

P O L S K A    A K A D E M I A    N A U K

INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE  
INSTYTUTU MASZYN  
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS  
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

88

WARSZAWA - POZNAŃ 1985

PAŃSTWOWE    WYDAWNICTWO    NAUKOWE

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 machinery

RADA REDAKCYJNA - EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI  
STEFAN PERYCZ · WŁODZIMIERZ PROSNAK · KAZIMIERZ STELLER  
ROBERT SZEWAŁSKI (PRZEWODNICZĄCY - CHAIRMAN) · JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY - EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER - REDAKTOR - EDITOR  
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI  
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN  
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright

by Państwowe Wydawnictwo Naukowe  
Warszawa 1985

Printed in Poland

ISBN 83-01-07020-X

ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 340 + 90 egz. Ark. wyd. 13. Ark. druk. 10,875. Papier druk. sat. kl. V, 70 g. 70 × 100 cm. Oddano do składania 3 I 1985 r. Podpisano do druku 5 XI 1985 r.

Druk ukończono w listopadzie 1985 r. Zam. nr 240/107. S-7/712. Cena zł 220,-

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

JERZY KONIECZKA, JANUSZ STELLER

Gdańsk

## Rozkład prędkości wokół płata umieszczonego w tunelu przeplywowym — weryfikacja pewnej metody obliczeniowej za pomocą anemometru laserowego\*

Omówiono pewne wyniki uzyskane metodą teoretycznego wyznaczania rozkładu prędkości wokół płata między ściankami równoległymi z uwzględnieniem zjawiska oderwania. Opisano sposób i wyniki weryfikacji doświadczalnej obliczeń numerycznych za pomocą anemometru laserowego.

### 1. Wprowadzenie

W poprzedniej pracy [1] jeden z autorów przedstawił koncepcję teoretycznego wyznaczania rozkładu prędkości wokół płata w palisadzie prostoliniowej lub między ściankami równoległymi z uwzględnieniem zjawiska oderwania warstwy przyściennej. Koncepcja ta stanowi adaptację znanej metody K. Jacoba, dotyczącej początkowo pojedynczego profilu [2, 3, 4], a następnie również układu kilku profili [5]. Przypomnijmy, że zasadnicza idea metody K. Jacoba polega na modelowaniu obszaru oderwania pewnym standardowym — z dokładnością do czynnika skalującego — rozkładem prędkości normalnych do konturu. Również warstwa przyścienna modelowana jest pewnym rozkładem prędkości normalnych do konturu. Rozkład ten zależy od szybkości zmian liniowej miary straty wydatku  $\delta_1$ . Dokonana w pracy [1] adaptacja polegała głównie na dopasowaniu postaci jąder całkowych w rozwiązywanych równaniach Fredholma II rodzaju oraz w innych wyrażeniach do nowej geometrii przepływu. Postać tych jąder wynika z twierdzeń podanych przez E. Martensena i K. von Sengbuscha [6, 7]. Należy nadmienić, że zagadnienia opływu profilu w palisadzie prostoliniowej oraz między ściankami równoległymi były odpowiednio przedmiotem wcześniejszych prac W. Gellera [8] i D. Steinbacha [9]. Praca W. Gellera — dotycząca palisady prostoliniowej — zawierała jednak pewne modyfikacje oryginalnej metody K. Jacoba, polegające na zmianie warunków brzegowych w obszarze oderwania. Z kolei D. Steinbach, po sprowadzeniu zagadnienia opływu płata między

\* Praca wykonana w ramach Programu Rządowego PR-8: „Kompleksowy rozwój energetyki” zadanie 6.4.7.09.

ściankami równoległymi do przepływu przez naprzemienną palisadę prostoliniową\*), uwzględniał wpływ jej kolejnych elementów na pole prędkości poprzez szereg przyczynków, urywany po zsumowaniu około 30 wyrazów. Wyniki dotyczące przepływu między ściankami równoległymi nie były w pracy [9] zestawiane z rezultatami doświadczalnymi. W odróżnieniu od publikacji W. Gellera i D. Steinbacha w [4], a następnie [1], uwzględniono obecność warstwy przyściennej jak również skończony zasięg obszaru oderwania.

Opis algorytmu oraz opracowanego w języku FORTRAN programu realizującego opisaną w pracy [1] koncepcję obliczania rozkładu prędkości wokół płata umieszczonego między ściankami równoległymi znaleźć można w pracy [11]. Niniejsza praca zawiera krótkie omówienie uzyskiwanych wyników numerycznych oraz wstępnej weryfikacji metody obliczeniowej. Weryfikacja ta polegała na porównaniu teoretycznych i doświadczalnych rozkładów prędkości wokół płata NACA 2418, umieszczonego w tunelu przepływowym IMP PAN. Pomiar dokonywany był metodą anemometrii laserowej.

Metoda ta, wykorzystująca promieniowanie laserowe jako element sondujący przepływ ośrodka, pozwala na bezkontaktowy pomiar lokalnych, chwilowych prędkości cząstek znajdujących się w płynącym ośrodku. Jeżeli znana jest zależność między ruchem cząstek a ruchem ośrodka, to można na podstawie pomiaru prędkości cząstek określić także prędkość przepływu ośrodka. W praktyce do pomiaru prędkości przepływu ośrodka wykorzystuje się cząstki nadążające za przepływem.

W badaniach rozkładu i pól prędkości w kanałach, w których znajdowały się różnego kształtu profile, stosowano już anemometry laserowe jako urządzenia do precyzyjnego wyznaczania prędkości płynów wokół tych elementów [12, 13].

