

P O L S K A   A K A D E M I A   N A U K  
I N S T Y T U T   M A S Z Y N   P R Z E P Ł Y W O W Y C H

P R A C E  
I N S T Y T U T U   M A S Z Y N  
P R Z E P Ł Y W O W Y C H

T R A N S A C T I O N S  
O F   T H E   I N S T I T U T E   O F   F L U I D - F L O W   M A C H I N E R Y

89

W A R S Z A W A - P O Z N A Ń 1989

---

P A Ń S T W O W E   W Y D A W N I C T W O   N A U K O W E

**PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH**

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

Copyright  
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe  
Warszawa 1989

Printed in Poland

ISBN 83-01-07072-2  
ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 300 + 90 egz. Ark. wyd. 13,25. Ark. druk. 10,5. Papier offsetowy kl. IV, 71g.

B-1. Oddano do składania w kwietniu 1987 r. Podpisano do druku w marcu 1989 r.

Druk ukończono w grudniu 1989 r. Zam. 90/89 K-8/66

SKŁAD WYKONANO W ZAKŁADACH GRAFICZNYCH im. KEN w BYDGOSZCZY  
DRUK ZAKŁAD POLIGRAFII WSP W ZIELONEJ GÓRZE

## ZYGMUNT SZPRENGIEL

Gdańsk

**Wpływ erozji na straty profilowe w przepływie przez palisady i stopnie turbinowe\***

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dwóch palisad wierzchołkowych profili łopatek wirnikowej ostatniego stopnia turbiny 200 MW dla różnych stopni zerodowania krawędzi natarcia. Rezultaty tych badań wykorzystano do oszacowania wzrostu strat przepływowych stopnia turbiny spowodowanego erozją łopatek wirnikowych.

**Wykaz oznaczeń**

$a$ — minimalny przekrój kanału łopatkowego [m],	$w$ — prędkość [m/s],
$b$ — szerokość palisady [mm],	$x, y, z$ — współrzędne kartezjańskie,
$p$ — ciśnienie całkowite [Pa],	$\beta$ — kąt [°]
$H$ — wysokość palisady [m],	$\beta_s$ — kąt ustawienia profilu w palisadzie [°],
$h$ — entalpia [kJ/kg],	$\zeta$ — współczynnik strat,
$I$ — ilość strug,	$\eta_i$ — sprawność wewnętrzna,
$l$ — długość cięciwy [mm],	$\kappa$ — wykładnik izentropy,
$L$ — długość łopatki wirnikowej [m],	$\tau$ — czas [s],
$Ma$ — liczba Macha,	$\psi$ — współczynnik prędkości względnej w wirniku.
$N_i$ — moc wewnętrzna [kW],	
$p$ — ciśnienie statyczne [Pa],	<b>Indeksy</b>
$R$ — promień [m],	$^1$ — dotyczy parametrów przed palisadą,
$Re$ — liczba Reynoldsa,	$^2$ — dotyczy parametrów za palisadą,
$R_m$ — maksymalna wysokość nierówności [m],	$g$ — geometryczny,
$s$ — entropia [kJ/kgK],	$k$ — kondensacji,
$t$ — podziałka,	$p$ — profilowa,
$T$ — temperatura [K],	tot — całkowita,
$Tu$ — intensywność turbulencji,	uos — usunięte osady soli.

**1. Wstęp**

Podczas pracy maszyn przepływowych zarówno powierzchnia jak i kształt profilu łopatek ulegają zmianie przez odkładanie się soli, korozję i erozję. Wzrost chropowatości powierzchni łopatek może powodować wzrost strat, zarówno przez wcze-

\* Praca wykonana w ramach Programu Rządowego PR-8 pt. „Kompleksowy rozwój energetyki” kierunek 6.



śniejsze przejście laminarno-turbulentne, jak i przez wzrost tarcia powierzchniowego w obszarze turbulentnej warstwy przyściennej. Łopatki wirnikowe turbin parowych pracujące w parze mokrej są poddane głównie zjawisku odkładania się soli, korozji oraz erozyjnemu działaniu strumienia kropeł wtórnych. W efekcie tego działania można się spodziewać znacznych zniszczeń erozyjnych krawędzi natarcia łopatek wirnikowych. Stan tych zniszczeń może być jednym z czynników wpływających na wzrost strat związanych z przemianami energii w stopniu turbinowym po określonym czasie pracy [1]. W szczególności spodziewać się można występowania lokalnych oderwań będących źródłem poważnych strat energii. Zjawiska te nie są dotychczas dostatecznie obszernie zbadane.

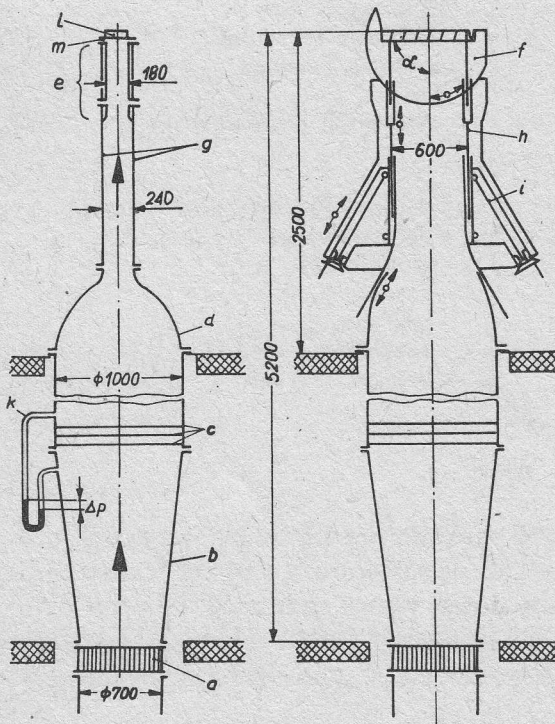
Niniejsze opracowanie ma na celu:

— przedstawienie własnych wyników badań eksperymentalnych dwóch palisad wierzchołkowych profilów łopatki wirnikowej ostatniego stopnia turbiny 200 MW dla różnych stopni zerodowania krawędzi natarcia,

— oszacowanie wzrostu strat przepływowych ostatniego stopnia turbiny spowodowanego erozją łopatek wirnikowych.

