

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

92

WARSZAWA—POZNAŃ 1990

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 Fiszerka 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1990

Printed in Poland

ISBN 83-01-10189-X
ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Ark. wyd. 17,75. Ark. druk. 13. Papier druk. sat. kl. III, 70 g, 70 × 100 cm
Oddano do składania w lipcu 1989 r. Podpisano do druku w listopadzie 1990 r.
Druk ukończono w grudniu 1990 r. Zam. nr 1079/89

Zakłady Graficzne im. KEN w Bydgoszczy

SŁAWOMIR BEDNAREK, JANUSZ W. ELSNER, MAREK TRZCIŃSKI

Częstochowa*)

Analiza przepływu za wieńcem wirnikowym stopnia turbinowego**)

W pracy przedstawiono rozkłady prędkości średniej, wzdłużnej intensywności turbulencji oraz kąta wypływu strugi za wieńcem wirnikowym jednostopniowej, powietrznej turbiny modelowej przy różnych wartościach stosunku prędkości u/C_{os} . Stwierdzono, że przy stałym stosunku ciśnieni w stopniu $\pi = 0,9$, zmiany stosunku prędkości w granicach $0,45 \leq u/C_{os} \leq 0,65$ oddziałują w istotny sposób na charakterystykę pola prędkości za wieńcem wirnikowym, szczególnie zaś na promieniowe rozkłady kąta wypływu strugi.

1. Wstęp

Analiza zjawisk przepływowych występujących w układach łopatkowych turbin ze względu na ich złożoność (trójwymiarowy i niestacjonarny charakter pól wielkości fizycznych, wysoki poziom turbulencji itp.) nie jest jak dotąd w pełni możliwa metodami teoretycznymi. W tych warunkach głównym źródłem informacji o charakterze tych zjawisk, stają się odpowiednio zaprogramowane badania eksperymentalne, zarówno prostych palisad łopatkowych przeprowadzane w tunelach aerodynamicznych, jak również stopni modelowych w jedno- i wielostopniowych turbinach doświadczalnych.

Racjonalna optymalizacja i unifikacja konstrukcji oraz opracowanie komputerowych metod projektowania układów łopatkowych turbin wymaga intensywnego rozwijania eksperymentalnych badań modelowych stopni turbinowych. Charakterystyki sprawnościowo-przepływowe określone w ten sposób dla szerokiego zakresu zmian parametrów geometryczno-konstrukcyjnych stopni oraz zmiennych warunków ich pracy, wykorzystywane są głównie do:

- weryfikacji metod obliczeniowych stopni turbinowych oraz stworzenia odpowiedniej bazy danych dla procesu projektowania,
- optymalnego kojarzenia profili kierowniczych i wirnikowych, mającego zapewnić maksymalną sprawność stopnia turbinowego,
- ustalenia odpowiednich wskaźników korekcyjnych, które umożliwiają „prze-

* Instytut Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej.

** Praca wykonana w ramach tematu 6.4.2 „Metody optymalizacji stopni turbin parowych” programu rządowego PR-8 koordynowanego przez Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku.

noszenie” wyników badań palisadowych na układy łopatkowe maszyn rzeczywistych,

- weryfikacji skuteczności mikro- i makrooddziaływań stosowanych w celu zmniejszenia intensywności niepożądanych procesów dyssypatywnych towarzyszących przepływowi czynnika przez układ łopatkowy,

- programowania badań eksperymentalnych palisad łopatkowych w tunelach aerodynamicznych oraz stopni w jedno- i wielostopniowych turbinach modelowych.

Badania przepływowe układów łopatkowych z wykorzystaniem turbin modelowych prowadzone są już od wielu lat w różnych ośrodkach badawczych. Wiele interesujących informacji dotyczących metodyki badań modelowych stopni turbinowych, analizy uzyskanych wyników oraz ich wykorzystania w obliczeniach projektowych można znaleźć m. in. w [1, 2, 3, 4].

Sprawność obwodowa stopnia η_w , określana w badaniach modelowych turbin jednostopniowych, uwzględnia zazwyczaj wszystkie pozycje strat z wyjątkiem wynikających z oddziaływania stopni sąsiednich, a zwłaszcza poprzedzającego, który „przygotowuje” strukturę pola prędkości napływającego czynnika [3]. W efekcie otrzymuje się odmienny w modelu i w rzeczywistości charakter pola prędkości dółkowej C_0 , przy czym różnice dotyczą zarówno jej wartości jak i kierunku. Zagadnienie to może mieć istotne znaczenie przy wykorzystywaniu wyników badań do obliczeń stopnia w zmiennych warunkach pracy, kiedy to kąt wpływu strugi ze stopnia poprzedzającego $\alpha_2 \approx \alpha_0$ znacznie różni się od $\pi/2$ [3].

W pracy podjęto próbę eksperymentalnego określenia pola prędkości za wieńcem wirnikowym osiowego, akcyjnego stopnia turbinowego z łopatkami cylindrycznymi typu N3/R2 (R1), stosowanymi przez ZAMECH w Elblągu w turbinach ciepłowniczych drugiej generacji. Uzyskane wyniki, charakteryzujące jednocześnie parametry strugi na wlocie do wieńca kierowniczego następnego stopnia turbiny, mogą stanowić podstawę do:

- weryfikacji stosowanej dotąd analizy pomiarów charakterystyk stopni modelowych,

- weryfikacji metod obliczeniowych stopni turbinowych z łopatkami cylindrycznymi,

- korekty wyników badań modelowych prostych palisad łopatkowych w tunelach aerodynamicznych, oraz

- opracowania programów dalszych badań izolowanych palisad pierścieniowych, stopni i grup stopni modelowych.

