilace, 3. rozpad (*breakdown*) (Kim et al 1987, Blackwelder 1989),
- koherentní událost ve smykové vrstvě ohraničená na začátku tekutinou vysoké rychlosti – proniknutí (*sweep*) a na konci tekutinou nízké rychlosti – vypuzení (*ejection*) (mnoho autorů od 70. let min.stol. po dnešek, např. Uruba et al. 1995, Uruba 1995),
- výskyt místní události, která je detekována pomocí speciálního detekčního kriteria (mnoho autorů od 70. let min.stol. po dnešek, např. Uruba et al. 1997b),
- mechanismus produkce Reynoldsových napětí.

Většina definic bursting phenomenon popisuje silně intermitentní, explosivní proces, který souvisí s produkcí turbulentního pohybu. Poslední výzkumy ukazují značně odlišný obraz. V tomto novém scénáři je způsob produkce turbulence v blízkosti stěny není ve formě poryvů, intermitentní je spíše v prostoru než v čase. Jinými slovy místa produkce turbulence v zásobníkové vrstvě se objevují ve formě skvrn v rovině xz, přitom však přetrvávají po značně dlouhou dobu. Procházení takovýchto oblastí produkce místem stojící sondy nebo zvyšování koncentrace stopovacího materiálu může vytvářet náhlé změny rychlosti v místě měření po omezený čas, přitom je nebezpečí nesprávné interpretace ve spojení s pohybem vírových struktur.

Výsledky matematických simulací turbulence ukazují, že při nízkých Re je v blízkosti stěny charakteristické naklápění kvazipodélných vírů (tj. vírů orientovaných převážně ve směru proudění x). V řadě posledních publikací (Kim, 1987, Guezennec et al 1989, Robinson 1991) je *bursting phenomenon* zkoumaný v pevném bodě prostoru je chápán jako průlet jednotlivých kvazipodélných vírů s relativně dlouhou dobou života, které vypuzují tekutinu s nízkou rychlostí od stěn. Víry v blízkosti stěny ve tvaru oblouků a orientované příčně vzhledem k proudu také generují silné erekční pohyby, je jich však



Obr. 9 – Vlásečnicový vír a indukované rychlostní pole

podstatně méně než kvazipodélných vírů v zásobníkové vrstvě, kde podle pozorování proces *bursting phenomenon* začíná.

Obrázek 9a schematicky zobrazuje kvalitativní obraz rychlostního pole indukovaného idealizovaným (ne nutně symetrickým) vlásečnicovým vírem v rovině *xy* definované směrem proudu a kolmicí ke stěně procházející středem vlásečnicového víru podle Adrian et al. (2000). Rychlostní pole v rovině *xy* (viz řez na obr. 9b) má následující vlastnosti:

- jádro víru v příčném směru (tj. kolmo k proudu) rotuje se stejnou orientací cirkulace, jaká přísluší cirkulaci smykové vrstvy,
- oblast tekutiny s nízkou hybností umístěná pod a před čelem víru, je indukovaná prouděním spojeným s vířivostí v čele a krku vlásečnicového víru,
- sklon v této části víru vzhledem ke směru *x* je 35-50° a v oblasti ramen se stává tečnou ke stěně.

V zásobníkové vrstvě se tedy ramena vlásečnicového víru stávají kvazipodélnými víry, vytvářejí oblast nízké rychlosti nad vírem. Podobný jev byl pozorován při simulacích (Adrian, Moin & Moser 1987; Kim 1987), kde kvazipodélné víry způsobují oddalování tekutiny od vazké podvrstvy na stěně a vytváří tak v blízkosti stěny pruhy nízké rychlosti, které jsou pozorovány v zásobníkové vrstvě (Robinson 1993).