## 2. Wpływ erozji krawędzi natarcia łopatek na wzrost współczynnika strat profilowych

W celu zbadania wpływu erozji krawędzi natarcia łopatek wirnikowych na współczynnik strat profilowych przeprowadzono badania eksperymentalne palisad profilów w powietrznym tunelu aerodynamicznym Uniwersytetu w Hanowerze.



Rys. 1. Schemat tunelu do badań palisadowych

a — prostownica, b — dyfuzor, c — siatki, d — dysza  
e — przestrzeń pomiarowa, f — część obrotowa tunelu  
g — stałe ścianki boczne, h — ruchoma ścianka boczna  
i — śruba, k — wskaźnik różnicy ciśnień, l — palisada, m — płaszczyna pomiarowa



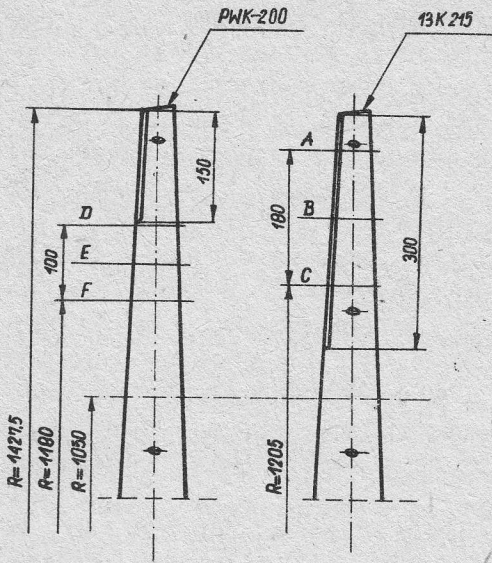
Tunel (rys. 1) zasilany był sprężonym powietrzem, które za palisadą wypływało swobodnie do atmosfery. Stąd ciśnienie statyczne za palisadą było zbliżone do ciśnienia atmosferycznego. Maksymalny strumień masy dostarczanego powietrza wynosił 11 kg/s i mógł być regulowany metodą dławienia. Temperatura dostarczanego powietrza była utrzymywana na stałym poziomie za pomocą automatycznej regulacji. Tunel wyposażony był w przesuwne ściany boczne, które zawsze były utrzymywane w położeniu prostopadłym do płaszczyzny czołowej palisady. W początkowej fazie przepływu powietrze przechodziło przez prostownicę *a*. Następnie przepływ był homogenizowany za pomocą dyfuzora *b* o średnicy wylotowej 1000 mm oraz zainstalowanych siatek *c*. Przekrój kołowy kanału zredukowany był do przekroju prostokątnego  $240 \times 600 \text{ mm}^2$  za pomocą dyszy *d*. Zredukowanie szerokości tunelu w płaszczyźnie wlotowej do palisady z 240 do 180 mm spowodowało dodatkowe przyspieszenie przepływu. Maksymalne ciśnienie spiętrzenia na wlocie do palisady wynosiło 45 kPa. Zmiana kąta napływu na palisadę realizowana była przez obrót końcówki wylotowej tunelu.

Wcześniejsze pomiary intensywności turbulencji w kanale dolotowym *e* (rys. 1), dla kilku różnych palisad, wykonane przez Groschupa [2] za pomocą termooanemometru firmy DISA wskazują na stały rozkład intensywności turbulencji w środkowym obszarze kanału dolotowego poza obrębem jego ścianek bocznych. Intensywność turbulencji wynosiła odpowiednio  $Tu = 0,7$  i  $0,5\%$  przy prędkości wlotowej  $w_1 = 20$  i  $60 \text{ m/s}$ .