## 2. Obliczenia numeryczne

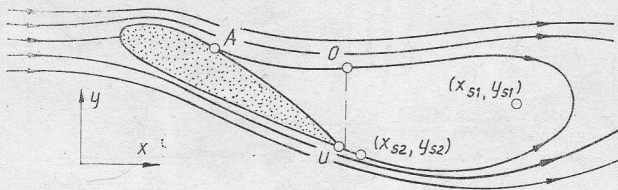
Większość obliczeń dotyczyła rozkładu prędkości na płacie NACA 2418 o maksymalnym wygięciu równym 2% oraz maksymalnej grubości równej 18% cięciwy. Zarówno linia szkieletowa jak i rozkład grubości tego profilu opisywane są prostymi wyrażeniami analitycznymi [14], co pozwala uniknąć błędów związanych z interpolacją w trakcie przygotowywania danych. Stabelaryzowane współrzędne profilu NACA 2418 znaleźć można między innymi w katalogu profili lotniczych F. W. Riegelsa [15].

Opisany w pracy [1] proces iteracyjny mógł być realizowany przynajmniej na 2 sposoby – przez symulację oderwania w punktach wynikających z obliczeń warstwy przyściennej w kroku poprzednim oraz przez ustalenie punktu oderwania  $U$  po stronie ciśnieniowej (rys. 1) i stopniowe przesuwanie punktu oderwania  $A$  po stronie ssawnej w kierunku krawędzi natarcia dopóty, dopóki nie okaże się on jej bliższy niż na to wskazują obliczenia warstwy przyściennej. Tę ostatnią metodę stosował K. Jacob.

W rezultacie obliczeń stwierdzono, że proces iteracyjny realizowany sposobem pierwszym okazywał się zbieżny w warunkach przepływu normalnego, od noska ku ostrzu. Uzyskanie zbieżności wymagało zazwyczaj wykonania trzech kroków iteracyjnych. Sy-

\*) Podobny sposób postępowania stosował we wcześniejszej pracy W. J. Prosnak [10], rozwiązując zagadnienie takiego przepływu metodą odwzorowań konforemnych, przy założeniu bezoderwanego przepływu cieczy doskonałej.

tuacja wyglądała znacznie gorzej w przypadku przepływu odwróconego, od ostrza ku noskowi. W tym przypadku zbieżności często w ogóle nie uzyskiwano. Obliczenia warstwy przyściennej przy założonym rozkładzie prędkości wynikającym z modelu cieczy doskonałej wskazywały na oderwania sięgające poza nosek profilu. Jednak po jego uwzględnieniu rozkład ciśnienia stawał się na tyle łagodny, że powodował jedynie uformowanie



Rys. 1. Geometria przepływu z oderwaniem według [4]

pęcherza oderwaniowego o długości rzędu 10% cięciwy. Niewłaściwe uwzględnienie jego obecności ponownie pogłębiało minimum ciśnienia, wskazując na oderwanie sięgające poza nosek. W tej sytuacji przedstawione w dalszym ciągu wyniki dotyczące przepływu odwróconego uzyskano przy użyciu programu dokonującego stopniowego przesuwania punktu  $A$  w kierunku krawędzi natarcia.

Celem oceny wiarygodności obliczeń numerycznych zdecydowano się na przeprowadzenie ich weryfikacji doświadczalnej. Sposób oraz rezultaty weryfikacji zostaną przedstawione w dalszym ciągu pracy.

### 3. Stanowisko doświadczalne

Stanowisko doświadczalne stanowił tunel przepływowy Zakładu Dynamiki Ciecży IMP PAN wyposażony w anemometr laserowy RAL-2.

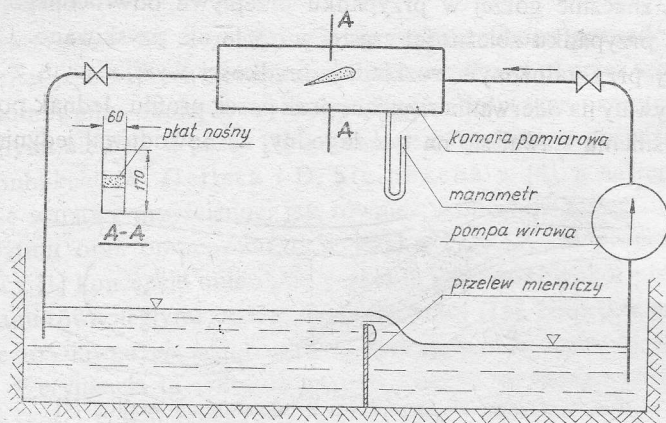
Zasadniczymi elementami tunelu przepływowego (rys. 2) są:

- kanał otwarty wyposażony w przelew Hansena,
- jednostopniowa pompa odśrodkowa z wirnikiem dwustrumieniowym, zasilana silnikiem na prąd zmienny o mocy 50 kW,
- dwa zdalnie sterowane zawory służące do regulacji przepływu,
- sekcja pomiarowa w postaci kanału zamkniętego o wymiarach  $600 \times 60 \times 170$  mm i ściankach ze szkła organicznego.

Pomiar natężenia przepływu odbywał się przy użyciu wspomnianego już przelewu, natomiast pomiar ciśnienia w komorze badawczej – za pomocą różnicowego manometru rtęciowego.

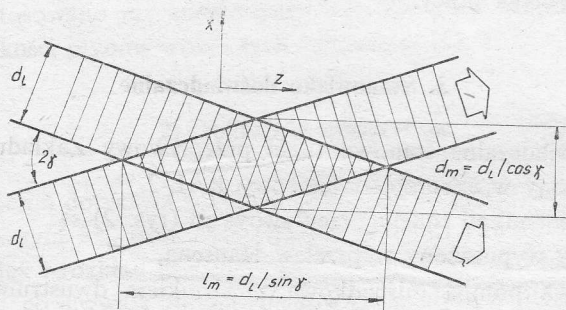
W komorze pomiarowej zamocowano płat NACA 2418 o cięciwie  $l = 120$  mm. Pomiaru rozkładu prędkości dokonywano skonstruowanym w Zakładzie Dynamiki Plazmy IMP PAN anemometrem laserowym RAL-2 [16, 17] wyposażonym w elektroniczny układ obróbki sygnału zwany „trackerem” (układem śledzącym) [18].

Anemometr RAL-2 należy do typu różnicowych anemometrów laserowych, wytwarzających wokół żądanego, badanego punktu, obszar pomiarowy w kształcie elipsoidy obrotowej, z którego wychodzi sygnał będący informacją o prędkości płynu.



