



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

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

**APROXIMACE PRŮBĚHU FAKTORU INTERMITENCE PŘI ZKRÁCENÉM
PŘECHODU MEZNÍ VRSTVY DO TURBULENCE**

Pavel Jonáš, Oton Mazur, Václav Uruba*

***Summary:** The distribution of the intermittency factor γ is discussed in the case of boundary layer by-pass transition. Taking into consideration the turbulent outer stream flow, the approximation of Narasimha [1] is modified for the intermittency distributions which does not start from zero value near the location of the origin of the transition region. Both the original approximation of Narasimha and the modified one are correlated with experiment.*

***Key words:** boundary layer, by-pass transition to turbulence, intermittency factor, transitional boundary layer.*

Úvod

Jev přechodu mezní vrstvy do turbulence je dávno známý leč stále významný a aktuální badatelsky i pro technické aplikace ve vnější a vnitřní aerodynamice. Význam přechodu vyplývá z toho, že během tohoto procesu dochází k dramatickým změnám v intenzitě přenosových a difúzních procesů. Proto jsou důležité podrobné poznání průběhu přechodu, jeho závislosti na různých faktorech a schopnost předpovědět místo začátku a rozlohu oblasti ve které přechod nastane. Od čtyřicátých let je známý významný vliv stupně turbulence vnějšího proudění na urychlení nebo oddálení začátku přechodu mezní vrstvy do turbulence. Byl prokázán i vliv řady dalších faktorů např. podélné složky gradientu tlaku, drsnosti povrchu na kterém se vyvíjí mezní vrstva, délkového měřítko turbulence nabíhajícího proudu, zvuku a periodických oscilací v proudění. Co do významu sice tyto faktory nejsou rovnocenné avšak zanedbávání jejich vlivu má za následek (např. Jonáš aj. [2]) malou přesnost odvozovaných korelací významných charakteristik přechodu (začátek, konec, délka přechodové oblasti) a následkem toho sníženou přesnost a univerzálnost matematických modelů. Pro odvození přesnějších korelací, např. Reynoldsových čísel odpovídajících poloze začátku a konce přechodové oblasti, s různými faktory jsou potřebné výsledky experimentů při rozmanitých počátečních a okrajových podmínkách pro mezní vrstvu. Je zřejmé že uskutečnění takového projektu kanonickými metodami je velmi obtížné z časových i finančních důvodů. Proto se hledají postupy, které přinesou rychle základní a předběžné údaje o poloze a délce přechodové oblasti a teprve s jejich využitím se uskuteční podrobná

* RNDr. Pavel Jonáš, DrSc., Oton Mazur, promováný fyzik, Ing. Václav Uruba, CSc., všichni Ústav termomechaniky AV ČR, Dolejškova 5, 182 00 Praha 8, e-mail: jonas@it.cas.cz, mazur@it.cas.cz, uruba@it.cas.cz.

měření profilů statistických charakteristik a časových průběhů rychlosti proudění v předem vytypovaných průřezech.

Průběh faktoru intermitence v přechodové oblasti mezní vrstvy má významnou roli v různých matematických modelech přechodové mezní vrstvy; např. Jaňour [3]. Často se k tomu využívají průběhy faktoru intermitence $\gamma^*(Re_x)$ nebo $\gamma^*(Re_2)$ vyhodnocené nepřímou metodou na základě konceptu Emmonse [4]. Tento postup vyžaduje podrobnou znalost průběhu některé z integrálních charakteristik mezní vrstvy (C_f , H_{12} , δ_2 aj.). Osvědčuje se průběh třetího součinitele C_f . Faktor γ^* je definován rovnicí

$$C_f(Re_2) = (1 - \gamma^*)(C_f)_L + \gamma^*(C_f)_T \quad (1)$$

Dosazují se hodnoty $(C_f)_L$ a $(C_f)_T$ v proudění s laminární (index L) a turbulentní (index T) strukturou se stejnými okrajovými podmínkami jaké platí pro zkoumanou vrstvu a pro hodnotu Re_2 při které byl stanoven koeficient $C_f(Re_2)$. Odtud je zřejmá omezená použitelnost nepřímé metody určování faktoru γ^* . Metoda je použitelná např. pro mezní vrstvu na desce; formule pro $(C_f)_L$ a $(C_f)_T$ uvádějí např. Schlichting a Gersten [5].

To je hlavní důvod pro přímé měření průběhu faktoru intermitence γ ve vnitřní vrstvě blízko obtékaného povrchu. Dalšími důvody jsou zmenšení rozsahu nutných měření a přesnější a obecněji platné výsledky. Popis způsobu měření a vyhodnocování je mimo rámec tohoto příspěvku a je uveden např. v publikaci [2]. Zde zaměříme pozornost na interpretaci změřených průběhů $\gamma(x)$ případně γ jako funkce Re_2 nebo jiné charakteristiky místa na obtékaném povrchu.