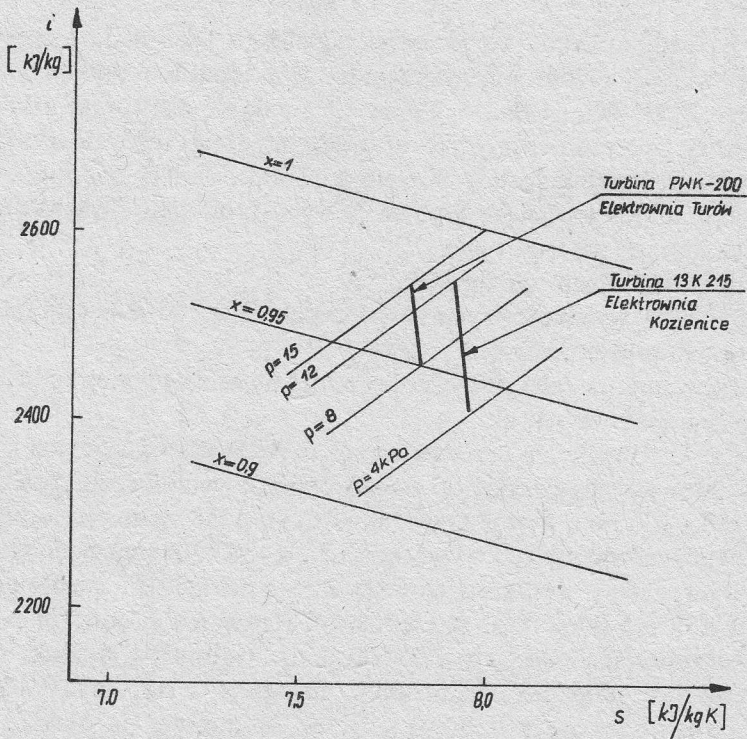
Badane palisady składały się zarówno z gładkich jak i zerodowanych łopatek. Łopatki odpowiadały przekrojom wierzchołkowym łopatek wirnikowych ostatniego stopnia turbin PWK-200 i 13K215. Ponieważ nie da się odtworzyć sztucznie specyficznej struktury zniszczeń erozyjnych krawędzi natarcia, zarówno gładkie jak i zerodowane odcinki łopatek zostały wycięte z produkowanych seryjnie łopatek. Odcinki łopatek gładkich wycięto z łopatek nowych produkcji ZAMECHu. Przy dobrze łopatek starano się zapewnić:

- możliwie małe zwinęcie łopatek,
- maksymalną wysokość wycinków łopatek  $H = 180 \text{ mm}$  (ograniczenie konstrukcyjne tunelu powietrznego),
- występowanie na całej długości krawędzi natarcia łopatek nakładek stelitowych lub też ich całkowity brak.

Na podstawie powyższych przesłanek oraz dostępnych, wycofanych z eksploatacji łopatek zdecydowano się przyjąć do badań palisadowych wycinki łopatek o wysokości  $H = 180$  i  $100 \text{ mm}$ . Przyjęte wycinki *AC* oraz *DF* zaznaczono na rysunku 2. Wycinki łopatek zerodowanych o wysokości  $H = 180$  i  $100 \text{ mm}$  pochodzą z różnych łopatek. I tak, wycinki o wysokości  $H = 180 \text{ mm}$ , z nakładkami stelitowymi, uzyskano z turbiny 13K215 (blok TG1 w Elektrowni Kozienice, producent — ZAMECH Elbląg) po okresie eksploatacji  $\tau \approx 55\,500 \text{ godz}$ . Natomiast wycinki o wysokości  $H = 100 \text{ mm}$ , bez nakładek stelitowych, uzyskano z turbiny PWK-200 (blok TG2 w Elektrowni Turów, producent — LMZ Leningrad) po okresie eksploatacji  $\tau \approx 44\,000 \text{ godz}$ . Na rysunku 3 przedstawiono linie ekspansji w ostatnim stopniu turbin PWK-200 i 13K215, pracujących w elektrowniach Turów i Kozienice. Linie



Rys. 2. Łopatki wirnikowe ostatniego stopnia turbin PWK-200 i 13K215 z zaznaczonymi wycinkami łopatek użytymi do badań palisadowych



Rys. 3. Przebieg ekspansji w ostatnim stopniu turbiny PWK-200 oraz 13K215 dla mocy znamionowej 200 MW



ekspansji dla mocy znamionowej 200 MW pochodzą z pomiarów wykonanych w tych elektrowniach przez ekipy IMP PAN [3, 4].

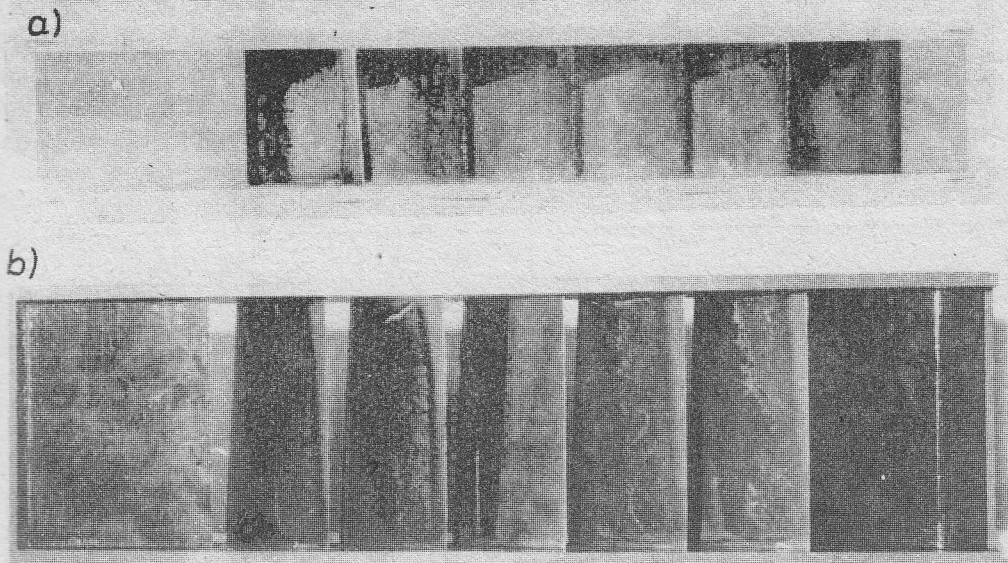
Należy tu zauważyć, że w badaniach nie udało się zachować podobieństwa geometrycznego i aerodynamicznego w stopniu turbinowym i palisadzie. Profile zwijane badano w płaskiej palisadzie. Zmienny kąt napływu  $\beta_1$  w turbinie zastąpiono kątem stałym w palisadzie. Także zmienną podziałkę względną  $t/l_w$  zastąpiono podziałką stałą. Liczby kryterialne Macha i Reynoldsa wynosiły odpowiednio dla badanych profili w turbinie:  $Ma_2 = 1,05 \div 1,15$  i  $Re_2 = 1,3 \cdot 10^5 \div 1,5 \cdot 10^5$  oraz w palisadzie:  $Ma_2 = 0,3 \div 0,82$  i  $Re_2 = 1,57 \cdot 10^5 \div 1,6 \cdot 10^6$ .