Rys. 2. Schemat tunelu przepływowego Zakładu Dynamiki Cieczy IMP PAN

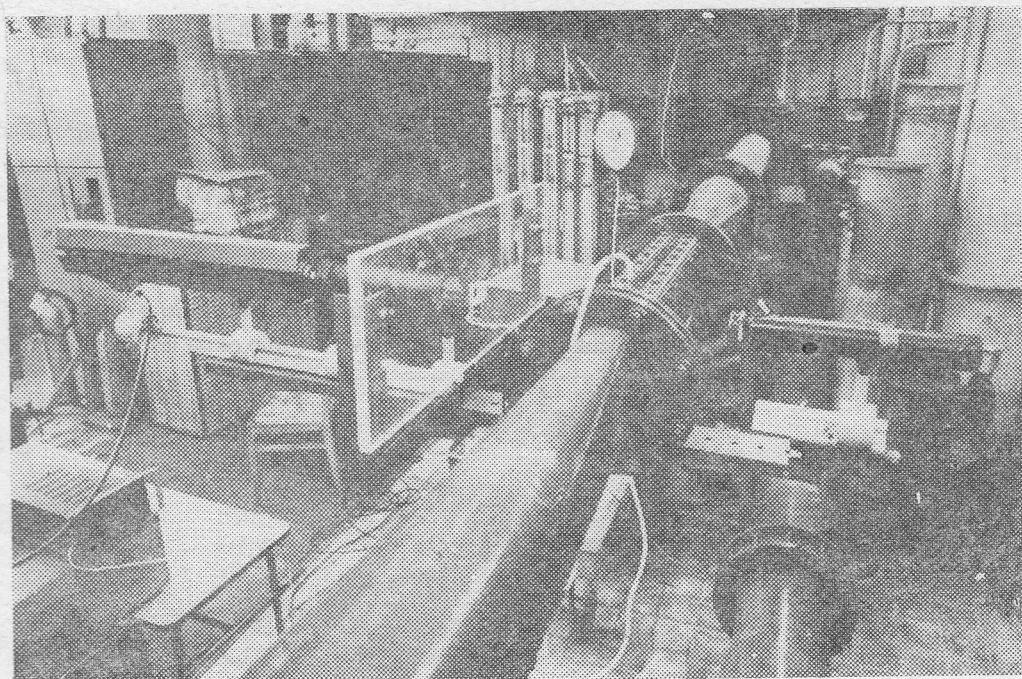
Obszar pomiarowy tworzący jest przez dwie przecinające się wiązki laserowe. Wielkość obszaru pomiarowego (jego wymiary liniowe) wyznaczona jest przez parametry wiązki laserowej i układu optyki formującej ten obszar (rys. 3). Anemometr RAL-2 został wyposażony w układ optyczny, który pozwolił na otrzymanie obszaru pomiarowego o dłu-



Rys. 3. Uproszczony schemat obszaru pomiarowego w płaszczyźnie  $xz$

gości  $l_m = 4,95$  mm oraz maksymalnej średnicy  $d_m = 0,31$  mm. W praktyce wielkości te wyznaczają przestrzenną zdolność rozdzielczą anemometru. Szczegółowe informacje o budowie i zasadzie działania anemometru RAL-2 znaleźć można w opracowaniach [16] oraz [17] i dlatego nie przytacza się ich w tej pracy.

Anemometr zamontowano na specjalnie zaprojektowanym oraz wykonanym suporcie przesuwym. Suport przesuwany umożliwił przemieszczenie anemometru, a więc i obszaru pomiarowego, wzdłuż trzech ortogonalnych osi  $x$ ,  $y$ ,  $z$  w dowolnym miejscu wewnątrz kanału. Przemieszczenie obszaru pomiarowego wzdłuż każdej z osi jest niezależne. Dokładność przemieszczenia obszaru pomiarowego wynosi  $\pm 0,5$  mm wzdłuż osi  $x$  i  $z$  oraz  $\pm 0,10$  mm wzdłuż osi  $y$ . Widok stanowiska doświadczalnego z anemometrem laserowym RAL-2 zamocowanym na suporcie przesuwym przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Anemometr laserowy RAL-2 na stanowisku pomiarowym

#### 4. Sposób przeprowadzenia pomiaru – wyniki doświadczalne

Pierwsze, próbne pomiary prędkości w tunelu przepływowym wykazały, że okna komory badawczej, wykonane ze szkła organicznego, nie odpowiadają warunkom koniecznym dla rzetelnych badań. Okna te od strony wewnętrznej pokryte były siatką mikro-pęknięć, co powodowało szkodliwe efekty rozpraszania i załamania wiązek laserowych i tym samym powstawanie fałszywych sygnałów o prędkości cieczy. Z tego powodu dokonano wymiany okien. Płyty ze szkła organicznego o grubości  $d=15$  mm poddano procesowi polerowania powierzchni, gdyż na powierzchniach tych znajdowały się rysy powstałe w procesie obróbki kształtu. Tak przygotowane okna zostały zamontowane w ścianach komory przepływowej.

Okna komory przepływowej, a w szczególności ich grubość i rodzaj materiału, odgrywają pewną rolę w określeniu położenia obszaru pomiarowego wewnątrz komory. Jak wiadomo z praw optyki geometrycznej, promień światła przechodzący przez różne ośrodki ulega na granicy tych ośrodków załamaniu.

Jak to pokazuje rysunek 5, wiązki laserowe, przechodząc przez okna komory przepływowej, ulegają dwukrotnemu załamaniu, co w rezultacie daje przesunięcie środka obszaru pomiarowego wzdłuż osi optycznej układu optycznego anemometru laserowego. Obszar pomiarowy przesunie się o  $\Delta z$  względem swego położenia, gdy nie ma okna i cieczy w komorze przepływowej i jest umiejscowiony w odległości  $z'$  od wewnętrznej powierzchni okna.