Aproximace průběhu faktoru intermitence v přechodové oblasti

Znalost obecně platné aproximace průběhu faktoru intermitence umožňuje formulovat efektivní modely přechodové mezní vrstvy. Pro výpočtové metody mezní vrstvy je rovněž důležitá předpověď začátku přechodu. Empirické podklady k tomu se získají experimentem. Měření intermitence není snadné a rozptýl výsledků a pomalá konvergence průběhu γ k nule resp. jedné znesnadňují stanovení začátku x_0 a konce x_t přechodové oblasti. Znalost obecného průběhu γ je proto přínosem i pro experimentální výzkum neboť umožňuje objektivně a přesněji vyhodnocovat z experimentů začátek a délku přechodové oblasti při různých okrajových podmínkách.

Aproximace, kterou navrhl Narasimha [1] je všeobecně používaná. Při odvození se předpokládá neturbulentní – pseudolaminární proudění před začátkem přechodu $x < x_0$ a zavádí se měřítko délky přechodové oblasti λ jako vzdálenost řezů x_1 a x_2 ve kterých má faktor hodnoty $\gamma(x_1) = 1/4$ a $\gamma(x_2) = 3/4$. Platí

$$\gamma(\xi) = 1 - \exp(-0,412\xi^2) \quad (2)$$

$$\xi = (x - x_0) / \lambda; \quad \lambda = x \gamma = 0.75 - x \gamma = 0.25 \quad (3)$$

Předpoklad neturbulentního proudění od počátku mezní vrstvy $x=0$ do začátku přechodu $x=x_0$ odpovídá předpokladu $\gamma(x) = 0$ pro $x < x_0$. To ovšem neodpovídá situaci při zkráceném (bypass) přechodu. V případě zkráceného přechodu do turbulence v mezní vrstvě na povrchu obtékaném turbulentním proudem pronikají turbulentní rozruchy až do těsné blízkosti povrchu takže

- z definice je $\gamma=1$ v okolí $x=0$ neboť přichází plně turbulentní proud;

- Ve směru proudění roste tloušťka vazké vrstvy δ_v , která je schopná utlumit pouze rozruchy s měřítky menšími než δ_v ;
- přicházející turbulence se tlumí podle zákona útlumu (decay law) a ubývá rozruchů s nejmenšími měřítky

Z této představy plyne, že faktor γ by měl s rostoucí vzdáleností x neustále klesat z hodnoty jedna až k nule ve vzdálenosti kde je tloušťka vazké vrstvy tak velká, že struktura proudění je neturbulentní. Popřípadě bude faktor γ klesat pouze k nějaké minimální hodnotě γ_{\min} , když dříve než dostatečně zesílí vazká vrstva nastane produkce turbulentních stop u stěny tj. přechod do turbulence. S rostoucím x zesilující se intenzita aktivních pohybů vedoucích k produkci stěnové turbulence (turbulent spots, bursts aj.) se dále projeví monotónním růstem faktoru intermitence až dosáhne hodnotu 1 v místě, kde mezní vrstvu řídí mechanismy typické pro samozachovávající se turbulentní mezní vrstvu. Naznačené představy jsou ovšem ve shodě pouze s průběhy faktoru intermitence γ přímo měřeného, tj. vyhodnocovaného z časových záznamů signálu úměrného povrchovému tření nebo rychlosti proudění ve velmi malé vzdálenosti od povrchu. Velikost γ_{\min} ovlivňuje nastavení hradla, kterým se klasifikuje analyzovaný signál jako turbulentní (indikátor=1) nebo neturbulentní (indikátor=0). Principiálně je možné takové nastavení aby bylo $\gamma_{\min}=0$. Jak to ovlivní celý průběh $\gamma(x)$ není dosud známo.

Faktor intermitence γ^* určovaný z odchylek změřené integrální charakteristiky od jejího průběhu v laminárním nebo turbulentním případě přirozeně monotónně roste ve směru x od nuly do jedné. Srovnání průběhů $\gamma(x)$ a $\gamma^*(x)$ nebylo pravděpodobně dosud provedeno.

Pro případ vnějšího turbulentního proudění s velkou intenzitou fluktuací byla navržena modifikace Narasimhovy formule (2)