Palisady składały się z pięciu wycinków łopatek o długości cięciwy  $l \approx 101$  mm, stałej wzdłuż wysokości tych wycinków (rys. 4). Parametry geometryczne badanych profili *A, B, C* oraz *D, E, F* (rys. 5) przedstawiono w tabeli 1. Zwinięcie łopatek, wyrażone przez zmianę kąta ustawienia profilu w palisadzie  $\beta_s$  wzdłuż wysokości łopatek, nie przekraczało  $10^\circ$  w przypadku łopatek o wysokości  $H = 180$  mm oraz  $5,6^\circ$  w przypadku łopatek o wysokości  $H = 100$  mm. Kąt ustawienia profilu mierzony był między styczną do profilu a frontem palisady (rys. 5).

Geometryczny kąt wylotu  $\beta_{2g}$  oraz kąt odgięcia linii szkieletowej  $\Delta\beta_g$  zdefiniowano następująco:

$$\beta_{2g} = \arcsin\left(\frac{a}{t}\right), \quad (1)$$

$$\Delta\beta_g = 180^\circ - (\beta_{1g} + \beta_{2g}). \quad (2)$$



Rys. 4. Widok ogólny palisad łopatek zerodowanych przed zamontowaniem w tunelu; a) palisada o wysokości łopatek  $H = 100$  mm, b) palisada o wysokości łopatek  $H = 180$  mm

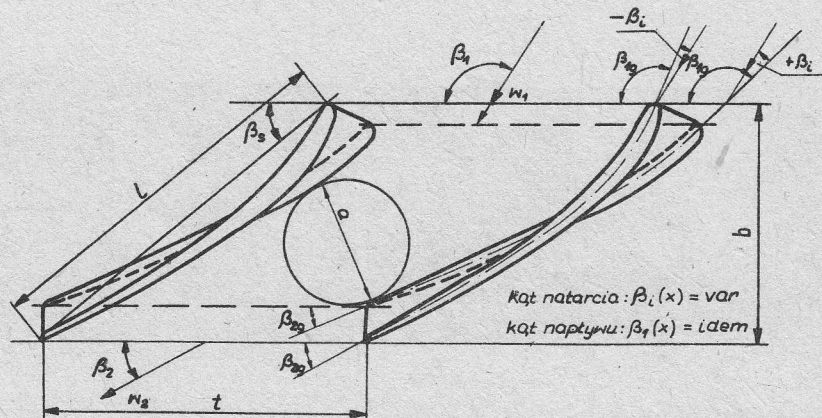


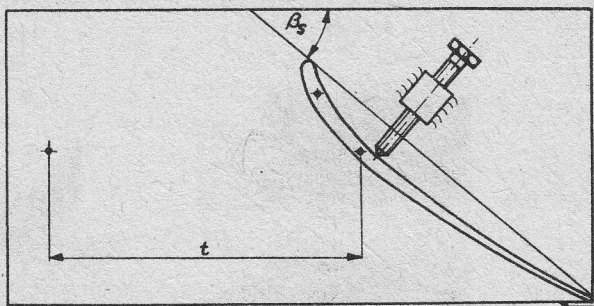
Tabela 1

Indeks	Symbol	Wymiar	H = 180 mm			H = 100 mm		
			A	B	C	D	E	F
Odległość rozważanego przekroju od osi turbiny	R	mm	1385	1295	1205	1280	1230	1180
Geometryczny kąt napływu	$\beta_{1\theta}$	°	141	127	113	124	116	106
Geometryczny kąt wypływu	$\beta_{2\theta}$	°	22,0	25,5	29,1	26,6	27,4	28,2
Kąt odgięcia linii szkieletowej	$\Delta\beta_\theta$	°	17,0	27,5	37,9	29,4	36,6	45,8
Kąt ustawienia profilu	$\beta_s$	°	29,0	34,0	39,0	34,8	37,6	40,4
Szerokość palisady	b	mm	49,0	55,7	62,4	56,8	60,5	64,3
Podziałka	t	mm	87	87	87	82	82	82
Cięciwa	l	mm	101	101	101	101	101	101
Stosunek podziałki do cięciwy	t/l		0,86	0,86	0,86	0,81	0,81	0,81

Szczególną uwagę zwrócono na sposób zamocowania łopatek w ściankach bocznych palisady, gdyż te same ścianki były wykorzystywane do zamocowania zarówno gładkich jak i zerodowanych łopatek. Otwory pod kołki mocujące w ściankach bocznych palisady jak i po bokach wycinków łopatek wiercono za pomocą tego samego przyrządu, aby zapewnić identyczne ustawienie profili w palisadzie. Jako bazę przyjęto krawędź splywu oraz wklęsłą powierzchnię profili gładkich. Dopiero w tak ustawionym przyrządzie mocowano łopatki zerodowane i wiercono w nich otwory pod kołki mocujące. Szkic tego przyrządu pokazano na rysunku 6. W palisadzie łopatki mocowano za pomocą dwóch kołków o średnicy 2 mm umieszczonych po obu końcach łopatek. Pomimo zastosowania tego samego wzornika do wiercenia otworów pod kołki mocujące łopatki w palisadzie nie ustrzeżono się od odchyłek w ustawieniu niektórych łopatek w palisadzie (rys. 7a i b oraz tabela 3).

