

POLSKA

AKADEMIA

NAUK

INSTYTUT MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

**TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF
FLUID-FLOW MACHINERY**

PRACE

INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

98



GDAŃSK 1995

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machines

RADA REDAKCYJNA – EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH * HENRYK JARZYNA * JERZY KRZYŻANOWSKI

WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ * WŁODZIMIERZ J. PROSNAK

JÓZEF ŚMIGIELSKI * ZENON ZAKRZEWSKI

KOMITET REDAKCYJNY – EDITORIAL COMMITTEE

EUSTACHY S. BURKA (REDAKTOR NACZELNY – EDITOR-IN-CHIEF)

JAROSŁAW MIKIELEWICZ

EDWARD ŚLIWICKI (REDAKTOR – EXECUTIVE EDITOR) * ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA – EDITORIAL OFFICE

Wydawnictwo Instytutu Maszyn Przepływowych
Polskiej Akademii Nauk
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. poczt. 621,
☎ (0-58) 46-08-81 wew. 141, fax: (0-58) 41-61-44,
e-mail: tjan@imppan.imp.pg.gda.pl

ISBN 83-01-95428-1

ISSN 0079-3205

ZYGMUNT WIERCIŃSKI¹

Eksperymentalne badania oddziaływania typu "ujemne lub dodatnie źródło" śladu spływowego i warstwy przyściennej²

Ślady spływowe mogą spowodować wcześniejsze przejście laminarno-turbulentne w warstwie przyściennej na łopatkach maszyn przepływowych. Celem niniejszej pracy jest przebadanie oddziaływania śladu spływowego na warstwę przyścienną w rejonie naturalnego przejścia laminarno-turbulentnego. Ślad harmoniczny z cylindra oscylującego w przepływie napływa na płaską płytkę powodując naprzemienne oddziaływanie na warstwę przyścienną ujemnego i dodatniego strumienia (negative and positive jet). Analiza pomiarów fluktuacji prędkości w warstwie przyściennej wskazuje, że ujemny strumień może destabilizować warstwę przyścienną, podczas gdy dodatni strumień może ją stabilizować.

1. Wstęp

W osiowych maszynach przepływowych łopatki kolejnych wieńców pracują w silnie nieustalonym przepływie wywołanym przede wszystkim śladami spływowymi. Przejście laminarno-turbulentne w warstwie przyściennej, indukowane śladami spływowymi, wzbudza ostatnio duże zainteresowanie ze względu na to, że poznanie jego mechanizmów doprowadzić może do wyjaśnienia wzrostu oporów profilowych i wzrostu wartości współczynników wymiany ciepła w sprężarkach i turbinach osiowych. Do dwóch nie do końca poznanych jeszcze mechanizmów mogących istotnie uczestniczyć w laminarno-turbulentnym przejściu w warstwie przyściennej indukowanym śladami spływowymi należy oprócz oddziaływania turbulencji zawartej w śladzie również oddziaływanie defektu średniej prędkości.

W literaturze angielskojęzycznej oddziaływanie to znane jest pod nazwą *jet-or sink-like-behaviour of a wake*.

R. E. Mayle uważał [1], że z powodu dużej turbulencji przepływu zewnętrznego

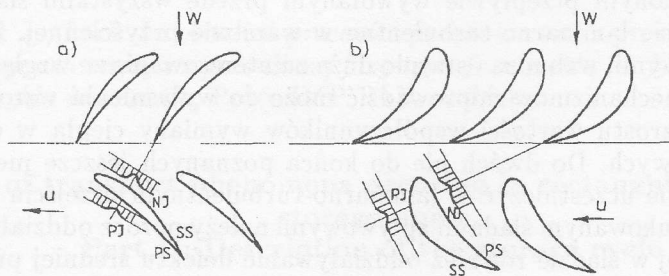
¹Zakład Dynamiki Gazów, Instytut Maszyn Przepływowych PAN, ul. Fiszer 14, 80-952 Gdańsk

²tezy artykułu częściowo prezentowane na XI Krajowej Konferencji Mechaniki Płynów, Warszawa, 17÷20.10.1994

oddziaływanie defektu średniej prędkości jest pomijalnie małe, chociaż zaznaczył on, że zagadnienie to jest warte badania i nie negował możliwości istnienia wpływu defektu średniej prędkości na warunki opływu warstwy przyściennnej. R. X. Meyer [2] był chyba pierwszym, który użył pojęcia strumień (jet) do opisu oddziaływania śladu spływowego z sąsiedztwem profilu. Y. Dong i N. A. Cumpsty [4] badali charakterystyki plamek turbulencji (turbulent spots) po stronie ssącej i ciśnieniowej profilu. Ponieważ plamki turbulencji nie różniły się zasadniczo od siebie, to wyciągnęli oni wniosek, że defekt średniej prędkości nie ma zasadniczego znaczenia dla wzbudzenia warstwy przyściennnej.