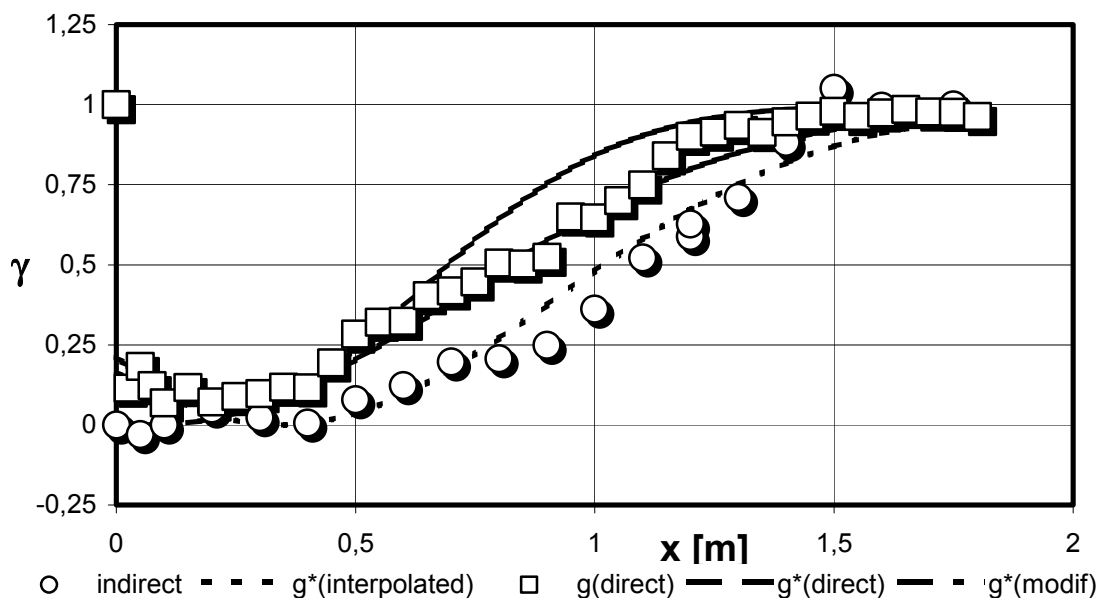
$$\gamma(\xi) = 1 - a \exp \left[-b^2 \left(\frac{x - x_0}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (4)$$

kde jsou zavedeny substituce

$$\xi = (x - x_0) / \lambda; \quad \lambda = x_{\gamma=(1-a)+0.75a} - x_{\gamma=(1-a)+0.25a} \quad (5)$$

$$0 \leq \gamma_{\min} = 1 - a; \quad 0 < a \leq 1 \quad (6)$$

Na obr.1 je ukázka interpolace změřeného průběhu faktoru γ formulemi (2) a (4). Tamtéž je uvedeno srovnání s průběhem γ^* , který byl vyhodnocen, Jonáš aj. [7], nepřímou metodou podle Emmonse [4]. Měření se uskutečnilo na hladké rovinné desce v turbulentním vzdušném proudě. V rovině náběžné hrany desky $x=0$ byla intenzita turbulentních fluktuací rychlosti 3% a délkový parametr disipace 6,9 mm. Indikátorová funkce (její časově střední hodnotou je γ) byla konstruována z časových průběhů povrchového tření které byly odvozeny ze záznamů výstupního signálu termoanemometru (CTA) s čidlem blízko povrchu.



Závěr

Průběhy znázorněné na obrázku demonstrují, že Narasimhova aproximace (2) průběhu faktoru intermitence γ je spolehlivá, zejména v okolí začátku přechodu, v případě, kdy na začátku přechodové oblasti má faktor intermitence nulovou hodnotu. Navržená modifikace (4) Narasimhovy aproximace je statisticky přílehlavější pokud má faktor γ nenulovou hodnotu před začátkem zkráceného přechodu mezní vrstvy do turbulence.

Je zřejmé že metoda nepřímého určování faktoru intermitence podle konceptu Emmonse určuje začátek přechodu později než když se faktor vyhodnocuje z časových záznamů signálu. Podle předběžných rozborů jsou rozdíly dosti značné a bude nutné podrobně analyzovat důsledky těchto pozorování pro modelování přechodové mezní vrstvy.

Poděkování

Práce vznikla při řešení projektů č. 101/98/K001 a 101/00/1057 podporovaných Grantovou agenturou ČR. Podpora je vděčně přijímána.

Literatura

- [1] Narasimha R.: The laminar-turbulent transition zone in the boundary layer. Prog. Aerospace Sci. Vol.22 (1985) 29-80.
- [2] Jonáš P., Mazur O., Uruba V.: By-pass transition experimental study with a control of outer stream turbulence scales, Proc. TSFP-2, June 27-29, 2001 E. Lindborg et al. (eds.), Vol. II, KTH Universitetservice US AB, Stockholm (2001) 51-55.
- [3] Jaňour Z.: Two-layer model for bypass boundary layer transition. ERCOFTAC Bulletin 24 (1995) 42-43.
- [4] Emmons H.W.: The laminar turbulent transition in boundary layer. J. Aero. Sci. 18 (1951) 450-498.
- [5] Schlichting H., Gersten K.: *Boundary layer theory*. Springer-Verlag Berlin (2000).
- [6] Jonáš P., Mazur O., Uruba V.: Problem of the intermittence distributions in transitional boundary layers under flows with various scales of turbulence. Z. angew. Math. u. Mech. ZAMM (2002) (accepted for publication).