Wykonano także dwa drewniane zakończenia palisady zamiast dwóch skrajnych łopatek, celem zlikwidowania ewentualnych przecieków powietrza, które mogłyby wystąpić przy dosunięciu krótszych ścianek bocznych tunelu palisadowego do skrajnych, zwiniętych łopatek. Cylindryczne powierzchnie tych zakończeń odwzorowywały wklęsłą i wypukłą stronę profilu znajdującego się w połowie wysokości badanych łopatek (rys. 4).

Rys. 5. Oznaczenia parametrów geometrycznych na przykładzie palisady o wysokości łopatek  $H = 180$  mm



Rys. 6. Schemat przyrządu ustawiania łopatek w palisadzie

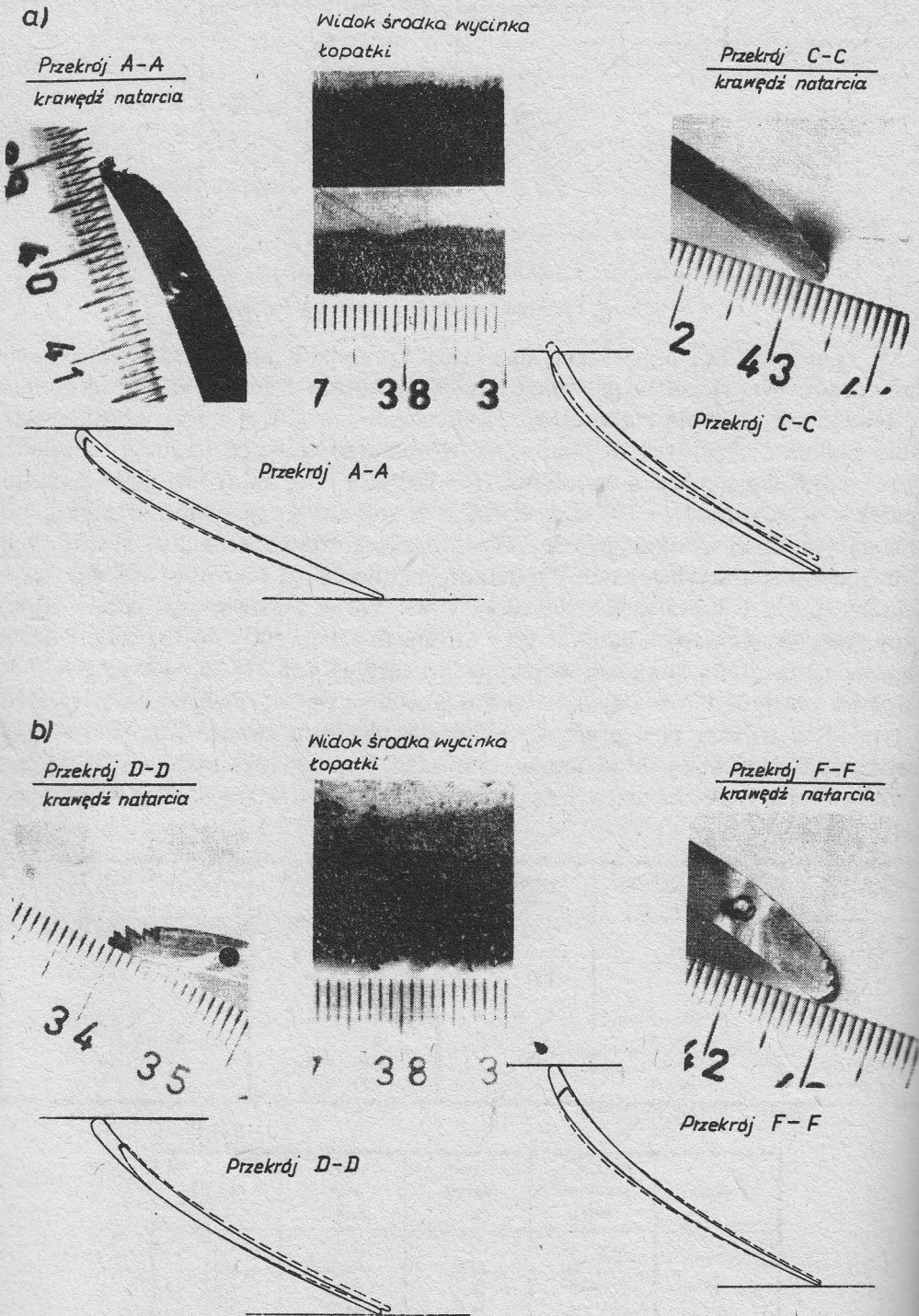
Na rysunkach 7a i b pokazano stan erozji krawędzi natarcia badanych łopatek oraz sposób ustawienia w palisadzie łopatek gładkich i zerodowanych. Zgodnie z czterostopniową skalą stanu erozji przedstawioną w [5], tj. „brak erozji, erozja słaba, średnia i silna” (rys. 8), stan erozji w obszarze krawędzi natarcia określono jako „średni” dla łopatek o wysokości  $H = 180$  mm oraz „silny” w odniesieniu do łopatek o wysokości  $H = 100$  mm. Różnice w stopniu erozji pomiędzy łopatkami o różnej wysokości wynikają przede wszystkim z zastosowania nakładek staliwowych w przypadku dłuższych łopatek. Dodatkowy wpływ mają odmienne warunki eksploatacji turbin 13K215 w Koziencach i PWK-200 w Turowie oraz odpowiednio różne czasy eksploatacji łopatek w tych turbinach  $\tau \approx 55\,500$  i  $44\,000$  godz. Niższe ciśnienie za ostatnim stopniem w przypadku turbiny 13K215 ( $p_k = 4$  kPa) w porównaniu z turbiną PWK-200 ( $p_k = 8$  kPa) powoduje wzrost zawilgocenia pary, a co za tym idzie, szybszy postęp erozji. Różnice w ciśnieniu kondensacji związane są z rodzajem obiegu wody chłodzącej w skraplaczu. W przypadku turbiny 13K215 jest to obieg otwarty, natomiast w przypadku turbiny PWK-200 — obieg zamknięty.