Wielkości  $z'$  i  $\Delta z$  można wyznaczyć z zależności geometrycznych:

$$z' = x' \operatorname{ctg} \gamma, \quad (1)$$

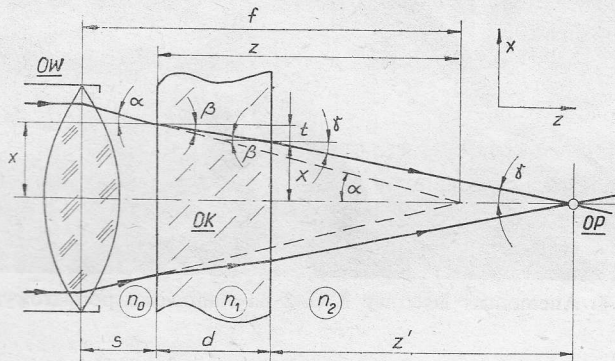
$$x' = z \operatorname{tg} \alpha - t, \quad (2)$$

$$t = d \operatorname{tg} \beta, \quad (3)$$

skąd

$$z' = (z \operatorname{tg} \alpha - d \operatorname{tg} \beta) \operatorname{ctg} \gamma. \quad (4)$$

Znaczenie występujących tu symboli  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $t$ ,  $x'$ ,  $z$ , wynika bezpośrednio z rysunku 5. Warto zauważyć, że kąt padania  $\alpha$  wiązek laserowych na powierzchnię okna jest bezpośred-



Rys. 5. Schemat do wyznaczania rzeczywistego położenia obszaru pomiarowego w przepływie  
 OW – optyka wejściowa anemometru laserowego, OK – okno kanału, OP – obszar pomiarowy

nio związany z ogniskową  $f$  soczewki optyki wejściowej anemometru. W opisanym tu eksperymencie ogniskowa ta wynosiła  $f=297$  mm. Oznaczając odpowiednio przez  $n_0=1$ ,  $n_1=1,49$  i  $n_2=1,33$  współczynniki załamania światła w powietrzu, szkłe organicznym i wodzie, mamy

$$\sin \beta = \sin \alpha \cdot n_0/n_1 = \sin \alpha/n_1, \quad (5)$$

$$\sin \gamma = \sin \beta \cdot n_1/n_2 = \sin \alpha/n_2. \quad (6)$$

Z równań (4), (5) i (6) wynika, że

$$z' = z \frac{\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \alpha}}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}} - d \frac{\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \alpha}}{\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \alpha}}. \quad (7)$$

Dla małych kątów  $\alpha$  zależność (7) można przedstawić w postaci uproszczonej

$$z' = zn_2 - d \frac{n_2}{n_1}. \quad (8)$$

Zależności (7) i (8) pozwalają na dokładne określenie położenia obszaru pomiarowego anemometru laserowego w badanym przepływie przy określonej grubości okna.



W praktyce realizowano to w następujący sposób: chcąc umieścić obszar pomiarowy w dowolnym punkcie pomiędzy oknami w przepływie posługiwano się zamieszczoną poniżej tabelą (tab. 1) wartości  $z'$  obliczonych w zależności od odległości  $s$  anemometru laserowego od powierzchni zewnętrznej okna kanału. Jak widać z tabeli, chcąc np. umieścić obszar pomiarowy w osi kanału, należy ustawić anemometr laserowy w odległości 364 mm od zewnętrznej powierzchni okna.

Tabela 1

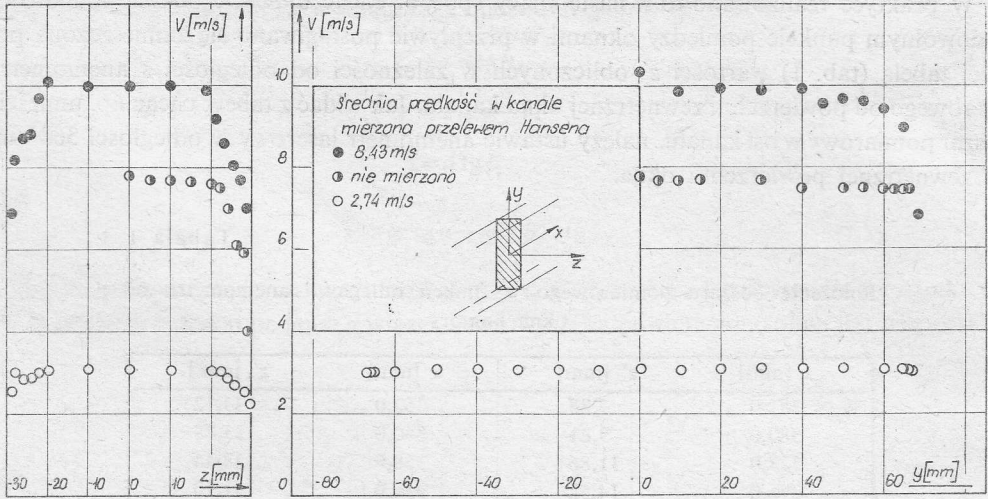
Położenie obszaru pomiarowego w funkcji odległości anemometru od okna komory

$s$ [mm]	$z'$ [mm]	$s$ [mm]	$z'$ [mm]
381,0	7,88	362,0	33,12
380,0	9,21	360,0	35,78
378,0	11,86	358,0	38,44
376,0	14,52	356,0	41,10
374,0	17,18	354,0	43,76
372,0	19,84	352,0	46,41
370,0	22,49	350,0	49,10
368,0	25,15	348,0	51,73
366,0	27,81	346,0	54,39
364,0	30,47	344,0	57,04
		342,0	59,70

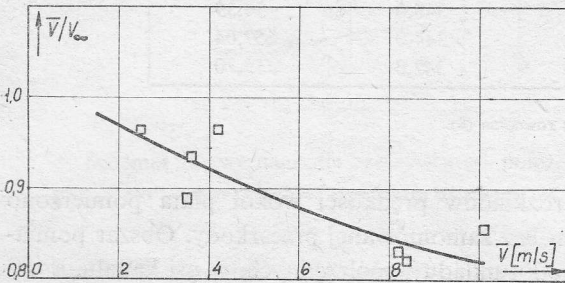
Uwaga: Wartości  $z'$  obliczone zostały z równania (8).