Ślady spływowe przemieszczające się przez kanał międzyłopatkowy powodują w nim przepływy wtórne [3], ujawniające się jako transport cząstek płynu zawartych w śladzie wzdłuż osi śladu, tj. od jednej strony kanału do drugiej. Modelem strumienia zawartego w śladzie spływowym posłużono się do wyjaśnienia różnic temperatur na wylocie ze stopnia sprężarki [3]. Ślad spływowy może odsysać cząstki płynu z warstwy przyściennnej od ścianki w głąb przepływu (negative jet, ujemny strumień) lub dociskać cząstki płynu warstwy przyściennnej do powierzchni łopatki (positive jet, dodatni strumień).

Na rys. 1a i b podano szkic oddziaływania śladu spływowego z kierownicy na opływ wokół łopatki wirnika odpowiednio sprężarki i turbiny osiowej. Widać tutaj odmienne oddziaływanie śladu na łopatki wirnika. W przypadku sprężarki, po stronie ssącej łopatki (SS) mamy do czynienia z oddziaływaniem ujemnego strumienia (NJ) na warstwę przyścienną, zaś po stronie ciśnieniowej łopatki (PS) – dodatniego strumienia (PJ). Analiza oddziaływania śladu z ruchomego wirnika sprężarki na łopatki jej kierownicy prowadzi do takich samych rezultatów. Odmienne w turbinie (rys. 1b) – po stronie ssącej (SS) łopatki mamy do czynienia z oddziaływaniem dodatniego strumienia (PJ), zaś po stronie ciśnieniowej (PS) – ujemnego strumienia (NJ). Taki sam typ oddziaływania (SS - PJ i PS - NJ) dotyczy napływu śladu spływowego z łopatek wirnika na łopatki kierownicy. Warto



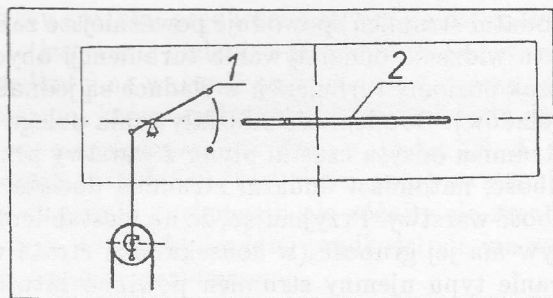
Rys. 1. Szkic oddziaływania śladu spływowego (ujemny i dodatni strumień) na otoczenie profilu

może chwilę zatrzymać się na analizie obu tych przypadków i powiedzieć, który z nich jest bardziej podatny na wzbudzenie zaburzeń w warstwie przyściennnej. Przepływ w warstwie przyściennnej po stronie ssącej łopatki jest przepływem o większych gradientach ciśnienia (początkowo dodatni, a następnie ujemny), niż w warstwie przyściennnej po stronie ciśnieniowej. Stąd też ta pierwsza jest bardziej wrażliwa na zaburzenia zewnętrzne. Pozostaje do rozstrzygnięcia, które z oddzia-

ływań (ujemny lub dodatni strumień) powoduje poważniejsze zaburzenie warstwy przyściennej. Z punktu widzenia oddziaływania turbulencji obydwie oddziaływania są jednakowe, wszak poziomy turbulencji w śladach są jednakowe (zakładając taką samą szerokość śladów). Odmienność oddziaływania polega w zasadzie tylko na tym, że ujemny strumień odsysa cząstki płynu z warstwy przyściennej w głąb powiększając jej grubość, natomiast dodatni strumień dociska cząstki płynu, a zatem zmniejsza grubość warstwy. Przyjmując, że na niestabilność warstwy przyściennej istotny wpływ ma jej grubość (w konsekwencji strata wydatku i strata pędu), to oddziaływanie typu ujemny strumień powinno łatwiej zaburzać warstwę przyścienną. A zatem najpodatniejsza na zaburzenia śladami spływowymi byłaby warstwa przyścienna na łopatkach sprężarek, po ssących stronach profili. Badania przeprowadzone w tunelu o niskim poziomie turbulencji pozwalają na lepsze badanie oddziaływania śladu i warstwy przyściennej bez zakłócającego wpływu turbulencji w strumieniu swobodnym. Taka sytuacja nie występuje w maszynach przepływowych, gdzie zwykle poziom turbulencji osiąga wartość kilku do kilkunastu procent, ale pozwala to na pełniejsze odseparowanie poszczególnych efektów bez wzajemnego wpływu zaciemniającego obraz. Celem prezentowanego opracowania jest próba poznania oddziaływania typu ujemny i dodatni strumień (jet- or sink-like) w rejonie, w którym występuje naturalne przejście laminarno-turbulentne i w jego sąsiedztwie, a zatem próba poznania mechanizmu prowadzącego do wcześniejszego przejścia laminarno-turbulentnego. W tym celu badano warstwę przyścienną na płaskiej płytce, w rejonie naturalnego przejścia laminarno-turbulentnego, zaburzanej śladami spływowymi.