Tabela 2

Palisada	Płaszczyzna pomiarowa mm	Kąt napywu $\beta_1$ [°]	Liczba Macha $Ma_2$	Liczba Reynoldsa $Re_2$
$H = 180$ mm	$x = 50$	127	$0,30 \div 0,82$	$5,7 \cdot 10^5 \div 1,6 \cdot 10^6$
	$= 70$			
	$= 90$			
	$= 110$			
	$= 130$			
$= 180$ mm	$= 90$	$121 \div 139$	0,42	$8,0 \cdot 10^5$
$= 180$ mm	$= 90$ (uosi)	127	$0,30 \div 0,82$	$5,7 \cdot 10^5 \div 1,6 \cdot 10^6$
$= 100$ mm	$= 50$	$111 \div 121$	$0,30 \div 0,82$	$5,7 \cdot 10^5 \div 1,6 \cdot 10^6$

Tabela 3

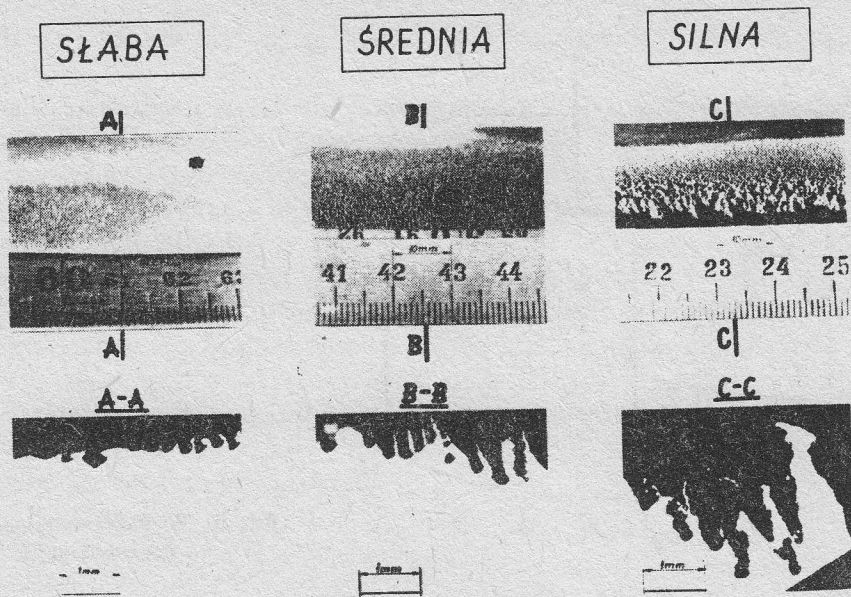
Palisada	Płaszczyzna pomiarowa [mm]	Łopatki gładkie $\beta_{2g}$ [°]	Łopatki zerodowane $\beta_{2z}$ [°]	$\Delta\beta_{2g}$ [°]
$H = 180$ mm	$x = 50$	28,17	27,44	0,73
	$= 70$	27,50	26,70	0,80
	$= 90$	26,70	26,03	0,67
	$= 110$	26,12	25,37	0,75
	$= 130$	25,30	24,79	0,51
	$= 100$ mm	$= 50$	28,32	26,98