Často je pozorována Q4 událost v oblasti nad pruhem nízké rychlosti (viz obr. 9a), interakce událostí Q2 a Q4 potom vytváří stagnační bod a skloněnou smykovou vrstvu. Vznik Q4 události pozorovaná v souřadné soustavě pohybující se s vírem lze vysvětlit pohybem tohoto víru, který je poněkud pomalejší než okolní tekutina. Tyto výsledky numerických simulací byly potvrzeny měřeními pomocí metody PIV (Adrian & Moin 1988). Tato kombinace kruhových proudnic a skloněné oblasti Q2/Q4 událostí (obr. 9b) je

často nazývána „podpisem“ (*signature*) vlásečnicového víru a je používána k jeho detekci (Adrian et al. 1987; Adrian 1996; Zhou et al. 1999).

Lze tedy shrnout, že existují dvě koncepce pro *bursting phenomenon*:

- bouřlivá, v čase intermitentní erupce tekutiny směrem od stěny spolu s lokální nestabilitou,
- lokalizované vypuzení tekutiny směrem od stěny, které je způsobené průletem jednoho nebo více skloněných kvazipodélných vírů, ty mají dobu života podstatně delší než pozorované ejekční pohyby.

Oba přístupy předpokládají vírové struktury, rozdílem je stupeň intermitence v čase a zdali je zapojena nestabilita.

V každém případě lze prohlásit, že pruhy nízké rychlosti a *bursting phenomenon* jsou průvodními jevy dynamického chování vlásečnicových vírů v mezní vrstvě.

5. Závěr

Turbulentní proudění je vysoce dynamický proces, stejně jako přechod do turbulence. Dynamické chování je úzce spojeno s výskytem a vývojem tzv. koherentních struktur. V přednášce byly ukázány některé scénáře a mechanismy, které se uplatňují při vzniku a vývoji turbulentního proudění v mezní vrstvě. Pozornost byla věnována jednak scénářům ranného stádia přechodu mezní vrstvy do turbulence, dále potom mechanismům produkce turbulence pomocí *bursting phenomenon* v pozdějších fázích procesu. Obdobný mechanismus se uplatňuje i ve zcela vyvinuté turbulentní mezní vrstvě.

Autor publikoval řadu prací na téma detekce *bursting phenomenon* a jeho vývoje v mezní vrstvě při zkráceném přechodu do turbulence.

6. Literatura

Odkazy na zdroje a relevantní publikace autora.

6.1. Odkazy

Adrian, R. J., 1996, Stochastic estimation of the structure of turbulent fields, In: Eddy Structure Identification (ed. J. P. Bonnet), Springer, pp.145-195.

Adrian, R. J., Moin, P. & Moser, R. D., 1987, Stochastic estimation of conditional eddies in turbulent channel flow. Proc. 1987 Summer Program, Report CTR-S87, Center for Turbulence Research, Stanford University, Stanford, CA., pp.7-19.

Adrian, R. J. & Moin, P., 1988, Stochastic estimation of organized turbulent structure: homogeneous shear flow. J. Fluid Mech. 190, pp.531-559.

Adrian, R.J., Meinhart, C.D., Tomkins, C.D., 2000, Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer. J Fluid Mech; 422, pp.1–54.

Blackwelder, R.F., 1989, “Some ideas on the control of near-wall eddies”, AIAA Pap.No.89-1009.