2. Stanowisko pomiarowe

Badania przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym w IMP PAN w Gdańsku. Płaską płytkę, rys. 2, o długości 700 mm umieszczono w komorze pomiarowej tunelu aerodynamicznego o zamkniętym obiegu i o niskim poziomie turbulencji $Tu \leq 0.1\%$ [5]. Płytkę ustawiono pod kątem $-2,5^\circ$ noskiem w dół, celem uniknięcia oderwania w rejonie krawędzi natarcia płytki. Prędkość powietrza w komorze pomiarowej można zmieniać w sposób ciągły w granicach 5 - 100 m/sek. W odległości $x=85$ mm przed krawędzią natarcia umieszczono cylinder o średnicy $d=4$ mm poruszający się ruchem wahadłowym poprzecznie do przepływu. Amplituda tego ruchu wynosi $\Delta y = 100$ mm, zaś jego częstotliwość można zmieniać w granicach 4-10 Hz. Wzajemny stosunek prędkości napływu i prędkości pręta określa kąt α napływu śladu na płaską płytkę oraz ilość śladów spływowych znajdujących się jednocześnie nad płytą. W badanym przypadku był to zawsze tylko jeden ślad. Odpowiada to w zasadzie relacjom spotykanym w maszynach przepływowych, gdzie dla przypadku stosunku długości cięciwy profilu do podziałki wieńca $c/s = 1.0$ w kolejnych wieńcach również najczęściej tylko jeden lub najwyżej dwa ślady spływowe znajdują się w obszarze międzyłopatkowym. Zakłada się, że ślad spływowy w kształcie czasowo-przestrzennej fali harmonicznego napływający na płytkę i przez nią przecinany na segmenty półkoliste,



Rys. 2. Płaska płyta (2) i generator śladu spływowego (1) w komorze pomiarowej tunelu

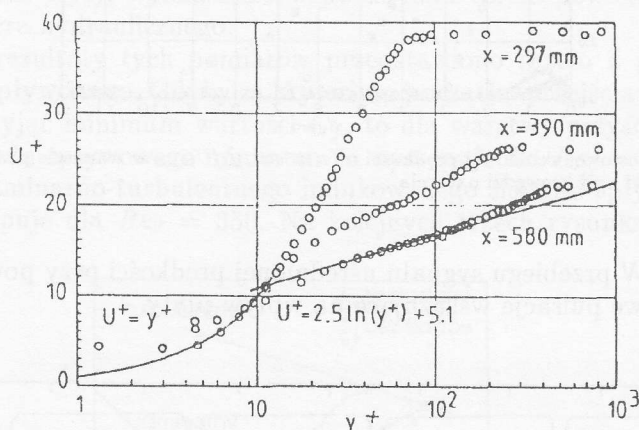
przesuwające się po górnej powierzchni płytki, może modelować ślady spływowe naprzemiennie napływające od góry i z dołu profilu i nachylone do powierzchni płyty pod kątem α i $\pi - \alpha$. Podczas ruchu cylindra do góry ślad spływowy z cylindra oddziałuje na warstwę przyścienną, jak ujemny strumień, zaś podczas ruchu cylindra w dół – jak dodatni strumień. Do pomiarów fluktuacji prędkości w warstwie przyściennej użyto jednowłóknowej sondy typu 55P15 wraz z mostkiem typu 55M10 firmy DISA. Pomiaru charakterystyki śladu spływowego za cylindrem dokonano dwuwłóknową sondą termooanemometryczną typu X wykonanej przez Instytut Mechaniki Górotworu, PAN, Kraków, identycznej z sondą 55 P61 firmy DISA. Do cechowania sondy X użyto metody kąta efektywnego zaproponowanej przez P. Bradshawa [6]. Natomiast do obróbki i analizy danych otrzymanych z pomiarów przy pomocy tej sondy użyto metody "look-up table" podanej przez M.A. Khana i H.H. Bruuna [7]. Sygnały pomiarowe przekazywano do rejestratora przebiegów szybkozmiennych firmy MAURER i następnie przekazywano przy pomocy interfejsu IEEE 488 do komputera IBM PC 386, gdzie podlegały dalszej obróbce. Sygnały pomiarowe były synchronizowane ruchem cylindra i zwalniane (triggering) jeden raz w trakcie trwania cyklu ruchu cylindra. Opis zastosowanej aparatury pomiarowej i szczegóły obróbki sygnałów pomiarowych podano w [8, 9].