Rys. 7. Palisada o wysokości łopatek: a)  $H = 180$  mm; b)  $H = 100$  mm

———— łopatki gładkie, - - - - - łopatki zerodowane

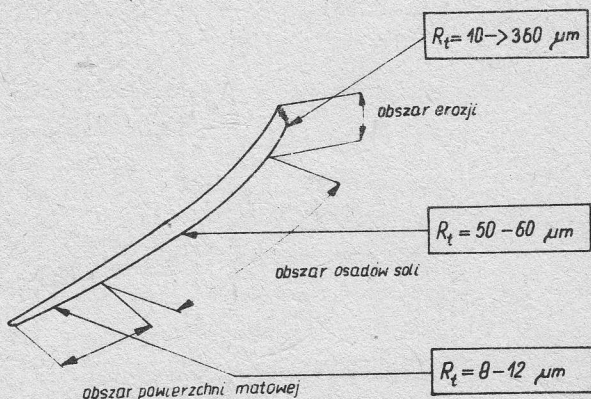




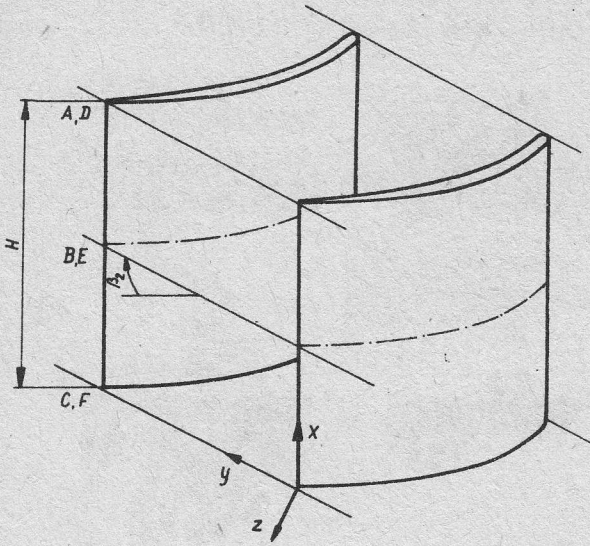
Rys. 8. Klasyfikacja stanu erozji

Aby określić stan powierzchni badanych łopatek w sposób bardziej precyzyjny przeprowadzono pomiary maksymalnej wysokości nierówności  $R_t$ . Pomiary te, których wyniki przedstawiono na rysunku 9, wykonano przyrządem firmy Perthen, zarówno dla łopatek gładkich jak i zerodowanych. Niestety nie zdołano zmierzyć wysokości nierówności powyżej  $360 \mu\text{m}$ , gdyż nie pozwalał na to użyty przyrząd. Wysokość nierówności na krawędzi natarcia dochodziła nawet do paru milimetrów.

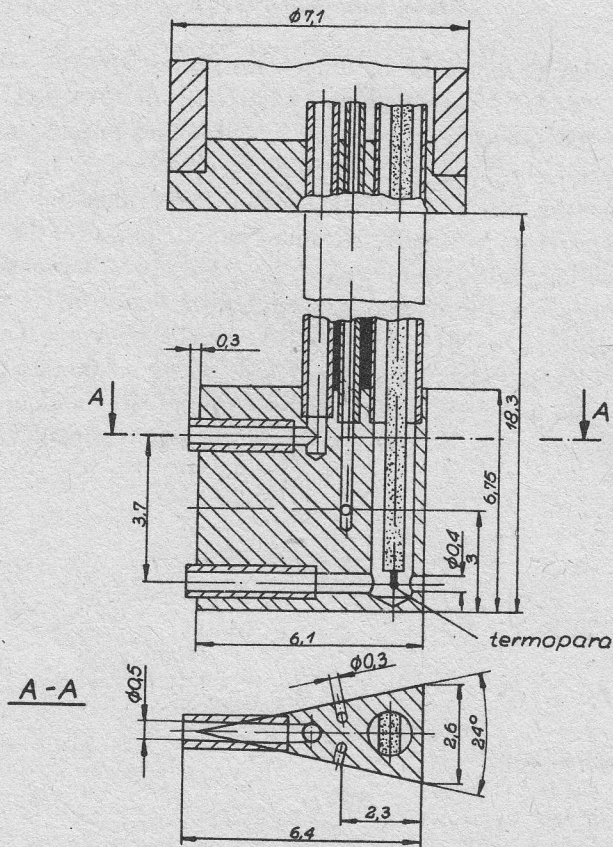
Pomiary w śladzie aerodynamicznym dla palisady o wysokości łopatek  $H = 180 \text{ mm}$  wykonano w pięciu płaszczyznach rozmieszczonych wzdłuż wysokości łopatek ( $x/H = 0,277; 0,5; 0,611; 0,722$ ) oraz w jednej płaszczyźnie ( $x/H = 0,5$ ) zlokalizowanej w środku palisady łopatek o wysokości  $H = 100 \text{ mm}$  (rys. 10). Pomiary przeprowadzono dla różnych liczb Macha ( $Ma_2$ ) i Reynoldsa ( $Re_2$ ). Przy liczbach  $Ma_2 = 0,42$  oraz  $Ma_2 = 0,30 \div 0,82$  odpowiednio dla palisady o wysokości



Rys. 9. Rozkład chropowatości na powierzchni profilu. Dla łopatki gładkiej (nowej, polerowanej) wysokość nierówności na całej powierzchni  $R_t = 3-5 \mu\text{m}$