Bogard, D.G., Tiederman, W.G., 1987, Characteristics of ejections in turbulent channel flow. J Fluid Mech. 179, pp.1-19.
Corino, E.R., Brodkey, R.S, 1969, A visual investigation of the wall region in turbulent flow, J.Fluid Mech. 37, pp.1-30.
Falco, R.E., 1991, A coherent structure model of the turbulent boundary layer and its ability to predict Reynolds number dependence, Phil.Trans.R.Soc.London A336, pp.103-129.
Guzennec, Y.G., Piomelli, U., Kim, J., 1989, On the shape and dynamics of wall structures in turbulent channel flow, Phys.Fluids A 1(4), pp.764-766.
Herbert, T., 1988, Secondary instability of boundary layers. Annu.Rev.Fluid Mech. 20, pp.487–526.
Kachanov, Y.S., 1994, Physical Mechanisms of Laminar-Boundary-Layer Transition, Annu.Rev.Fluid Mech. 26, pp.411-482.
Kim, J., 1987, "Evolution of a vortical structure associated with the bursting event in a channel flow", In: Turbulent Shear Flows 5 (ed. F. Durst, B. E. Launder, J. L. Lumley, F. W. Schmidt & J. H. Whitelaw), Springer, pp.221-233.
Kim, J., Moin, P., Moser, R.D., 1987, "Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number", J Fluid Mech. 177, pp.133-166.
Kline, S.J., 1967, "Observed structure features in turbulent and transitional boundary layers", In: Fluid Mechanics of Internal Flow, ed. G.Sovran, pp.27-79.
Klebanoff, P., Tidstrom, K.D. & Sargent, L.M., 1962, "The three-dimensional nature of boundary layer transition", J. Fluid Mech. 12, pp.1-34.
Lesieur, M., 1997, "Turbulence in Fluids", Kluwer Academic Publishers.
Mayle, R. E., 1991, "The role of laminar-turbulent transition in gas turbine engines", J. Turbomachinery 113, pp.509–537.
Morkovin, M. V., 1969, "On the many faces of transition", In: Viscous drag reduction (ed. C. S. Wells), Plenum Press, New York, USA, pp.1–31.
Orr, W. M. F., 1907, "The stability or instability of the steady motions of a perfect liquid and of a viscous liquid. Part I. A perfect liquid, Part II. A viscous liquid", Proc. R. Irish Acad. 27, pp.9–68.
Reshotko, E., 2001, "Transient growth: A factor in bypass transition", Phys. Fluids 13 (5), pp.1067–1075.
Reynolds, O., 1883, "On the experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous", Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A 174, pp.953–982.
Robinson, S.K., 1991, "Coherent motions in the turbulent boundary layer", Annu Rev Fluid Mech. 23, pp.601-639.
Robinson, S. K., 1993, "The kinematics of turbulent boundary layer structure", NASA Tech. Mem. 103859.

Rundstadler, P.G., Kline, S.J., Reynolds, W.C., 1963, “An experimental investigation of flow structure of the turbulent boundary layer”, Rep.No.MD-8, Dep.Mech.Eng. Stanford Univ.

Schlichting, H., 1933, “Zur Entstehung der Turbulenz bei der Plattenstromung”, Z. Angew. Math. Mech. 13, pp.171–174.

Schubauer, G. B. & Skramstad, H. K., 1947, “Laminar boundary layer oscillations and the stability of laminar flow”, J. Aeronaut. Sci. 14, pp.69–78.

Schmid, P. J. & Henningson, D. S., 1992, “A new mechanism for rapid transition involving a pair of oblique waves”, Phys. Fluids A 4 (9), pp.1986–1989.

Schmid, P. J. & Henningson, D. S., 2001, “Stability and transition in shear flows”, Springer, Berlin, Germany.

Sommerfeld, A., 1908, “Ein Beitrag zur hydrodynamischen Erklarung der turbulenten Flussigkeitsstromung”, In Atti. del 4 Congr. Internat. dei Mat. III, pp.116–124. Rome, Italy, in German.

Spalart, P.R., 1988, “Direct numerical simulation of a turbulent boundary layer up to Re = 1410”, J Fluid Mech, 187, pp.61-98.

Theodorsen, T., 1952, “Mechanism of turbulence”, Proceedings of the Second Midwestern Conference on Fluid Mechanics, Ohio State University, pp.1–18.

Tollmien, W., 1929, “Uber die Entstehung der Turbulenz”, Nachr. Ges. Wiss. Gottingen 1, pp.21–44, in German.

Zhou, J., Adrian, R.J., Balachandar S, Kendall TM., 1999, “Mechanisms for generating coherent packets in wall turbulence”, J Fluid Mech. 387, pp.353–396.

6.2. Relevantní práce autora

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 1995, “The Effect of the Dissipation Length Scale of the Outer-Stream Turbulence on the Flat-Plate Transitional Boundary Layer”, In: Proceedings of EUROMECH Colloquium 330, April 10-12, pp.29-30.