3. Rezultaty pomiarów

3.1. Naturalne przejście laminarno-turbulentne

W trakcie badań wykonano pomiary rozkładów ciśnienia statycznego na płaskiej płytce, gradientu prędkości wzdłuż płyty oraz profili prędkości w warstwie przyściennej, rys. 3, dla różnych stanów warstwy przyściennej (laminarnej, przejściowej i turbulentnej) [14]. Dla różnych prędkości napływu wyznaczono rejon naturalnego przejścia laminarno-turbulentnego na płaskiej płytce. Ponadto zmierzono fluktuacje prędkości w warstwie przyściennej w rejonie naturalnego przejścia laminarno-turbulentnego przy przechodzeniu śladu spływowego, rys. 4. Pomiary te są bardzo zbliżone do pomiarów przedstawionych w [15]. Ponieważ

plyta jest ustawiona pod kątem $-2,5^\circ$, to przepływ zewnętrzny charakteryzował się pewnym niewielkim gradientem prędkości. Miara gradientu prędkości strumienia zewnętrznego mogą być trzy następujące parametry: parametr Pohlhausena: $\lambda = \delta^2/\nu \cdot dU_\infty/dx$, parametr gradientu ciśnienia: $\lambda_\theta = \theta^2/\nu \cdot dU_\infty/dx$ i parametr przyspieszenia: $K = \nu/U_\infty^2 \cdot dU_\infty/dx$. Wartości tych parametrów wyznaczono dla punktu przejścia laminarno-turbulentnego i wynosiły one odpowiednio: $\lambda = 1.6 - 1.8$, $\lambda_\theta = 0.025 - 0.033$ i $K = 0.2 \cdot 10^{-6}$ [8, 9]. Zmierzono ponadto współ-

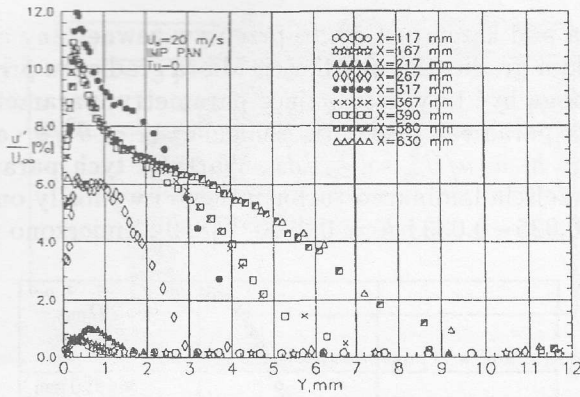


Rys. 3. Profil prędkości w warstwie przyściennej dla stanu laminarnego, przejściowego i turbulentnego warstwy przyściennej we współrzędnych ścianki

czynnik kształtu $H = \delta^*/\theta$ warstwy przyściennej [14]. Z tego pomiaru wynika, że przejście laminarno-turbulentne rozpoczyna się dla liczby Reynoldsa $Re_\theta = 400$. Jest to wartość znacznie mniejsza niż znana z literatury wartość $Re_\theta = 1200$ [10, 11]. Wy tłumaczeniem tego faktu jest przede wszystkim kształt krawędzi natarcia, gdyż jest on zaokrąglony promieniem $r = 2 \text{ mm}$ [16, 12]. Przyjmując różne definicje początku przejścia laminarno-turbulentnego [13, 9] można początek przejścia zlokalizować w nieco różnych miejscach względem krawędzi natarcia. W przypadku niniejszych badań za początek przejścia laminarno-turbulentnego przyjęto pierwsze pojawienie się wybuchów turbulencji (turbulence bursts) [9].

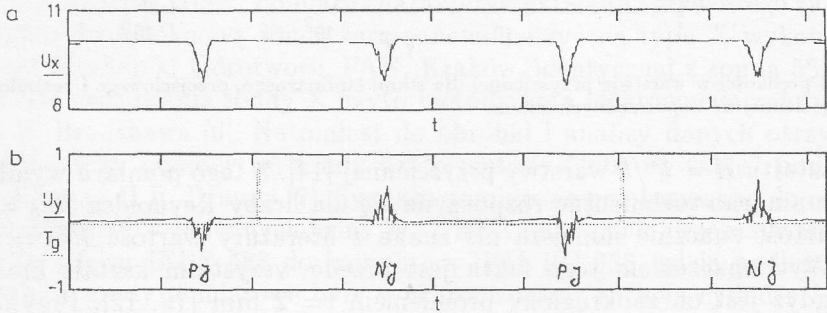
3.2. Prędkość poślizgu (slip velocity)

Prędkość poślizgu jest tutaj prędkością, z jaką porusza się płyn w śladzie za ciałem względem prędkości głównego strumienia. Prędkość tę zmierzono zarówno dla swobodnego śladu spływowego, a więc bez wpływu płaskiej płyty, jak również dla śladu przecinanego płytą [9]. Swobodny ślad spływowy zmierzono w osi śladu, natomiast w przypadku śladu napływającego na płytę pomiaru, dokonano w odległości $y = 10 \text{ mm}$ od płyty w odległości $x = 300 \text{ mm}$ od krawędzi natarcia. Pomiary uśredniano 16 razy. Rezultaty pomiarów przedstawiono odpowiednio na rys. 5 i 6. Defekt składowej x prędkości wynosi $1-1.5 \text{ m/s}$, zaś defekt składowej y prędkości wynosi odpowiednio 0.5 m/s przy prędkości średniej napływu równej