Przed przystąpieniem do zbadania rozkładów prędkości wokół płata pomierzono profile prędkości w kanale przepływowym bez zamontowanej przeszkody. Obszar pomiarowy był umiejscawiany najpierw w początku układu współrzędnych, w osi kanału, a następnie przemieszczany pionowo (wzdłuż osi  $y$ ) oraz w poprzek przepływu (wzdłuż osi  $z$ ). Z uwagi na obecność ram zabezpieczających szyby kanału, pomiarami nie objęto bezpośredniego sąsiedztwa dolnej i górnej ścianki. Wyniki przeprowadzonych pomiarów przedstawiono na rysunku 6. Ponadto określono stosunek prędkości średniej  $\bar{v}$  mierzonej przewodem Hansena do prędkości  $v_\infty$ , w osi kanału. Zwraca uwagę spadek tego stosunku z prędkością przepływu (rys. 7). Fakt ten wydaje się związany z pojawieniem się dużych zawirowań turbulentnych.

Pomiary rozkładu prędkości wokół płata NACA 2418 prowadzono zarówno w przepływie od noska ku ostrzu profilu, jak i w przepływie odwróconym. Celem określenia prędkości na brzegu warstwy przyściennej wyznaczono przybliżone profile prędkości w jej wnętrzu, oddalając wiązkę laserową co 0,5 mm w kierunku pionowym od opływanej powierzchni. Jedno z położenia obszaru pomiarowego nad płatem NACA 2418 widoczne jest na rysunku 8. Na rysunku 9 przedstawiono natomiast wyniki pomiarów prędkości dla dwóch kątów natarcia w przepływie odwróconym. Na osi odciętych zaznaczono mierzoną wzdłuż cięciwy odległość od noska profilu, zaś na osi rzędnych, mierzoną wzdłuż kierunku pionowego odległość od powierzchni płata. Zakreskowanymi prostokącikami zaznaczono prędkości na przypuszczalnym brzegu warstwy przyściennej, nanoszone na-



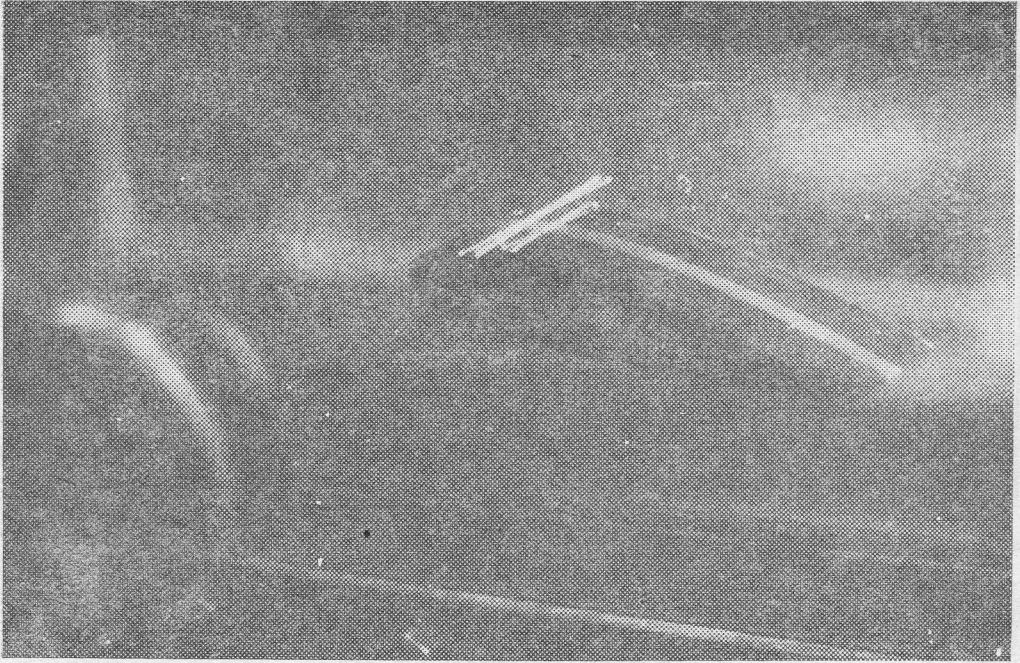
Rys. 6. Rozkład prędkości w komorze przepływowej na podstawie pomiaru anemometrem laserowym



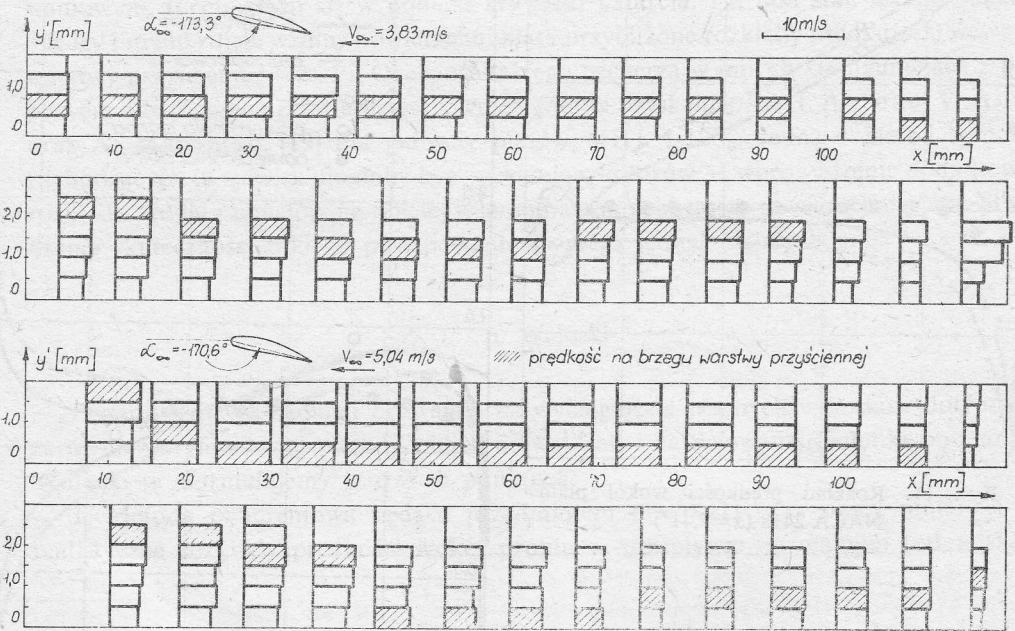
Rys. 7. Stosunek prędkości średniej  $\bar{v}$  w kanale (pomiar przezletem Hansena) do prędkości w osi kanału (pomiar anemometrem laserowym)