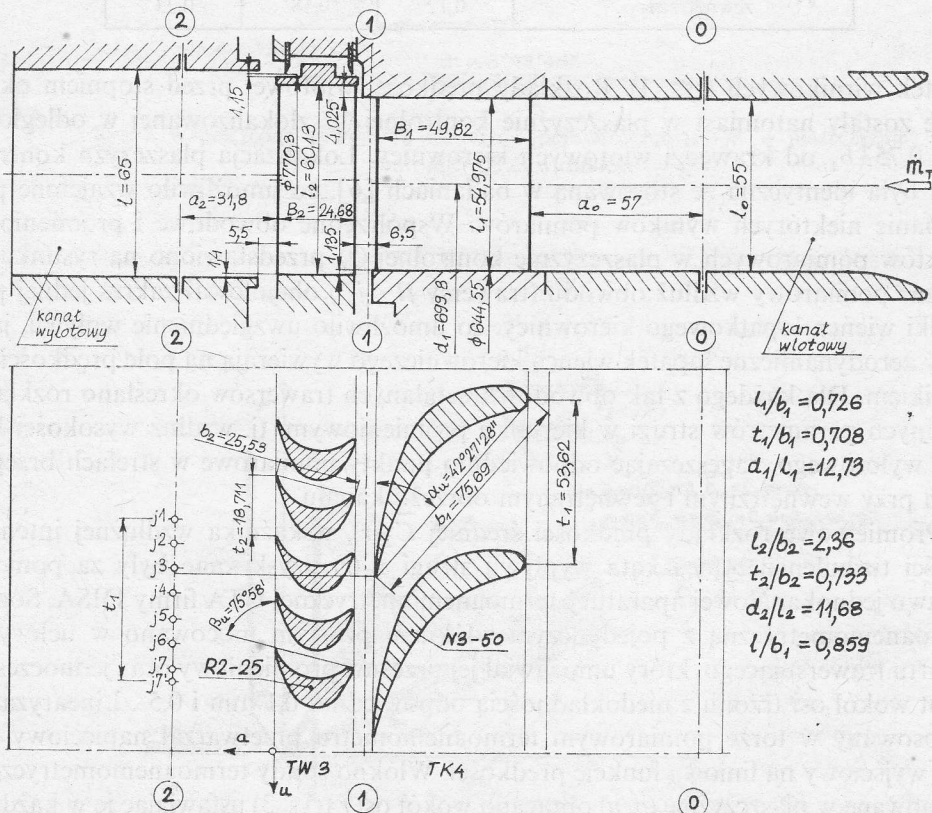
2. Program eksperymentu, stanowisko badawcze i metodyka pomiarów

Głównym celem badań było określenie rozkładów prędkości średniej C_2 , wzdłuż niej intensywności turbulencji ε_2 oraz kąta wypływu α_2 za stopniem turbiny modelowej przy różnych stosunkach prędkości $u/C_{os} = 0,45 \div 0,65$ (u – prędkość obwodowa wieńca wirującego na średnicy podziałowej, C_{os} – prędkość obliczona z izentropowego spadku entalpii w stopniu).

Badania eksperymentalne przeprowadzono na stanowisku pomiarowym jedno-stopniowej, powietrznej turbiny modelowej AG-9/I $\varnothing 1000$ Instytutu Techniki Ciepłej w Łodzi [5]. Obiektem badań był osiowy stopień modelowy typu akcyjnego złożony z wieńców łopatkowych o profilach N3-50/R2-25 i wysokości łopatek wirnikowych $l_2 = 60,13$ mm ($l_2/b_2 = 2,36$). Badania przeprowadzono przy ustalonych parametrach geometryczno-konstrukcyjnych stopnia dla trzech różnych wartości stosunku $u/C_{os} = 0,45, 0,54, 0,65$, które uzyskiwano przez zmianę prędkości obrotowej turbiny (regulacja momentu obciążenia wirnika hamulcem hydraulicznym) przy ustalonym stosunku ciśnień $\pi = p_2/p_{oc} = 0,9 = idem$, a więc w przybliżeniu przy stałym izentropowym spadku entalpii w stopniu. Należy tutaj zwrócić uwagę, że stopień maszyny rzeczywistej pracuje zazwyczaj przy $n = idem$, a odpowiednia wartość stosunku u/C_{os} uzyskiwana jest przez zmianę stosunku ciśnień π .

Podstawowe parametry geometryczne kanału przepływowego powietrznej turbiny modelowej AG-9/I, wieńców łopatkowych oraz lokalizację płaszczyzn kontrolnych przedstawiono na rysunku 1, natomiast podstawowe parametry charakteryzujące warunki pracy badanego stopnia zestawiono w tabeli 1.

Badania podstawowe przeprowadzono w płaszczyźnie kontrolnej ② usytuowanej w kanale wylotowym turbiny w odległości $a_2 = 1,25b_2$ od krawędzi spływowych



Rys. 1. Kanał przepływowy powietrznej turbiny modelowej AG-9/I $\varnothing 1000$ (stopień N3-50/R2-25)