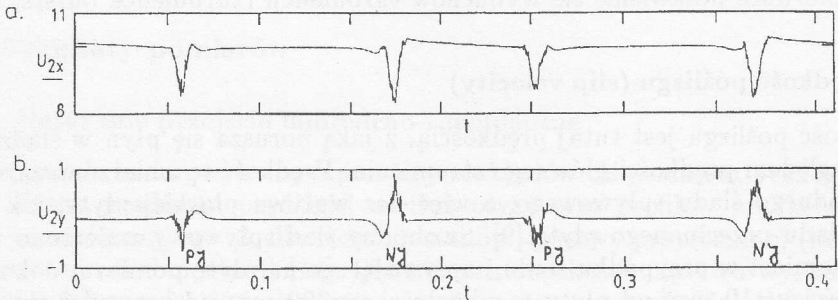


Rys. 4. Fluktuacje osiowej składowej prędkości $u'(x = var, y)/U_{max}$ w warstwie przyściennej w funkcji odległości od ścianki i od krawędzi natarcia

$U_0 = 10 \text{ m/s}$. W przebiegu sygnału uśrednionej prędkości przy powierzchni płyty widać dodatkowe pulsacje wskazujące na wpływ płyty.



Rys. 5. Prędkość poślizgu w osi swobodnego śladu spływowego, a – składowa U_x prędkości, b – składowa U_y prędkości w śladzie spływowym

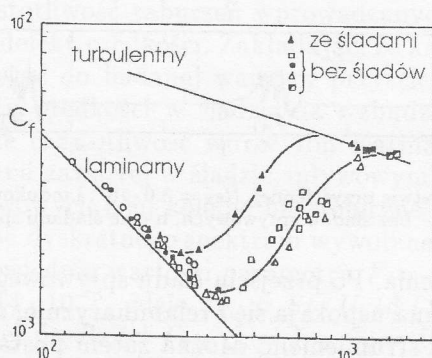


Rys. 6. Prędkość poślizgu śladu spływowego w odległości $y=10 \text{ mm}$ od powierzchni płyty i w odległości 300 mm od krawędzi natarcia, a – składowa U_x prędkości, b – składowa U_y prędkości w śladzie spływowym

3.3. Oddziaływanie śladu na warstwę przyścienną

Dotychczasowe pomiary były w zasadzie przygotowaniem do pomiarów oddziaływania sinusoidalnego śladu spływowego i warstwy przyściennej na płaskiej płytce, a w szczególności pomiarów oddziaływania defektu średniej prędkości śladu spływowego na warstwę przyścienną w rejonie przejścia laminarno-turbulentnego. Mierząc pochylenie rozkładu średniej prędkości w warstwie przyściennej przy powierzchni płyty, wyznaczono współczynnik tarcia powierzchniowego C_f metodą tzw. zera hydraulicznego.

Na rys. 7 rezultaty tych pomiarów przedstawiono razem z pomiarami bez udziału śladu spływowego. Gdyby za kryterium początku przejścia laminarno-turbulentnego przyjąć minimum wartości C_f , to dla warstwy przyściennej bez oddziaływania śladu spływowego minimum to występuje dla $Re_\theta = 400$, natomiast dla przejścia laminarno-turbulentnego indukowanego śladami spływowymi minimum to występuje dla $Re_\theta = 350$. Na kolejnych trzech rysunkach, rys. 8, 9 i

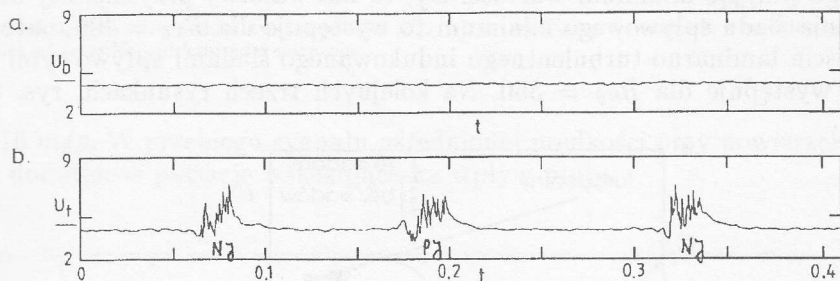


Rys. 7. Wartości współczynnika tarcia powierzchniowego C_f w warstwie przyściennej dla naturalnego i indukowanego śladami spływowymi przejścia laminarno turbulentnego