stępnie na wykres rozkładu prędkości wokół płata. Wykresy takie dla kątów natarcia  $\alpha = 5,26^\circ, 9,41^\circ$  i  $173,3^\circ$  przedstawiono na rysunkach 10, 11 i 12. Na osi rzędnych każdego z nich przedstawiono odniesioną do prędkości w osi kanału prędkość na brzegu warstwy przyściennej, zaś na osi odciętych – mierzoną wzdłuż cięciwy odległość od noska profilu. Na tych samych wykresach naniesiono również rozkłady prędkości uzyskane drogą teoretyczną bez uwzględnienia i z uwzględnieniem warstwy przyściennej. Wnioski płynące z tego zestawienia zostaną przedstawione w następnym rozdziale.

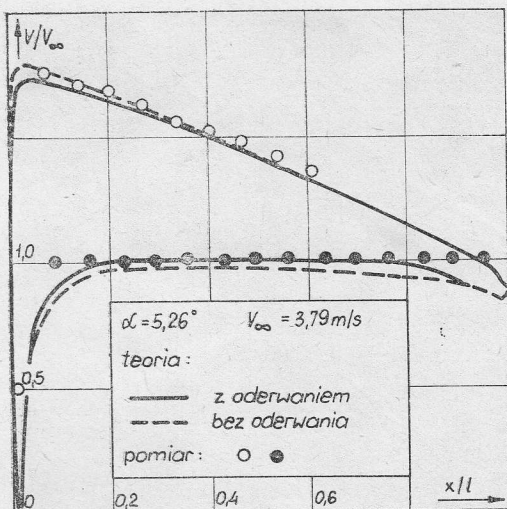
W dogodnych warunkach laboratoryjnych anemometr laserowy RAL-2 umożliwia pomiary prędkości z dokładnością 1%. W omawianym tutaj eksperymencie poważnych trudności nastroczała wibracja stanowiska oraz niewielkie pulsacje przepływu. Z tego względu prędkość w każdym punkcie pomiarowym była wyznaczana na podstawie dziesięciu odczytów. Odpowiadające tej procedurze odchylenie standardowe wyników pomiaru zależało od poziomu turbulencji. W warunkach przepływu normalnego, w obszarze, gdzie należało się spodziewać przyłączonej warstwy przyściennej, odchylenie to wynosiło zwykle 1%, by wzrosnąć do 3% i więcej w obszarze oderwania. Podobnie było w wa-



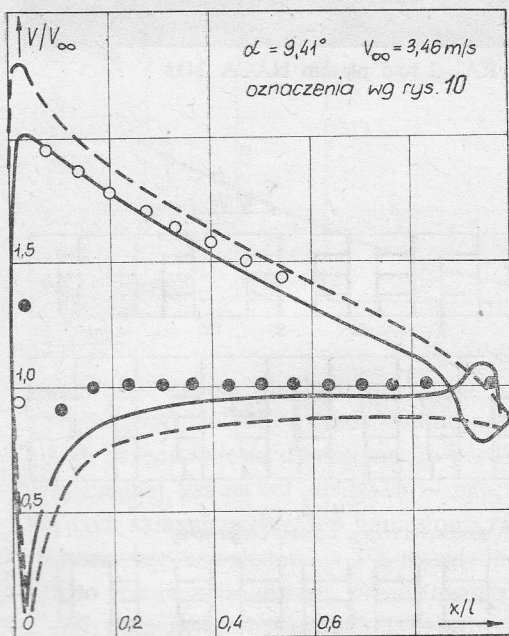
Rys. 8. Wiązki laserowe anemometru RAL-2 nad płatem NACA 2418



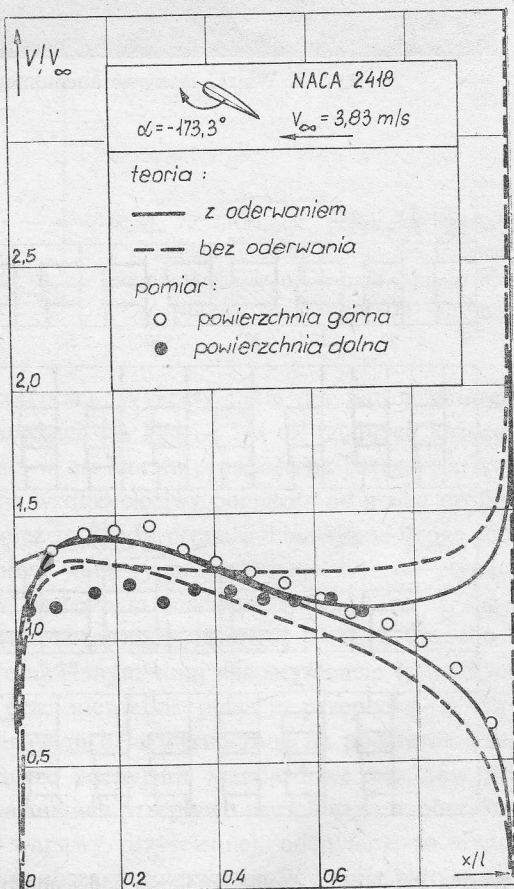
Rys. 9. Przybliżone profile prędkości nad i pod płatem NACA 2418 w przepływie odwróconym



Rys. 10. Rozkład prędkości wokół płata NACA 2418 ( $\alpha = 5,26^\circ$ )



Rys. 11. Rozkład prędkości wokół płata NACA 2418 ( $\alpha = 9,41^\circ$ )



Rys. 12. Rozkład prędkości wokół płata NACA 2418 ( $\alpha = -173,3^\circ$ )

runkach przepływu odwróconego, z tym, że po stronie ssawnej odchylenie cały czas przekraczało 3%. W przepływie bez płata odchylenie standardowe wynosiło zwykle 3%.