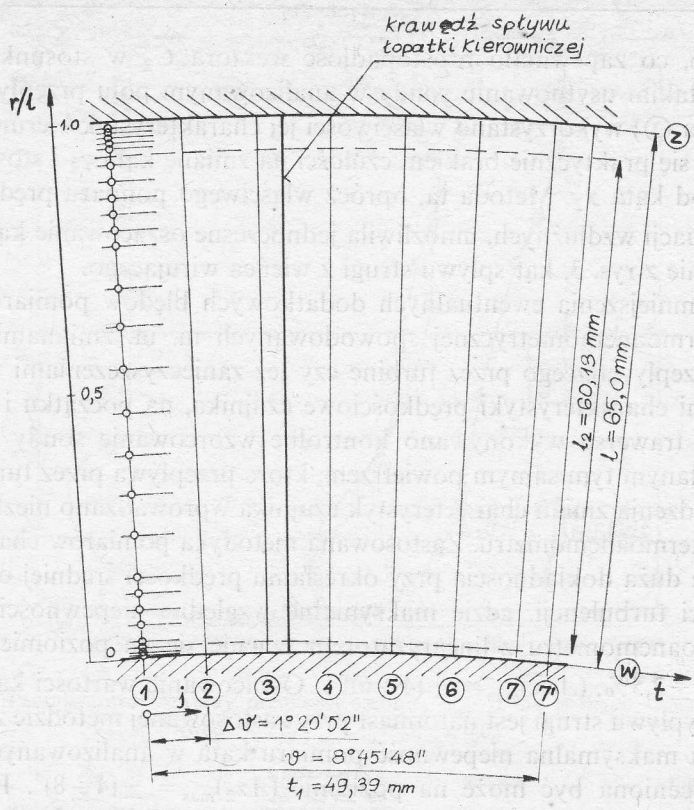
Tabela 1

Parametry charakteryzujące pracę stopnia turbinowego N3-50/R2-25

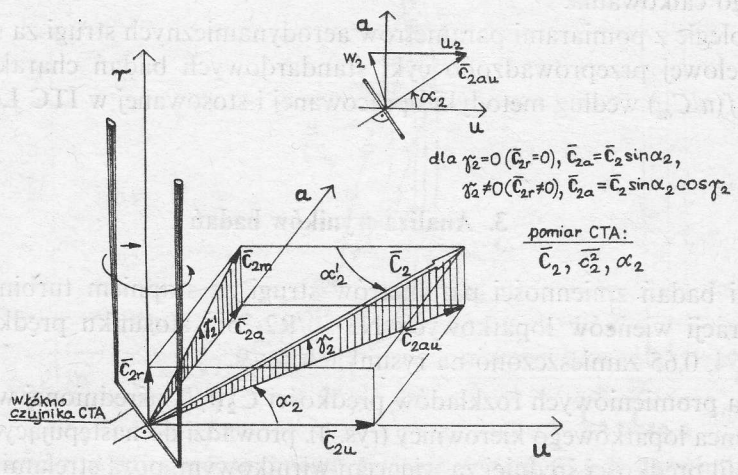
Stosunek prędkości u/C_{os}	0,45	0,54	0,65
Stosunek ciśnień w stopniu, $\pi = p_2/p_{0c} \quad (p_2 = p_b)$	0,90	0,90	0,90
Liczba obrotów wirnika, $n \text{ [min}^{-1}\text{]}$	1706	2037	2478
Strumień masy przepływu przez ułopatkowanie kierownicy, $\dot{m}_T \text{ [kg/s]}$	4,2 ÷ 4,21	4,09 ÷ 4,11	3,95 ÷ 3,98
Liczba Reynoldsa, $Re_{C_1} = \frac{b_1 C_1}{\nu_1}$	$5,67 \cdot 10^5$	$5,55 \cdot 10^5$	$5,38 \cdot 10^5$
Liczba Macha, $Ma_{C_1} = \frac{C_1}{a_1}$	0,37	0,36	0,35
Udział dynamiczny wirnika na średnicy wewnętrznej ϱ_w zewnętrznej ϱ_z	0 0,12	0,06 0,18	0,11 0,23

łopatek wirnikowych (rys. 1). Rozkłady prędkości wlotowej przed stopniem określone zostały natomiast w płaszczyźnie kontrolnej ① zlokalizowanej w odległości $a_0 = 0,753 b_1$ od krawędzi wlotowych kierownicy. Lokalizacja płaszczyzn kontrolnych była identyczna ze stosowaną w badaniach [6], co umożliwiło wzajemne porównanie niektórych wyników pomiarów. Współrzędne obwodowe i promieniowe punktów pomiarowych w płaszczyźnie kontrolnej ② przedstawiono na rysunku 2. Obszar pomiarowy wzdłuż obwodu (trawersy $j1-j7'$) obejmował zakres jednej podziałki wieńca łopatkowego kierownicy, co umożliwiło uwzględnienie wpływu, jaki ślady aerodynamiczne łopatek wieńca kierowniczego wywierają na pole prędkości za wirnikiem. Dla każdego z tak obwodowo ustalanych trawersów określano rozkłady lokalnych parametrów strugi w kierunku promieniowym, tj. wzdłuż wysokości kanału wylotowego, zagęszczając odpowiednio punkty pomiarowe w strefach brzegowych przy wewnętrznym i zewnętrznym obrzeżu kanału.

Promieniowe rozkłady prędkości średniej $C_2(r)$, wskaźnika wzdłużnej intensywności turbulencji $\varepsilon_2(r)$ i kąta wypływu strugi $\alpha_2(r)$ uzyskiwane były za pomocą zestawu jednokanałowej aparatury termooanemometrycznej CTA firmy DISA. Sondę termooanemometryczną z pojedynczym włóknem prostym mocowano w uchwycie suportu trawersującego, który umożliwiał jej przesuw promieniowy oraz jednoczesny obrót wokół osi trzonu z niedokładnością odpowiednio 0,1 mm i $0,5^\circ$. Linearyzator zastosowany w torze pomiarowym termooanemometru przetwarzał napięciowy sygnał wyjściowy na liniową funkcję prędkości. Włókno sondy termooanemometrycznej usytuowane w płaszczyźnie (a, u) obracano wokół osi r (rys. 3) ustawiając je w każdym punkcie pomiarowym w położeniu odpowiadającym maksymalnej wartości sygnału



Rys. 2. Współrzędne obwodowe trawersów pomiarowych j1 ÷ j7' w płaszczyźnie kontrolnej ② za wirnikiem



Rys. 3. Usytuowanie czujnika termooanometrycznego w przestrzennym polu prędkości

napięciowego, co zapewniało prostopadłość wektora \overline{C}_2 w stosunku do włókna sondy. Przy takim usytuowaniu sondy w analizowanym polu przepływu (płaszczyzna kontrolna ②) wykorzystano właściwości jej charakterystyk kierunkowych, znamionujących się praktycznie brakiem czułości na zmianę kąta γ_2 i stosunkowo silną zależnością od kąta α_2 . Metoda ta, oprócz właściwego pomiaru prędkości średniej \overline{C}_2 i jej fluktuacji wzdłużnych, umożliwiła jednoczesne oszacowanie kąta α_2 określającego, zgodnie z rys. 3, kąt spływu strugi z wieńca wirującego.

W celu zmniejszenia ewentualnych dodatkowych błędów pomiaru przy użyciu aparatury termooanemometrycznej spowodowanych m. in. zmianami temperatury powietrza przepływającego przez turbinę czy też zanieczyszczeniami włókna sondy zmieniającymi charakterystyki prędkościowe czujnika, na początku i po zakończeniu każdego trawersu wykonywano kontrolne wzorcowanie sondy w specjalnym tuneliku zasilanym tym samym powietrzem, które przepływa przez turbinę. W przypadku stwierdzenia zmian charakterystyk czujnika wprowadzano niezbędne korekty do wskazań termooanemometru. Zastosowana metodyka pomiarów charakteryzowała się względnie dużą dokładnością przy określaniu prędkości średniej oraz wzdłużnej intensywności turbulencji, gdzie maksymalne względne niepewności pomiaru dla układu termooanemometru z linearyzatorem szacuje się na poziomie odpowiednio $(\Delta C/C)_{\max} = \pm 2,5\%$, $(\Delta \varepsilon/\varepsilon)_{\max} = \pm (4 \div 6)\%$. Oszacowanie wartości kąta α_2 określającego kąt wypływu strugi jest natomiast przy zastosowanej metodzie znacznie mniej precyzyjne, a maksymalna niepewność pomiaru kąta w analizowanych warunkach przepływu oceniona być może na poziomie $(\Delta \alpha_2)_{\max} = \pm (4 \div 8)^\circ$. Podane niedokładności maksymalne osiągają swoje wartości ze stosunkowo małym prawdopodobieństwem, co potwierdzają regularne przebiegi krzywych doświadczalnych, wokół których punkty pomiarowe grupują się z niewielkim na ogół rozrzutem.

Uśrednianie lokalnych parametrów aerodynamicznych strugi zarówno w zakresie podziałki wieńca kierowniczego (indeks górny t), jak i wzdłuż wysokości kanału wylotowego (indeks górny r) przeprowadzono każdorazowo według procedury numerycznego całkowania.