10, przedstawiono pomiary fluktuacji prędkości w odległości $y = 0.5 \text{ mm}$ od powierzchni płyty dla $Re_x = 3.0 \cdot 10^5$, $Re_x = 3.2 \cdot 10^5$ i $Re_x = 3.25 \cdot 10^5$, rys. a dla przepływu bez zaburzeń śladami, rys. b dla przepływu z zaburzeniem śladami. W przypadku rys. 8a nie widzimy jeszcze żadnych zaburzeń wywołanych naturalnym przejściem laminarno-turbulentnym, na rys. 9a obserwujemy co prawda wzrost fluktuacji prędkości, lecz nie są to jeszcze wysokoczęstotliwościowe fluktuacje charakterystyczne dla przepływu turbulentnego w warstwie przyściennej. Dopiero na rys 10a obserwujemy wysokoczęstotliwościowe wybuchy turbulencji (turbulence bursts) świadczące o początku przejścia laminarno-turbulentnego. Na rys. 8÷10b literami NJ i PJ zaznaczono odpowiednio przejście ujemnego i dodatniego strunienia nad warstwą przyścienną. Na rys. 8b widać, że w zasadzie nie ma różnicy w przebiegach pomiędzy punktami NJ-PJ jak i punktami PJ-NJ, zatem w tej fazie rozwoju zjawiska istota zaburzenia ogranicza się do obszaru pod bezpośrednim wpływem śladu, natomiast warstwa przyścienna poza tymi obszarami nie jest w widoczny sposób zaburzona. Natomiast na rys. 9b widzimy już odmienne zachowanie się warstwy przyściennej w obszarze NJ-PJ, niż w obszarze

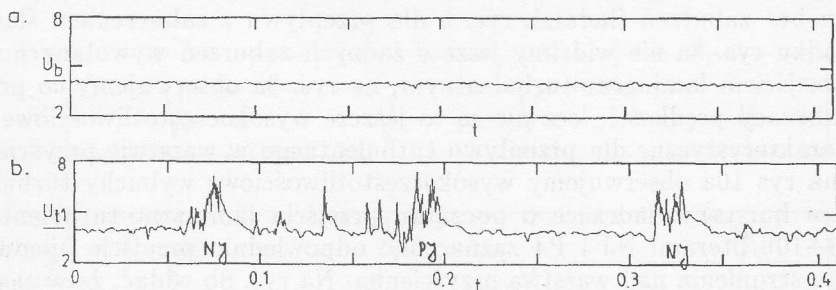
PJ–NJ.

Jednym z możliwych wyjaśnień tego zachowania się warstwy przyściennej w obszarze NJ–PJ jest odmienne oddziaływanie ujemnego strumienia na warstwę przyścienną, od oddziaływania strumienia dodatniego. Wydaje się, że ujemny strumień odciągając cząstki płynu od powierzchni płyty powiększa jej grubość, a zatem i wrażliwość na zaburzenia, podczas gdy dodatni strumień dociskając cząstki płynu w warstwie przyściennej do powierzchni zmniejsza jej grubość, a zatem i wrażliwość na zaburzenia. Własność ta jest widoczna tylko w pewnym zakresie liczb Reynoldsa, gdyż później naturalne przejście laminarno-turbulentne powoduje, że i w tym obszarze pojawiają się zaburzenia, którym dodatni strumień nie potrafi przeciwdziałać. A zatem warstwa przyścienna turbulizuje się pod



Rys. 8. Fluktuacje prędkości w warstwie przyściennej, $Re_x = 3.0 \cdot 10^5$, i indukowane śladami splotowymi przejście laminarno turbulentne, a – bez śladów splotowych, b – ze śladami splotowymi

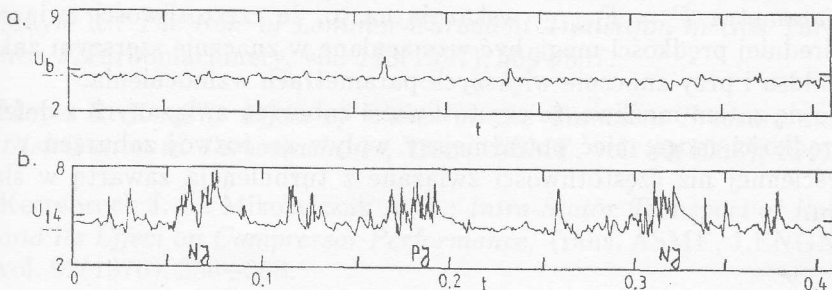
wpływem ujemnego strumienia. Po przejściu śladu splotowego z dodatnim strumieniem, warstwa przyścienna uspokaja się i relaminaryzuje, aż do pojawienia się kolejnego śladu z ujemnym strumieniem. Można zatem postawić hipotezę, że za sturbulizowanie (wystąpienie "turbulent bursts") warstwy przyściennej w rejonie NJ–PJ odpowiedzialny jest efekt ujemnego strumienia (negative jet), który w tym rejonie odsysa warstwę przyścienną od ścianki powodując jej wcześniejsze sturbulizowanie. Gdyby wybuchy turbulencji indukowanej śladami splotowymi poru-