Błąd związany z pomiarem średniej prędkości przepływu przelewem Hansena wynosił około 0,01 m/s, natomiast błąd pomiaru kąta natarcia był mniejszy niż 15'.

## 5. Zestawienie wyników doświadczalnych i teoretycznych — dyskusja

Z rysunku 10 widać, że przy kącie natarcia  $\alpha = 5,26^\circ$  uzyskuje się zupełnie zadowalającą zgodność teoretycznego i doświadczalnego rozkładu prędkości wokół płata. Krzywe teoretyczne uzyskane bez uwzględnienia warstwy przyściennej i z jej uwzględnieniem położone są bardzo blisko siebie. Oznacza to, że stosowanie w tym przypadku założenia o bezoderwaniowym opływie cieczą doskonałą jest zupełnie uzasadnione.

Sytuacja ma się odmiennie przy kącie natarcia  $\alpha = 9,41^\circ$  (rys. 11). Maksymalna prędkość uzyskana na profilu przy założeniu bezoderwanioowego opływu cieczą doskonałą przekracza o około 1/7 wartość uzyskaną z pomiarów. Wyraźną poprawę zgodności wyników teoretycznych i doświadczalnych uzyskuje się dopiero po uwzględnieniu zjawiska oderwania w pobliżu krawędzi splywu.

Znacznie gorzej jest w przypadku przepływu odwróconego (rys. 12). Zadowalającą zgodność między pomierzonym a obliczonym rozkładem prędkości uzyskuje się jedynie po ciśnieniowej stronie płata. Po stronie ssawnej mamy najwyraźniej do czynienia nie tylko z oderwaniem sięgającym poza krawędź splywu — które to zjawisko założono konstruując stosowaną tu metodę obliczeniową — ale również z długim pęcherzem oderwaniowym, formującym się w pobliżu krawędzi natarcia. Na taki stan rzeczy wskazują między innymi zdjęte wzdłuż powierzchni płata przybliżone rozkłady prędkości\*) wewnątrz warstwy przyściennej (rys. 9). Obecność takiego pęcherza w innych konfiguracjach z przepływem odwróconym potwierdzają również wyniki uzyskane przez I. Antona, V. Anton oraz A. Mathe'go [19] dla palisady płatów MHT 1-12%. Jedną z metod symulacji zachodzących tu zjawisk mogłoby być — zdaniem autorów — wprowadzenie dodatkowego rozkładu źródeł i upustów na objętej wspomnianym pęcherzem powierzchni płata. Stwierdzenie skuteczności takiego postępowania wymaga jednak dalszych prac.

## 6. Wnioski

Przeprowadzone badania pozwalają na wyciągnięcie pewnych wniosków dotyczących zarówno weryfikowanej metody obliczeniowej, jak i zastosowanej techniki pomiarowej. Wnioski te sformułujemy w dwóch punktach:

1. Metoda obliczeniowa będąca przedmiotem pracy [1] oraz pracy niniejszej daje realistyczne rozkłady prędkości wokół profilu w przepływie normalnym (od noska ku

\*) Trzeba w tym miejscu przypomnieć, że anemometr laserowy RAL-2 nie umożliwił określenia zwrotu wektora prędkości przepływu i dlatego na rysunku 9 naniesiono jedynie wartość bezwzględną składowej równoległej do opływanej powierzchni.

ostrzu profilu) bez oderwania lub z oderwaniem sięgającym poza krawędź spływu. W przypadku długiego pęcherza oderwaniowego w pobliżu krawędzi natarcia zgodność teorii z doświadczeniem jest wciąż niezadowalająca. Uwaga powyższa dotyczy w szczególności przepływu odwróconego. Konieczne są dalsze prace zmierzające do właściwej symulacji długich pęcherzy na powierzchni ciała.

2. Metoda anemometrii laserowej umożliwia dokładny pomiar rozkładu prędkości wokół płata. Poważnym utrudnieniem badań prowadzonych w tunelu IMP PAN były jednak drgania komory pomiarowej oraz niewielkie pulsacje przepływu. Dlatego pełne wykorzystanie wysokiej precyzji anemometru RAL-2 wymaga usunięcia źródeł tych utrudnień przez odpowiednie zabiegi konstrukcyjne.

Praca wpłynęła do Redakcji w styczniu 1984 r.