Mazur, O., Uruba, V., Jonáš, P., 1995, “Spectral Analysis of the Flow in a Boundary Layer Disturbed by the Outer Stream”, In: Proceedings of EUROMECH Colloquium 330, April 10-12, pp.37-38.

Uruba, V., Jonáš, P., Mazur, O., 1995, “A Contribution to the Study of the Bursting Phenomenon in a Transitional Boundary Layer”, In: Proceedings of EUROMECH Colloquium 330, April 10-12, pp.57-58.

Uruba, V., 1995, “Coherent Motions in transitional boundary layer“, In: Proceedings of colloquium Dynamics of Fluids ‘95, (Ed.: Jonáš, P.), Praha October 24-26, 1995, pp.67-68.

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 1996a, "Bypass transition of boundary layer in turbulent flows with various length scales", (in Czech), In: Proceedings of Engineering Mechanics '96, Svratka, May 13-16, 1996, pp.35-40.

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 1996b, "On the Boundary Layer Transition in Turbulent Flows with Various Length Scales", In: S.Gavrilakis, L.Machiels and P.A.Monkewitz (Eds.): Advances in Turbulence VI, Kluwer Academic Publishers, pp.345-346.

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 1997a, "Additional Findings on the Effect of the Length Scale in the By-Pass Transition", In: EUROMECH Colloquium 359, University of Stuttgart, March 10-13, 1997, p.38.

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 1997b, "Experimental Study of the Role of the Length Scale in By-PassTransition", In: Proceedings EUROMECH 3rd European Fluid Mechanics Conference, 15-18 Sept. 1997, Göttingen, p.164.

Uruba, V., Jonáš, P., Mazur, O., 1997a, "Bursting Phenomenon in Transitional Boundary Layer", (in Czech), In: Proceedings of Engineering Mechanics '97, Svratka, May 12-15, 1997, vol.4, pp.191-196.

Uruba, V., Jonáš, P., Mazur, O., 1997b, "Investigation of the Bursting Phenomenon in Transitional Boundary Layers", In: Proceedings of 11th Symposium on Turbulent Shear Flows, Grenoble, September 8-10, 1997, pp. P2-77 – P2-82.

Mazur, O., Jonáš, P., Uruba, V., 1997, "A Contribution to the Investigation of the Mean Flow Development in the Course of a Boundary Layer By-Pass Transition", In: Proceedings of colloquium Dynamics of Fluids '97, (Ed.: Jonáš, P., Uruba, V.), Praha 21.-23.10.1997, pp.33-34.

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 1998a, "Statistical characteristics of the wall skin friction within the by-pass transition of a flat plate boundary layer", In. Book of Abstracts, Annual Meeting GAMM´98, University of Bremen April 6 - 9, 1998, Bremen, 1998, pp.61-62

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V. 1998b, „Measurement of statistical characteristics of skin friction by means hot wire anemometer", (in Czech) In. Proceedings of the 15th Symposium on Anemometry, Ed. Pejchal V., Úvaly 26 - 27 May 1998, VUT Brno.

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 1998c, "Shift of the By-pass Transition Onset Due to the Incoming Turbulence Length Scale", In: Proceedings of colloquium Dynamics of Fluids '98, (Ed.: Jonáš, P., Uruba, V.), Praha 20-22 October 1998, pp.27-30.

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 1999a, "Statistical characteristics of the wall friction in a flat plate boundary layer through by-pass transition", ZAMM – Z. angew. Math. Mech. 79 (1999) S3, S691-692.

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 1999b, "Experiments on by-pass boundary layer transition with several turbulent length scales", In: Proceedings of 3rd