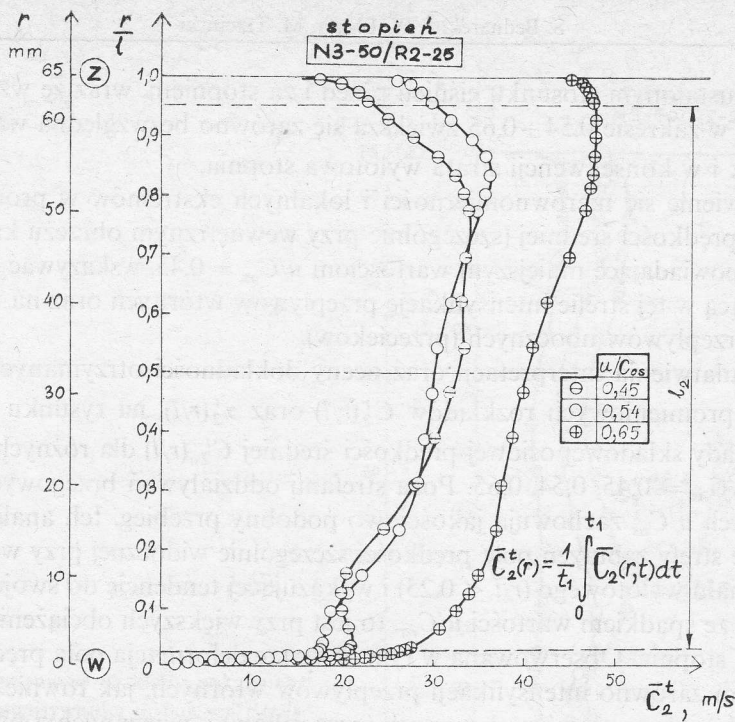
Równoległe z pomiarami parametrów aerodynamicznych strugi za stopniem turbiny modelowej przeprowadzono cykl standardowych badań charakterystyk stopnia $\eta_u = f(u/C_{os})$ według metodyki opracowanej i stosowanej w ITC Łódź (program CHST 2).

3. Analiza wyników badań

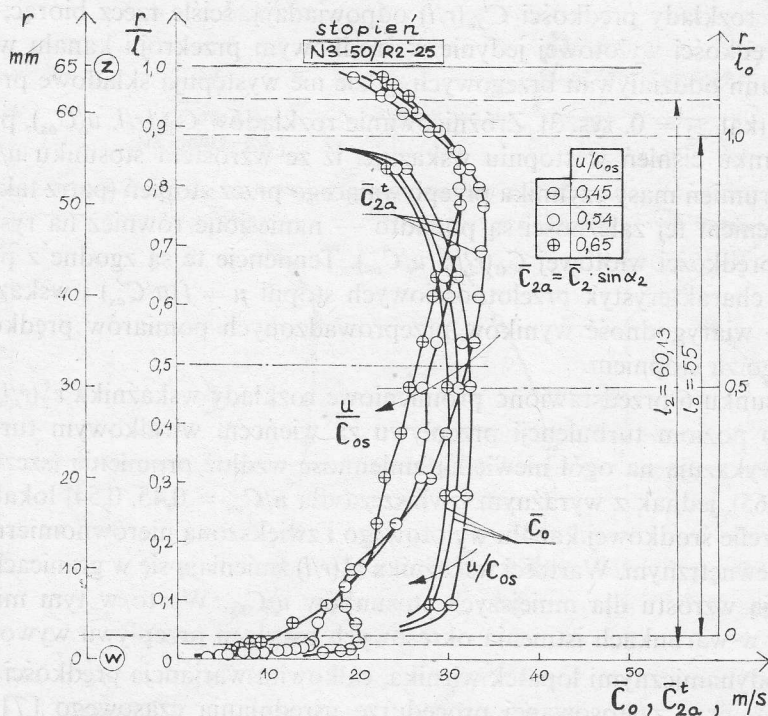
Wyniki badań zmienności parametrów strugi za stopniem turbiny modelowej o konfiguracji wieńców łopatkowych N3-50/R2-25 i stosunku prędkości $u/C_{os} = 0,45, 0,54, 0,65$ zamieszczono na rysunkach 4 ÷ 9.

Analiza promieniowych rozkładów prędkości $\overline{C}_2^t(r/l)$, uśrednionej w zakresie podziałki wieńca łopatkowego kierownicy (rys. 4), prowadzi do następujących wniosków:

— profil prędkości średniej za wieńcem wirnikowym, poza strefami oddziaływań brzegowych, jest w przybliżeniu liniowo rosnącą funkcją promienia,



Rys. 4. Promieniowe rozkłady prędkości średniej $\bar{C}_2^t(r/l)$ dla różnych stosunków prędkości $u/C_{os} = 0,45, 0,54, 0,65$



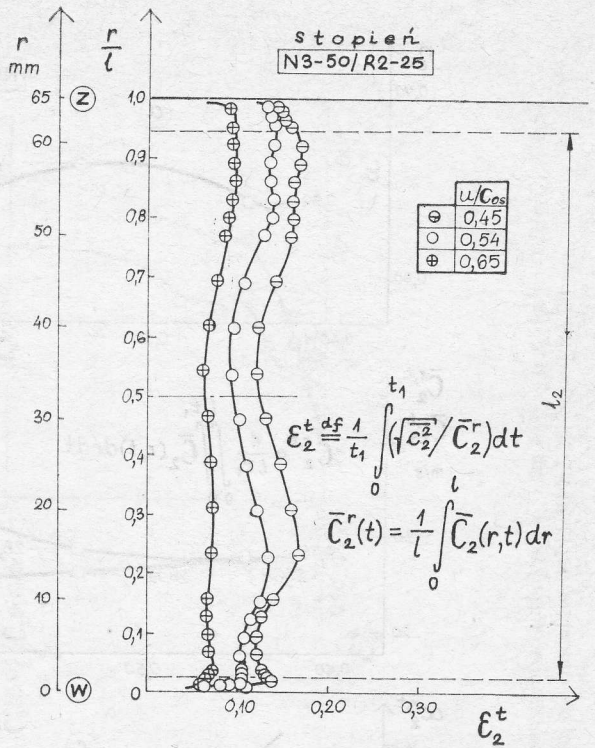
Rys. 5. Promieniowe rozkłady składowej osiowej prędkości średniej $\bar{C}_{2a}^t(r/l)$ dla różnych stosunków prędkości $u/C_{os} = 0,45, 0,54, 0,65$ oraz odpowiadające im profile prędkości wlotowej $\bar{C}_0(r/l_0)$