Rys. 9. Fluktuacje prędkości w warstwie przyściennej, $Re_x = 3.2 \cdot 10^5$, i indukowane śladami splotowymi przejście laminarno turbulentne, a – bez śladów splotowych, b – ze śladami splotowymi

szały się niezależnie od śladów splotowych, to powinny być rejestrowane zarówno w rejonie NJ–PJ jak i w PJ–NJ. Jeżeli tak się nie dzieje, to należy powiedzieć,

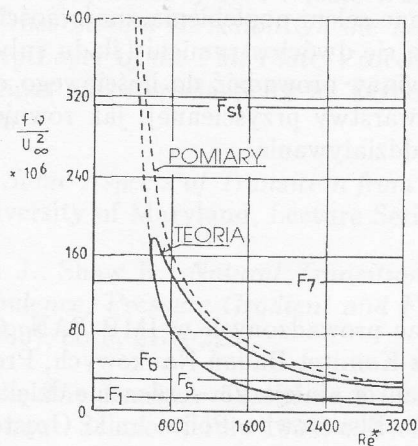
że wybuchy turbulencji przynajmniej w tym regionie są związane z przesuwającymi się śladami spływowymi. Nieco inne spojrzenie na wpływ turbulencji



Rys. 10. Fluktuacje prędkości w warstwie przyściennej, $Re_x = 3.25 \cdot 10^5$, i indukowane śladami spływowymi przejście laminarno turbulentne, a – bez śladów spływowych, b – ze śladami spływowymi

zawartej w śladzie spływowym i defektu średniej prędkości śladu można otrzymać analizując częstotliwość zaburzeń wprowadzanych do warstwy przyściennej przez turbulencję i defekt prędkości. Zakładając, że krzywą neutralnej stabilności [16] można zastosować do badanej warstwy przyściennej, można ocenić wpływ turbulencji i defektu prędkości w śladzie na wzbudzenie warstwy przyściennej. Zakładając dalej, że częstotliwość wirów von Karmana jest dolną granicą częstotliwości turbulencji zawartej w śladzie spływowym, zaś częstotliwość przechodzenia śladów spływowych i jej kolejne harmoniczne mogą być traktowane jako pierwsze przybliżenie dyskretnego spektrum wywołanego defektem prędkości, możemy obliczyć odpowiednie wartości parametru $F = f \cdot \nu / U_\infty^2$ dla częstotliwości Strouhala $F_{St} = 314 \cdot 10^{-6}$, gdzie $f_{St} = St \cdot U_0 / d$ ($St = 0.2$) i dla harmonicznych defektu średniej prędkości $F_{1,2,\dots,j} = f_{1,2,\dots,j} \cdot \nu / U_\infty^2 = 6 \cdot j \cdot 10^{-6}$.

Z rys. 11 widać, że wartości $F \geq F_{St}$ leży w rejonie, gdzie na mocy teorii



Rys. 11. Przykład krzywej neutralnej stabilności warstwy przyściennej zaburzanej turbulencją zawartą w śladzie i defektem średniej prędkości

zaburzenia wywołane turbulencją w śladzie spływowym nie są wzmacniane. W

rzeczywistości zgodnie z eksperymentem są one wzmacniane, lecz na krótkim zakresie liczb Reynoldsa i przy małych współczynnikach wzmocnienia. Natomiast wartości parametru $F = F_{1,2,...,j}$ wskazują na to, że częstotliwości związane z defektem średniej prędkości mogą być wzmacniane w znacznie szerszym zakresie liczb Reynoldsa i przy znacznie większych parametrach wzmocnienia.

Wydaje się zatem możliwe, że częstotliwości zaburzeń związanych z defektem średniej prędkości mogą mieć poważniejszy wpływ na rozwój zaburzeń w warstwie przyściennej niż częstotliwości związane z turbulencją zawartą w śladzie spływowym.

4. Wnioski

Ślad spływowy, który można opisać jako defekt średniej prędkości i obszar o podwyższonej turbulencji (w tym i struktury koherentne), oddziałuje poprzez te dwa swoje składniki na warstwę przyścinną powodując jej destabilizację. Wychodząc z założenia, że główną przyczyną wcześniejszego przejścia laminarno-turbulentnego w warstwie przyściennej jest zawarta w śladzie spływowym turbulencja, badaniom oddziaływania defektu średniej prędkości na stan warstwy przyściennej nie poświęcano odpowiednio dużej uwagi. Badania przedstawione w tej pracy mają na celu uzupełnienie tej luki i wykazanie, że również defekt średniej prędkości może spowodować wcześniejsze przejście laminarno-turbulentne w warstwie przyściennej. Badania te jednocześnie wskazują na istotne różnice przy oddziaływaniu ujemnego i dodatniego strumienia w śladzie na warstwę przyścinną. Ujemny strumień może powodować wcześniejsze przejście laminarno-turbulentne w warstwie przyściennej, podczas gdy dodatni strumień może już wcześniej wywołane zaburzenia wytłumić.