European Conference on Turbomachinery, 2 -5 March 1999, London, pp.179-188.
Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 1999c, "Investigation of velocity fluctuation amplification through the by-pass laminar/turbulent transition", (in Czech) In: Proceedings of Engineering Mechanics '99, Svratka, May 17-20 1999, vol.3, pp.683-686.
Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 1999d, "Example of the onset and termination of by-pass transition correlation with turbulence length scale", In: Proceedings of colloquium Dynamics of Fluids '99, (Ed.: Jonáš, P., Uruba, V.), Praha 19-20 October 1999, pp.95-102.
Jonáš, P, Mazur, O., Uruba, V., 2000a, „An Example of By-Pass Transition Control", In: Proceedings of Engineering Mechanics 2000, Svratka, May 15-18 2000, vol.IV, pp.173-178.
Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 2000b, "On the receptivity of the by-pass transition to the length scale of the outer stream turbulence", Eur. J. Mech. B - Fluids 19 (2000), pp.707-722.
Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 2000c, "Two Ways of Manipulation with the Onset of Boundary Layer By-pass Transition", In: Book of Abstracts, 4th EUROMECH Fluid Mechanics Conference, 19 – 23 November 2000, Eindhoven, p.252.
Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 2001a, "A comment on the choice of intermittency measurement method for by-pass transition investigation", In: Proceedings of the conference Topical Problems of Fluid Mechanics '2001, Praha 21/2/2001, pp.77-80.
Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 2001b, "Intermittency distributions in transitional boundary layers under flows with various scales of turbulence", In: Book of abstracts, GAMM 2001 Annual Scientific Conference, February 12 – 15, 2001, Zurich, p.65.
Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 2001c, "On the Intermittent Nature of the Flow Structure at By-pass Transition of a Flat Plate Boundary Layer", In: Proceedings of Engineering Mechanics 2001, Svratka, May 14-17 2001, pp317-318.
Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 2001d, "By-pass transition experimental study with a control of outer stream turbulence scales", In.: Proc. Tsfp-2, E.Lindborg et al. (eds.), vol.II, KTH Universitetsservice us ab, Stockholm, pp.51-55.
Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 2001e, „Die intermittente Natur der Strömung in der Übergangsgrenzschicht", In: Beiträge zur Strömungsmechanik, eds. Heller, W., Klingenberg, J., Dresden, pp.153-163.
Jonáš, P., Mazur, O., Stepien, M., Uruba, V., 2001, "Comment on the Application of the Intermittency Factor measurement to Increase the accuracy of the Determination of the Boundary Layer Transition Start", In:

Proceedings of Colloquium Dynamics of Fluids 2001, (Ed.: Jonáš, P., Uruba, V.), Praha, October 24-25, 2001, pp.31-35.

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 2002a, "Generalization of Narasimha's Approximation of Intermittency Distribution for By-Pass Transition", In: Book of abstracts, GAMM 2002 Annual Scientific Conference, March 25 – 28, 2002, Augsburg, p.71.

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 2002b, "Approximation of the distribution of the intermittency factor in the course of boundary layer by-pass transition", " In: Proceedings of Engineering Mechanics 2002, Svratka, May 13-16 2002, CDROM, 6 pages.

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 2002c, "Problem of the intermittency distributions in transitional boundary layers under flows with various scales of turbulence", PAMM, Proc. Appl. Math. Mech., 1, 2002, pp.298-299.

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 2002d, "Wall-friction intermittency in transitional flat plate boundary layer in turbulent free stream", Advances in Turbulence IX, July 2-5, 2002, Southampton, K, p.847.

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 2002e, "Preliminary Results of Conditional Analysis of the Wall-Friction during Boundary Layer Transition", In: Proceedings of Colloquium Dynamics of Fluids 2002, (Ed.: Jonáš, P., Uruba, V.), Praha, October 23-25, 2002, pp.77-80.

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., Stepieň, M., 2002, "Investigation of the intermittency factor in a transitional boundary layer near the wall", Turbulence, vol.8-9, pp.189-198

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 2003, "Conditional analysis of the wall friction histograms in transitional boundary layers". In: Proceedings of Engineering Mechanics 2003, Svratka, May 12-15 2003, CDROM, 6 pages.

Jonáš, P., Wysocki, M., Elsner, W., Mazur, O., Uruba, V., 2003, "Application of Hot-Film Technique in Analysis of Transitional Boundary Layers", In: Proceedings of Colloquium Fluid Dynamics 2003, (Ed.: Jonáš, P., Uruba, V.), IT AS CR, Prague, October 22-24, 2003, pp.51-54.