— przy ustalonym stosunku ciśnień przed i za stopniem, wraz ze wzrostem stosunku u/C_{os} w zakresie $0,54 \div 0,65$ zwiększa się zarówno bezwzględna wartość prędkości \bar{C}_2^t jak i w konsekwencji strata wylotowa stopnia,

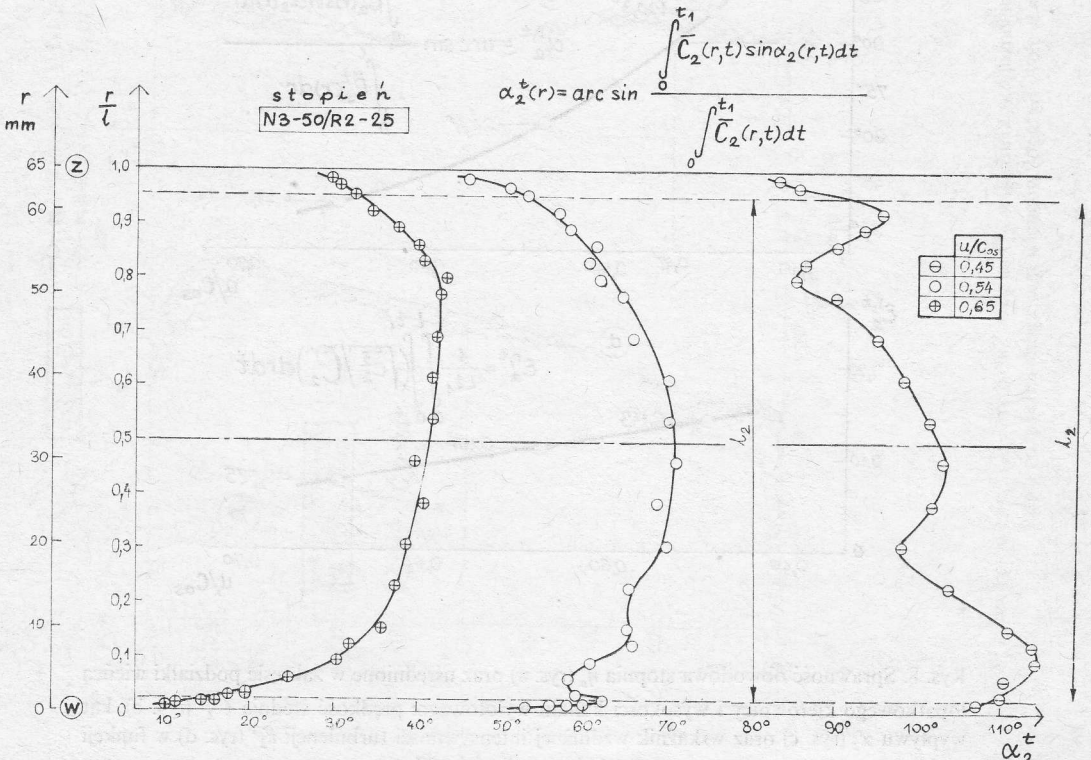
— pojawienie się nierównomierności i lokalnych ekstremów w promieniowych rozkładach prędkości średniej (szczególnie przy wewnętrznym obrzeżu kanału wylotowego), odpowiadające mniejszym wartościom $u/C_{os} = 0,45$, wskazywać może m. in. na zachodzącą w tej strefie intensyfikację przepływów wtórnych oraz na ujawniający się wpływ przepływów ubocznych (przecieków).

W celu ułatwienia interpretacji oraz oceny dokładności otrzymanych wyników, szczególnie promieniowych rozkładów $\bar{C}_2^t(r/l)$ oraz $\alpha_2^t(r/l)$, na rysunku 5 przedstawiono rozkłady składowej osiowej prędkości średniej $\bar{C}_{2a}^t(r/l)$ dla różnych stosunków prędkości $u/C_{os} = 0,45, 0,54, 0,65$. Poza strefami oddziaływań brzegowych rozkłady te dla różnych u/C_{os} zachowują jakościowo podobny przebieg. Ich analiza potwierdza istnienie strefy zaburzeń pola prędkości szczególnie widocznej przy wewnętrznym obrzeżu kanału wylotowego ($r/l < 0,25$) i wykazującej tendencję do swojego powiększania wraz ze spadkiem wartości u/C_{os} , to jest przy większych obciążeniach aerodynamicznych stopnia. Obserwowana w tym obszarze deformacja pola prędkości może być skutkiem zarówno intensyfikacji przepływów wtórnych, jak również ujawniającego się wpływu przepływów ubocznych (przecieków) i związanych z nimi strat dodatkowych. Należy jednak w tym miejscu wyraźnie podkreślić, że naniesione na rysunku 5 rozkłady prędkości $\bar{C}_{2a}^t(r/l)$ odpowiadają, ściśle rzecz biorąc, składowej osiowej prędkości wylotowej jedynie w środkowym przekroju kanału wylotowego poza strefami oddziaływań brzegowych, gdzie nie występują składowe promieniowe prędkości (kąt $\gamma_2 = 0$, rys. 3). Zróznicowanie rozkładów $\bar{C}_{2a}^t(r/l, u/C_{os})$, przy ustalonym stosunku ciśnień w stopniu wskazują, iż ze wzrostem stosunku u/C_{os} maleje również strumień masy czynnika przepływającego przez stopień (patrz także rys. 8b). Potwierdzeniem tej zależności są ponadto — naniesione również na rysunku 5 — rozkłady prędkości wlotowej $C_0(r/l_0, u/C_{os})$. Tendencje te są zgodne z przebiegiem typowych charakterystyk przelotnościowych stopni $\mu = f(u/C_{os})$ i wskazują jednocześnie na wiarygodność wyników przeprowadzonych pomiarów prędkości i kąta wylotowego za stopniem.