### Literatura

- [1] J. Steller, *Nieściśliwy opływ profilu umieszczonego w palisadzie prostoliniowej oraz między ściankami równoległymi z uwzględnieniem niektórych zjawisk zachodzących w warstwie przyściennej*. Prace IMP, z. 87, 1984.
- [2] K. Jacob, *Berechnung der Potentialströmung um Profile mit Absaugung und Ausblasen*. Ing. Archiv., Bd. 32, H. 1, 1963, S. 51 - 65.
- [3] K. Jacob, *Berechnung der abgelösten inkompressiblen Strömung um Tragflügelprofile und Bestimmung des maximalen Auftriebs*. Z. Flugwiss., Bd. 17, 1969, S. 221.
- [4] K. Jacob, *Weiterentwicklung eines Verfahrens zur Berechnung der abgelösten Profilströmung mit besonderer Berücksichtigung des Profilwiderstandes*. Deutsche Luft- und Raumfahrt - Forschungsbericht 26 - 36, 1976.
- [5] K. Jacob, *A method for prediction of subsonic flow around airfoil systems with separation*. EURO-MECH Colloquium-129 „Computation of flows around systems of airfoils”, Varna, May 1980; VME I „V. I. Lenin”, Sofia 1981.
- [6] E. Martensen, *Berechnung der Druckverteilung an Gitterprofilen in ebener Potentialströmung mit einer Fredholmschen Integralgleichung*. Arch. Rat. Mech. Anal., Vol. 3, 1959, S. 235 - 270.
- [7] E. Martensen, K. von Sengbusch, *Über die Randkomponenten ebener harmonischer Vektorfelder*. Arch. Rat. Mech. Anal., Vol. 5, 1960, pp. 46 - 75.
- [8] W. Geller, *Calculation of the turning angle of two-dimensional incompressible flow*. AIAA Journ., Vol. 14, March 1976, pp. 297 - 29.
- [9] D. Steinbach, *Berechnung der Strömung mit Ablösung für Profile und Profilsysteme in Bodennähe oder in geschlossenen Kanälen*. Z. Flugwiss. Weltraumforsch., Bd.2, 1978, S. 293.
- [10] W. J. Prosnak, *On a method of computing the plane steady flow around a profile situated between straight parallel lines*. Bull. Ac. Pol. Sci., Ser. Sci. Tech., Vol. XX, No 4, 1972.
- [11] J. Steller, *Przewidywanie kawitacji na profilach lopatkowych stosowanych w hydraulicznych maszynach odwracalnych*. Załącznik do rozprawy doktorskiej, IMP PAN, Gdańsk 1983.
- [12] B. Koch, H. J. Pfeifer, *The Laser-Doppler Anemometer as a tool for aerodynamic flow-fluid measurements*. Laser+Elektro-Optik, No 6, 1973.
- [13] R. Oba, T. Ikohagi, S. Yasu, *Supercavitating cavity observations by means of laser velocimeter*. Trans. ASME, J. Fl. Eng., Vol 102I, December, 1980.
- [14] A. E. von Doenhoff, *Theory of wing sections*. Dover Publications Inc., New York 1959.
- [15] F. W. Riegels, *Aerodynamische Profile*. R. Oldenbourg, München 1958.
- [16] J. Konieczka, J. Mizeraczyk, S. Kwaśniewski, *Differential laser anemometer for flow measurements*. IIIrd Conf. on Fluid Mechanics, Technical University of Częstochowa, 1978, pp. 69 - 71.

- [17] J. Mizeraczyk, J. Konieczka, S. Kwaśniewski, D. Jonaszek, J. Wasilewski, J. Zieman, W. Urbanik, R. Nieżorawski, K. Matsuura, *Różnicowy anemometr laserowy z cyfrowym układem obróbki sygnału*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 88/981/80.
- [18] W. Szkudliński, E. Morzyński, J. Mizeraczyk, W. Urbanik, J. Konieczka, K. Matsuura, *Frequency tracking demodulation of laser anemometer signals*. IXth Conf. on Quantum Electronics and Nonlinear Optics, Inst. Physics, A. Mickiewicz University, Poznań 1980, paper A-40.
- [19] I. Anton, V. Anton, A. Mathe, *Airfoil cascades working under normal and reversed flow*. Rev. Roum. Sci. Techn. — Mec. Appl., t. 22, No 1, 1977, p. 63.

## Распределение скоростей вокруг крыла помещенного в проточной трубе — проверка некоторого расчетного метода при помощи лазерного анемометра

### Резюме

Обсуждаются некоторые результаты полученные методом теоретического определения распределения скоростей вокруг крыла между параллельными стенками, с учетом явления отрыва. Этот метод является приспособлением известного метода К. Якоба и предметом ранней работы одного из авторов (см.: Я. Стеллер, *Несжимаемое обтекание профиля помещенного в прямоугольной решетке и между параллельными стенками с учетом некоторых явлений происходящих в пограничном слое*. Труды ИПМ, вып. 87, 1984). Коротко обсуждается зависимость интерационного процесса, а затем представляются результаты экспериментальной верификации. Эта верификация заключалась в сравнении теоретических распределений скоростей вокруг профиля NACA 2418 в проточной трубе Института проточных машин ПАН с распределениями полученными в результате измерений лазерным анемометром RAL-2. Обсуждается способ проведения измерений, а особенно способ определения расположения зоны измерений и учета пограничного слоя на поверхности крыла. В результате проведенных измерений констатируется, что проверяемый метод дает реальные распределения скоростей вокруг профиля для нормального обтекания (от носка до острия профиля) без отрыва и с отрывом распространяющемся за выходную кромку. В случае длинного отрывного пузыря вблизи кромки атаки сходимость теории с экспериментом все еще неудовлетворительна. Это примечание относится особенно к обратному течению. Необходимо дальнейшие работы направленные на надлежащую симуляцию длинных пузырей на поверхности крыла.

## Velocity Distribution Round a Foil Placed in a Flow Channel — Verification of a Calculation Method With a Laser Doppler Anemometer

### Summary

Some results of theoretical determination of velocity distribution in a separated flow round a foil placed between parallel walls are discussed. The method used is an adaptation of the well-known K. Jacob's method and has been presented in an earlier paper by one of the authors (see: J. Steller *Incompressible Flow Round a Profile in a Rectilinear Cascade or Between Parallel Walls with Some Boundary-Layer Phenomena Taken into Account*. Trans. IF-FM, No. 87, 1984). The convergence of an iterative procedure is shortly discussed and the results of an experimental verification are presented afterwards. The verification consisted in comparing theoretical velocity distributions round a NACA 2418 airfoil placed in a flow tunnel of the Institute of Fluid-Flow Machinery, Pol. A. Sci., in

Gdańsk with the velocity distributions obtained from the measurements using the Laser Doppler Anemometer RAL-2. There are discussed some details of the measuring procedure covering the method of determining the measuring region location as well as the boundary layer effect in the close vicinity of the foil surface. The measuring results allowed to state that the method under verification gives realistic velocity distributions round a foil section in a normal flow (from the profile nose to the trailing edge) with no separation and with separation region reaching beyond the trailing edge. In the case of a long separation bubble appearing close to the leading edge the consistency between theory and experiment is still unsatisfactory. The above remark concerns in particular the reversed flow. Further efforts aiming at proper simulation of long separation bubbles at a foil surface are needed.