Dalsze badania są potrzebne celem pogłębienia znajomości zjawisk zachodzących na pograniczu mieszania się dwóch strumieni (śladu spływowego i warstwy przyściennej). Badania te powinny prowadzić do ilościowego określenia wzajemnego oddziaływania śladu i warstwy przyściennej, jak również do opracowania szczegółów modelu takiego oddziaływania.

Podziękowania

Badania te są częścią prac prowadzonych w IMP PAN, Gdańsk, w ramach projektu finansowanego przez Komitet Badań Naukowych, Projekt Nr 3 P404 07 04. Za to wsparcie finansowe autor niniejszym serdecznie dziękuje. Ponadto autor serdecznie dziękuje Prof. J.W. Elsnerowi z Politechniki Częstochowskiej za radę i życzliwość.

Literatura

- [1] Mayle R.: *The Role of Laminar-Turbulent Transition in Gas Turbine Engines*, J. Turbomachinery, vol. 113(1991), 509÷537.
- [2] Meyer R. X.: *The Effect of Wakes on the Transient Pressure and Velocity Distribution in Turbomachines*, Trans. ASME, vol. 80(1968), 1544÷1552.
- [3] Kerrebrock J. L.: Mikolajczak A. A.: *Intra-Stator Transport of Rotor Wakes and Its Effect on Compressor Performance*, Trans. ASME, J. ENGNG Power, vol. 92(1970), 359÷368.
- [4] Dong Y., Cumpsty N. A.: *Compressor Blade Boundary Layer: Part2- Measurements with Incident Wakes*, J. Turbomachinery, vol. 112(1990), 231÷240.
- [5] Wierciński Z.: *Badania osiagów tunelu aerodynamicznego o zamkniętym obiegu*, Opracowanie IMP PAN, 221/91, Gdańsk, 1991.
- [6] Bradshaw P.: *An Introduction to Turbulence and Its Measurements*, Pergamon Press, Oxford 1971.
- [7] Khan M. A., Bruun H. H.: *Signal Analysis of X Hot-Wire Probes Using a Look-Up Table Technique*, DANTEC Information, No 13(1994), 19÷23.
- [8] Wierciński Z.: *Auswirkung der Nachlaufedellen hinter einem quer zur Stromung pendelnden Zylinder auf den laminar-turbulenten Umschlag der Grenzschicht auf der flachen Platte*, VDI-Berichte, Nr 1109(1994).
- [9] Wierciński Z.: *The Influence of the Periodic Wake Behind a Cylinder Pendulating In the Cross-Stream Direction On the Laminar-Turbulent Transition In the Boundary Layer of the Flat Plate*, Proceedings VII Int. Symp. Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity in Turbomachiens, Sept.25-29, 1994, Fukuoka, Japan.
- [10] Dryden H. L.: *Some Aspects of Transition from Laminar to Turbulent Flow*, Lecture at University of Maryland, Lecture Series N034, Nov. 1955.
- [11] Abu-Ghannam J., Shaw R.: *Natural Transition of Boundary Layers - The Effects of Turbulence, Pressure Gradient and Flow History* J. Mech. Engng Sci., vol. 22(1980), no 5, 213÷228.
- [12] Emmons H. W.: *The Laminar-Turbulent Transition in a Boundary Layer, Part I*, J. Aeronaut. Sciences, July 1951, 490÷498.
- [13] Kuan C. L. , Wang T.: *Investigation of the Intermittent Behavior of Transitional Boundary Layer Using a Conditioned Averaging Technique*, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 3(1990), 157÷173.

- [14] Suprun T. T., Wiercinski Z.: *Badania warstwy przyściennej na płaskiej płycie w rejonie naturalnego przejścia laminarno-turbulentnego*, Opracowanie IMP-PAN w Gdańsku, nr 368/94.
- [15] Schubauer G. B., Klebanoff P. S.: *Contribution on the Mechanics of Boundary Layer Transition*, NACA Report 12819, 1957.
- [16] Schlichting H., *Grenzschicht-Theorie*, Verlag G. Braun, Karlsruhe 1965.

Experimental investigations of the interaction between the negative/positive jet of the wake and the boundary layer

Summary

Due to the wakes the inception of the laminar turbulent transition in the boundary layer can be displaced upstream. The purpose of these investigations is to examine the interaction of the wakes and the boundary layer in the region close to the natural laminar-turbulent transition. The oncoming wake generated by pendulating motion of a cylinder upstream of the flat plate influences the boundary layer as an alternating negative and positive jet. The investigations lead to the conclusion that the negative jet can precipitate the laminar-turbulent transition while the positive jet can stabilize the boundary layer.