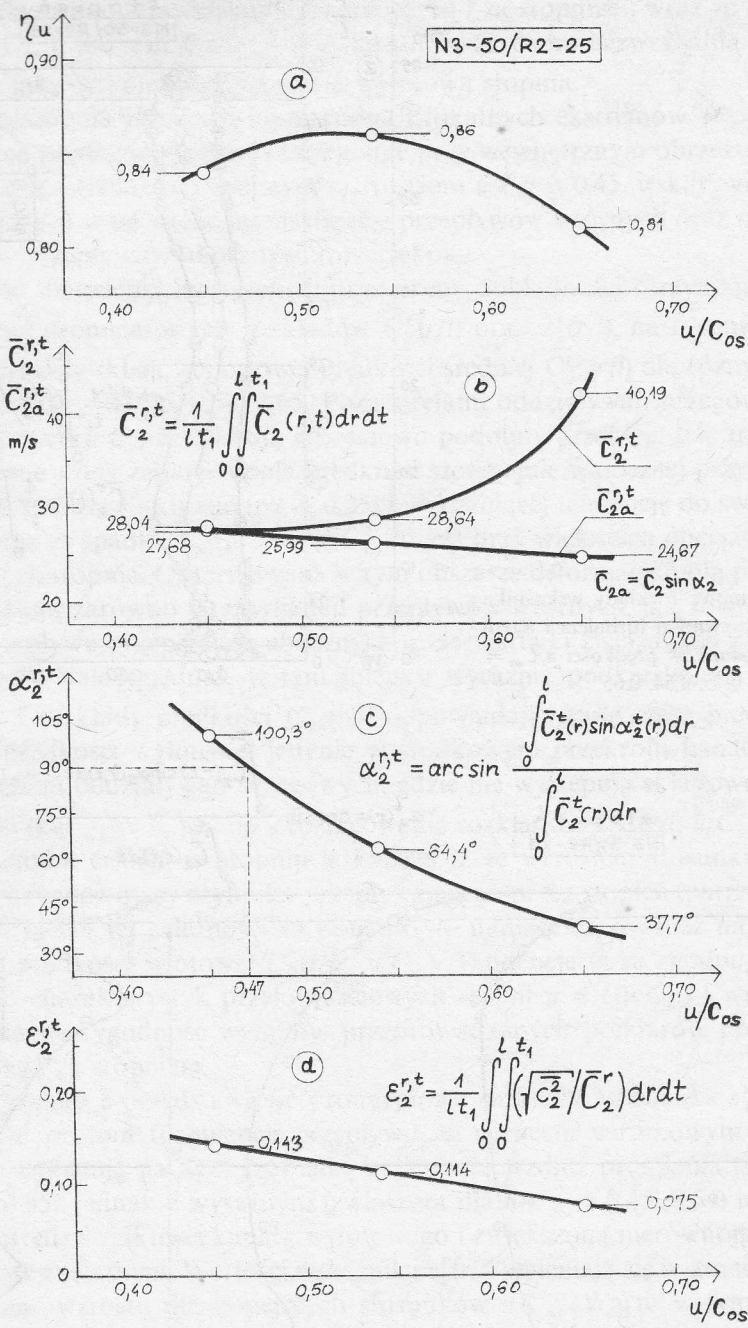
Na rysunku 6 przedstawiono promieniowe rozkłady wskaźnika $\varepsilon_2^t(r/l)$ charakteryzującego poziom turbulencji przepływu za wieńcem wirnikowym turbiny. Rozkłady te wykazują na ogół niewielką zmienność wzdłuż promienia (szczególnie dla $u/C_{os} = 0,65$), jednak z wyraźnym (zwłaszcza dla $u/C_{os} = 0,45, 0,54$) lokalnym minimum w strefie środkowej kanału wylotowego i zwiększoną nierównomiernością przy obrzeżu wewnętrznym. Wartości wskaźnika $\varepsilon_2^t(r/l)$ zmieniają się w granicach $(7 \div 17)\%$ z tendencją wzrostu dla mniejszych stosunków u/C_{os} . Warto w tym miejscu podkreślić, że w warunkach istnienia okresowych oscylacji przepływu wywołanych śladami aerodynamicznymi łopatek wirnika, całkowita wariancja prędkości \bar{c}_2^2 zawiera w sobie — przy zastosowanej procedurze uśredniania czasowego [7] — łączną informację zarówno o okresowych oscylacjach prędkości, jak i o losowych fluktuacjach właściwego ruchu turbulentnego.



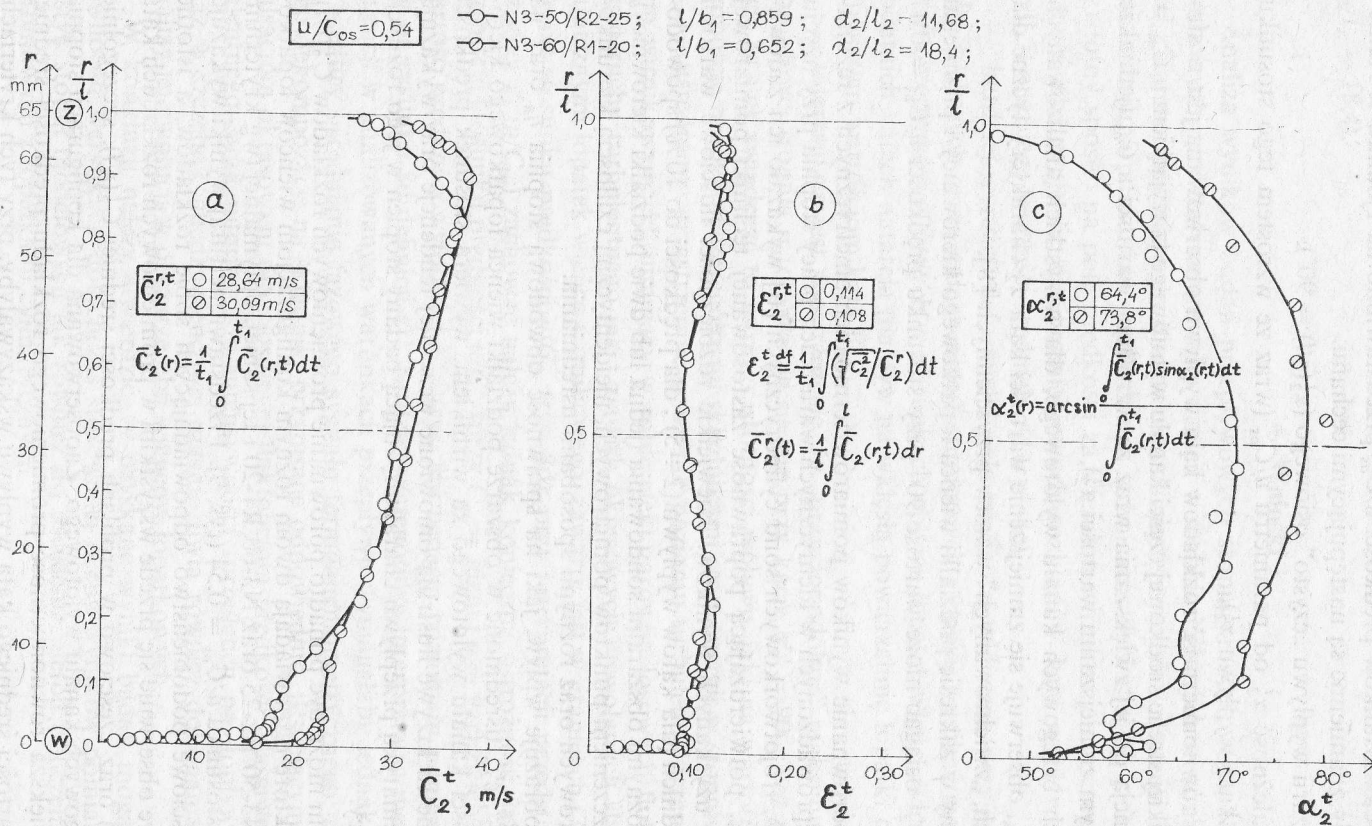
Rys. 6. Promieniowe rozkłady wskaźnika wzdłużnej intensywności turbulencji $\epsilon_2^t(r/l)$ dla różnych stosunków prędkości $u/C_{os} = 0,45, 0,54, 0,65$