Wysocky, M., Elsner, W., Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 2003, "A Note on the Effect of the Thermal Conduction from a Wall-Hot-Film Sensor into the Wall", In: Proceedings of Colloquium Fluid Dynamics 2003, (Ed.: Jonáš, P., Uruba, V.), IT AS CR, Prague, October 22-24, 2003, pp.179-182.

Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V., 2004, "Some results of the conditional analysis of the skin friction in transitional boundary layers", In: Advances in Turbulence X, Procedings of the 10th European Turbulence Conference, Editors: H.I.Anderson, P.-A.Krogstad, Trondheim, Norway, June 29 – July 2, 2004, p.811.

Uruba, V., 2005, "Research on Turbulence Using Dynamical Systems Analysis Methods", In: Proceedings of the Session 10, Fluid Mechanics and Mechanisms. International scientific conference, VŠB TU Ostrava, pp.185-190.

Uruba, V., 2005, “Náhoda v exaktní vědě”, Essentia, http://www.essentia.cz, ISSN 1214-3464.
Uruba, V., 2006a, „Metody analýzy rozlehlých dynamických systémů s aplikací na tekutinové systémy”, In.: Modelování a měření nelineárních jevů v mechanice, Nečtiny, Vědeckotechnická společnost ŠKODA, (Ed.: Matas, R.), s.223-232.
Uruba, V., 2006b, „Dynamika turbulentních stěnových proudů”, In.: Modelování a měření nelineárních jevů v mechanice, Nečtiny, Vědeckotechnická společnost ŠKODA, (Ed.: Matas, R.), s.211-222.
Uruba, V., 2006c, “Pořádek, nepořádek, chaos a turbulence”, Essentia, http://www.essentia.cz, ISSN 1214-3464.

7. Curriculum vitae

Ing.Václav Uruba, CSc. Narozen 1957, vystudoval obor Aplikovaná mechanika na strojní fakultě ČVUT v Praze (1981), vědeckou hodnost CSc. získal v Akademii věd – dynamika plynů (1991). V letech 1981 až 1984 pracoval v Ústavu pro výzkum motorových vozidel, kde se zabýval dynamickou pohonů. Od roku 1984 je zaměstnancem Ústavu termomechaniky akademie věd, od roku 1995 je vedoucím oddělení dynamiky tekutin.

Zabývá se experimentálním výzkumem v oblasti dynamiky tekutin, konkrétně se jedná o projekty z oblasti interakce proudu s elastickým povrchem, přechodovou mezní vrstvou, interakcí paprsků s proudem, difusí skalárů v komplexním proudu, proděním v kanálu s drsnými stěnami, stěnovými proudy, sekundárním prouděním v zakřiveném kanále. V poslední době se intenzivně věnuje studiu možností aktivního řízení proudění. Dále se zabývá aplikací, realizací a rozvojem experimentálních metod pro měření rychlosti a koncentrace stejně jako speciálními metodami používanými pro měření v reálných strojích (parní turbína).

V roce 1993 absolvoval roční pobyt na University of Poitiers (Francie) v laboratořích transsonického proudění, kde studoval interakci horkého paprsku s příčným proudem. V roce 2006 absolvoval 2 měsíční stáž na Queen’s University Belfast (UK), School of Aeronautical Engineering na téma aktivní řízení proudění při obtékání leteckých profilů.

Je spolupořadatelem pravidelné konference “Colloquium Fluid Dynamics”.

Je nebo byl odpovědným řešitelem nebo spoluřešitelem 7 grantových projektů, 2 projektů Grantové agentury ČR, 2 projektů Grantové agentury AVČR a 3 mezinárodních grantů COST.

Přednáší předměty „Turbulence“, „Smykové oblasti“ a „Základy inženýrského experimentu – mechanika tekutin“ na ČVUT v Praze, FS.

Publikoval více než 180 článků v odborných časopisech a příspěvků na konferencích, z nichž většina je v angličtině.

Je členem GAMM, EUROTECH Society a České společnosti pro mechaniku.

Je ženatý, má 3 děti.