Rys. 7. Promieniowe rozkłady kąta wypływu $\alpha_2^t(r/l)$ dla różnych stosunków prędkości $u/C_{os} = 0,45, 0,54, 0,65$



Rys. 8. Sprawność obwodowa stopnia η_u (rys. a) oraz uśrednione w zakresie podziałki wieńca łopatkowego kierownicy i wysokości kanału wylotowego: prędkość średnia $\bar{C}_2^{r,t}$ (rys. b), kąt wpływu $\alpha_2^{r,t}$ (rys. c) oraz wskaźnik wzdłużnej intensywności turbulencji $\varepsilon_2^{r,t}$ (rys. d) w funkcji stosunku prędkości u/C_{os}



Rys. 9. Promieniowe rozkłady prędkości średniej \bar{C}_2^t , wskaźnika wzdłużnej intensywności turbulencji E_2^t , kąta wypływu α_2^t dla $\pi = 0,9$, $u/C_{os} = 0,54$ i dwu różnych konfiguracji wieńców łopatkowych w stopniu modelowym N3-50/R2-25, N3-60/R1-20

Interesujących informacji dostarczają promieniowe rozkłady, uśrednionego w zakresie podziałki wieńca łopatkowego kierownicy, kąta wypływu strugi $\alpha_2^t(r/l)$, które dla analizowanych stosunków prędkości u/C_{os} przedstawiono na rysunku 7. Naniesione tu rozkłady znamienne są następującymi cechami:

- brak obszaru wypływu „czysto” osiowego ($\alpha_2^t(r/l) = 90^\circ$),
- istotna zależność α_2^t od parametru u/C_{os} (wraz ze wzrostem tego stosunku maleją wartości kąta wypływu α_2^t),
- względna równomierność rozkładów kąta wypływu obserwowana jest w stonkowo niewielkiej strefie środkowej części kanału wylotowego (z wyjątkiem $u/C_{os} = 0,45$) z tendencją do jej zwiększania wraz ze wzrostem wartości u/C_{os} (jednakże przy jednoczesnym zmniejszaniu wartości α_2^t),
- w strefach brzegowych kanału wylotowego, dla wszystkich analizowanych stosunków u/C_{os} , obserwuje się zmniejszenie wartości kąta α_2^t charakterystyczne dla trójwymiarowych, „zwichrowanych” warstw przyściennych [8],
- uśredniony w zakresie podziałki wieńca łopatkowego kierownicy i promienia kąt wylotowy $\alpha_2^{t'}$ osiągać może wartość 90° przy stosunku prędkości $u/C_{os} = 0,47$ (rys. 8c).

Wzajemne porównanie wyników pomiarów termooanemometrycznych z rezultatami badań przeprowadzonych w identycznych warunkach pracy stopnia przy użyciu pneumatycznych, trójotworkowych sond cylindrycznych [6] wykazało ich zadowalającą zgodność, potwierdzającą poprawność zastosowanej techniki pomiarowej i wiarygodność uzyskanych wyników. Niewielkie rozbieżności ilościowe wartości parametrów średnich (dla kątów wypływu $(2 \div 5)^\circ$, dla prędkości do 10%) spowodowane są m. in. różnymi obszarami sondowania (jedna lub dwie podziałki kierownicy), liczbą i rozmieszczeniem punktów pomiarowych, nieidentyczną czułością kierunkową sond pomiarowych oraz różnymi sposobami uśredniania.

Rysunek 8 obrazuje wpływ, jaki na sprawność obwodową stopnia η_u oraz na wartości $\overline{C_2^{r,t}}$, $\alpha_2^{r,t}$, $\varepsilon_2^{r,t}$, uśrednione w obszarze podziałki wieńca łopatkowego kierownicy i wysokości kanału wylotowego za wirnikiem, wywiera stosunek prędkości u/C_{os} . Naniesione tu krzywe ilustrują omówione wcześniej tendencje oraz wykazują zgodność z kinematyką przepływu charakteryzującą badany stopień w jego różnych warunkach pracy.

Interesującym może być ponadto porównanie promieniowych rozkładów $\overline{C_2^t}(r/l)$, $\varepsilon_2^t(r/l)$ i $\alpha_2^t(r/l)$, które odpowiadają dwom różnym konfiguracjom wieńców łopatkowych stopnia: N3-50/R2-25 oraz N3-60/R1-20 i tej samej, optymalnej (wg kryterium $\eta_{u,max}$) wartości stosunku $u/C_{os} = 0,54$ (rys. 9). Przedstawione tutaj wyniki wykazują wzajemne jakościowe podobieństwo odpowiadających sobie rozkładów, a istotne różnice ilościowe obserwuje się przede wszystkim w promieniowych rozkładach kąta wypływu $\alpha_2^t(r/l)$ oraz częściowo w profilach prędkości średniej $\overline{C_2^t}(r/l)$, szczególnie w strefach brzegowych kanału wylotowego. Zaobserwowana dla konfiguracji stopnia N3-60/R1-20 większa równomierność promieniowego rozkładu prędkości średniej oraz większe wartości średniego kąta wypływu wskazywałyby, przy tych kryteriach, na „wyższość” tego skojarzenia wieńców łopatkowych w porównaniu ze stopniem

N3-50/R2-25. Podkreślić jednak należy, że przy takim porównaniu obu stopni zachować trzeba niezbędną ostrożność, chociażby ze względu na fakt nieco innych wartości geometryczno-konstrukcyjnych parametrów stopnia N3/R1 ($l/b_1 = 0,652$, $d_2/l_2 = 18,4$).

4. Wnioski

Analiza wyników badań przepływowych stopnia modelowego N3/R2 przeprowadzonych przy stałym stosunku ciśnień w stopniu i różnych stosunkach prędkości u/C_{os} stanowi podstawę do sformułowania następujących wniosków:

— zmiana stosunku prędkości w granicach $0,45 \leq u/C_{os} \leq 0,65$ oddziałuje w istotny sposób na pole prędkości za wieńcem wirnikowym; szczególnie silną zależność obserwuje się dla promieniowych rozkładów kąta wypływu strugi $\alpha_2^r(l)$ (rys. 7) oraz jego wartości średnich $\alpha_2^{r,t}$ (rys. 8c),

— bardziej wyraźna deformacja pola prędkości widoczna przy $u/C_{os} = 0,45$, tj. przy większych obciążeniach aerodynamicznych stopnia, wynikać może z intensyfikacji przepływów wtórnych w warunkach opływu łopatek wieńca wirnikowego przy dodatnich kątach natarcia (napływ na wklęsłą powierzchnię łopatki odpowiadający mniejszym wartościom kąta β_1),

— interesujące jest spostrzeżenie, że „prawdopodobne” maksimum sprawności obwodowej stopnia η_u obserwuje się nie przy kącie $\alpha_2^{r,t} = 90^\circ$, lecz przy $\alpha_2^{r,t} < 90^\circ$ (rys. 8a ÷ c); świadczyć to może o istotności wpływu, jaki na wartość η_u wywierają proporcje między poszczególnymi składnikami strat energii w stopniu turbinowym,

— uśredniony przestrzennie wskaźnik poziomu turbulencji przepływu za wieńcem wirnikowym $\varepsilon_2^{r,t}$, ujmujący w sobie efekt zarówno losowych fluktuacji właściwego ruchu turbulentnego jak i zjawisk okresowych wywołanych śladami aerodynamicznymi łopatek wieńca wirnikowego, zawarty jest w granicach (7 ÷ 15)% zależnie od stosunku prędkości u/C_{os} (rys. 8d); przy interpretacji przedstawionej tu zależności $\varepsilon_2^{r,t}(u/C_{os})$ zachować należy jednak konieczną ostrożność, jako że wraz ze wzrostem stosunku prędkości u/C_{os} (przy $C_{os} = \text{idem}$ i $u = \text{var}$) zwiększa się również wartość prędkości wylotowej $\bar{C}_2^{r,t}$ (rys. 8b) będącej poziomem odniesienia w podanej na rysunku 8d definicji $\varepsilon_2^{r,t}$; bardziej szczegółowa interpretacja mechanizmu turbulencji w analizowanych warunkach przepływu wymagałaby jednak zastosowania procedury uśredniania fazowego sygnału termooanemometrycznego, umożliwiającej jego dekompozycję na składniki przypisane odpowiednio, istniejącym w przepływie pulsacjom okresowym oraz losowym fluktuacjom prędkości właściwego ruchu turbulentnego; brak informacji o intensywności turbulencji na dopływie do stopnia oraz w szczelinie międzywieńcowej uniemożliwia również dokonania szczegółowej analizy jej ewolucji w obszarze obu wieńców łopatkowych.

W konkluzji należy stwierdzić, że uzyskane wyniki badań mogą posłużyć zarówno do weryfikacji dotychczas stosowanej oceny wyników pomiarów charakterystyk stopni modelowych jak również do uściślenia metod obliczeniowych stopni turbinowych z łopatkami cylindrycznymi.

Literatura

- [1] M. E. Dejč, B. M. Trojanovskij, *Issledovanija i rasčety stupenej oseвых turbin*. Izd. Mašinostroenie, Moskva 1964.
- [2] L. S. Dzung (ed.), *Flow research on blading*. Elsevier Publishing Co., 1970.
- [3] L. Sobański, *Wybrana problematyka obliczenia oraz badań modelowych stopni turbinowych*. Prace Instytutu Techniki Ciepłej, 1979, z. 74—76, s. 267—293.
- [4] R. Puzyrewski, *Problemy optymalizacji aerodynamicznej stopnia turbiny*. Prace IMP z. 78, 1980, s. 101—108.
- [5] S. Wiechowski, T. Jach, *Stoisko z powietrzną turbiną modelową AG-9*. Sprawozdanie Instytutu Techniki Ciepłej (nie opublikowane), nr ewid. 1096-S, Łódź 1968.
- [6] S. Wiechowski, *Badania modelowe stopni i ich elementów w celu określenia ich charakterystyk sprawnościowo-przepływowych oraz optymalizacji i unifikacji konstrukcji nowych rozwiązań turbin, etap: b2 Sprawdzenie możliwości eksperymentalnego rozdziału strat sumarycznych w modelowym stopniu turbinowym, cz. 1. Wyniki sondowania w przestrzeni międzywieńcowej i za wirnikiem*. Sprawozdanie ITC (nie opublikowane), nr ewid. 4913, Łódź 1985.
- [7] J. W. Elsner, *Współczesne problemy turbulencji* (artykuł przeglądowy). Archiwum Termodynamiki, 1984, vol. 5, nr 3/4, s. 327—352.
- [8] J. W. Elsner, *Aerodynamika palisad łopatkowych*. Ossolineum, Wrocław 1988.

Анализ течения за рабочим колесом турбинной ступени

Резюме

В работе представлены распределения по высоте выходного канала: средней скорости, продольной интенсивности турбулентности и угла выхода потока за рабочим колесом одноступенчатой, воздушной экспериментальной турбины для разных значений отношения скоростей u/C_{os} . Установлено, что изменение отношения скоростей в диапазоне режимов работы $0,45 \leq u/C_{os} \leq 0,65$, при постоянном отношении давлений в ступени $\pi = 0,9$, существенно воздействует на характеристику поля скорости за рабочим колесом, особенно на изменение по высоте проточной части угла выхода потока. Полученные результаты могут быть основой для проверки истинности методов расчёта турбинных ступеней с цилиндрическими лопатками, а также для анализа суммарных характеристик одиночных ступеней. Можно ими пользоваться при программировании дальнейших исследований прямых и кольцевых решёток, а также одиночных и работающих в группе турбинных ступеней.

An Analysis of the Flow-Pattern at the Exit of a Single-Stage Turbine

Summary

The paper presents distributions of the mean velocity, longitudinal turbulence intensity and outlet angle behind a single-stage air turbine for different values of the velocity ratio u/C_{os} . It has been found that for the constant pressure ratio in the stage the variation of u/C_{os} within the range $0.45 \div 0.65$ strongly affects the rotor exit flow field, especially the radial distributions of the outlet angle. The results obtained may be used to verify the calculation methods of the turbine stages with cylindrical blades and to analyse the turbine stage flow characteristics. They may be also utilized for further experimental investigation of linear and annular blade cascades, as well as single- and multi-stage experimental turbines.