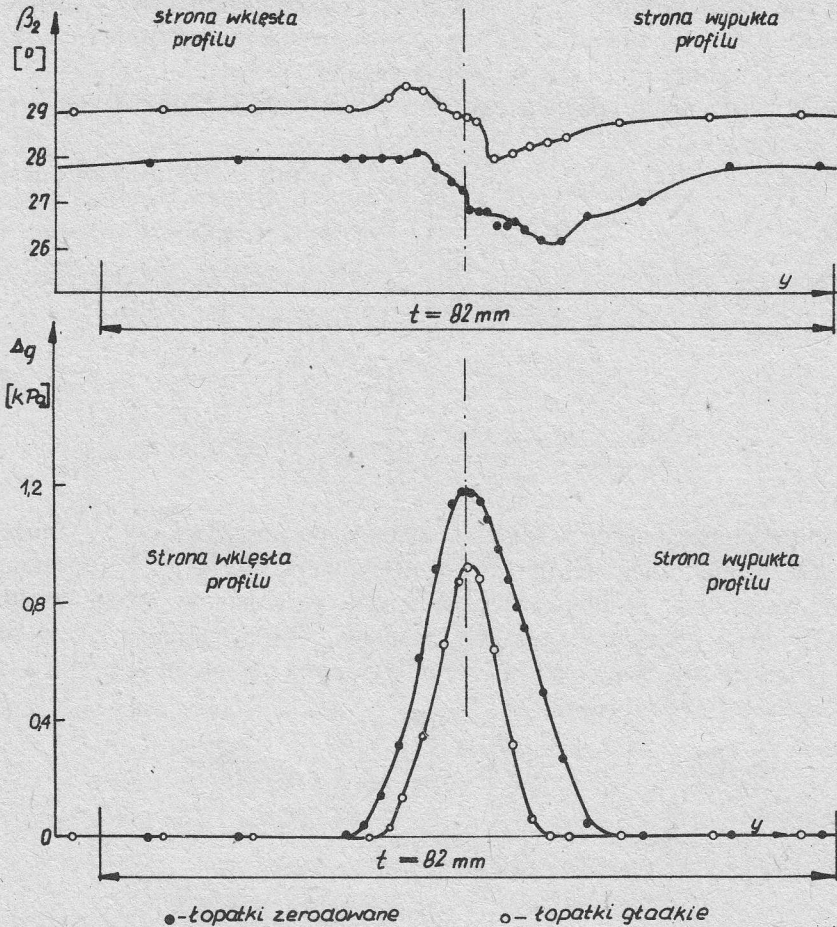
Rys. 10. Wielkości charakterystyczne palisady łopatek



Rys. 11. Schemat sondy klinowej

łopatek  $H = 180$  i  $100$  mm zmieniano również, w niewielkim zakresie, kąty napływu.

Ciśnienie statyczne i całkowite przed palisadą mierzono w jednym punkcie w środku kanału wlotowego za pomocą sondy Prandtla, umieszczonej w odległości ok.  $300$  mm  $\approx 3 l$  od powierzchni czołowej palisady. Parametry czynnika w śladzie aerodynamicznym za palisadą mierzono sondą klinową (rys. 11) o kącie  $24^\circ$ . Sposób zamocowania sondy klinowej w ruchomym suporcie pozwalał na jej obrót oraz jednoczesny przesuw równoległe do czoła palisady za pomocą silników elektrycznych. Odległość płaszczyzny przesuwu sondy za palisadą wynosiła pół podziałki, mierząc prostopadłe do frontu palisady. Sondą klinową mierzono ciśnienie  $q_2(y)$ , ciśnienie statyczne  $p_2(y)$  oraz kąt wylotu  $\beta_2(y)$  z palisady. Konstrukcja sondy klinowej, w której zastosowano mikrotermoparę miedziowo-konstantanową, umożliwia również pomiar temperatury całkowitej  $T_2(y)$ . Współrzędna  $y$  oznacza tutaj odległość mierzoną wzdłuż podziałki.



Rys. 12. Rozkład różnicy ciśnienia całkowitego  $\Delta q$  oraz kąta wylotu z palisady  $\beta_2$  wzdłuż podziałki dla palisady o wysokości łopatek  $H = 100$  mm,  $x = 0,5$ ,  $H = 50$  mm,  $\beta_1 = 121^\circ$ ,  $Ma_2 = 0,31$ ,  $Re_2 = 5,7 \cdot 10^5$



Przed pomiarami sonda klinowa była wzorcowana w tunelu powietrznym pracującym w obiegu zamkniętym. Różnicę ciśnienia całkowitego na wlocie i wylocie z palisady oraz ciśnienie statyczne za palisadą mierzono za pomocą manometrów Prandtla z niedokładnością odczytu 4 Pa; natomiast do pomiaru ciśnienia statycznego i dynamicznego na wlocie do palisady użyto manometru Thommena z niedokładnością odczytu 50 Pa. Zakres badań eksperymentalnych przedstawiono w tabeli 2.

Na rysunku 12 pokazano przykładowy rozkład różnicy ciśnienia całkowitego przed i za palisadą  $\Delta g(y) = g_1 - g_2(y)$  oraz kąta wylotu z palisady  $\beta_2(y)$  wzdłuż podziałki dla palisady o wysokości łopatek  $H = 100$  mm. Z przedstawionych tu danych wynika, że łopatom zerodowanym odpowiadają wyraźnie wyższe wartości funkcji  $g(y)$  i jednocześnie mniejsze wartości funkcji  $\beta_2(y)$ .

Na stratę profilową według Elsnera [6] składają się: strata tarcia w warstwach przyściennych na profilu, strata wynikająca z ewentualnego oderwania strugi od powierzchni łopatek, strata mieszania towarzysząca procesowi wyrównywania się pola prędkości za palisadą oraz strata spowodowana zawirowaniami za krawędzią spływu o skończonej grubości. W rozpatrywanym przypadku, ze względu na poddźwiękowe prędkości przepływu czynnika przez badane palisady, nie występował wpływ fal uderzeniowych.

Współczynnik strat  $\zeta(y, z)$  dla pojedynczej linii prądu zdefiniowano następująco

$$\zeta(y, z) = 1 - \frac{w_2^2(y, z)}{w_{2s}^2(y, z)} = 1 - \psi^2(y, z), \quad (3)$$

gdzie  $\psi(y, z)$  jest współczynnikiem prędkości. Zakładając niezmiennosc temperatury, tj.  $T_{\text{tot1}} = T_{\text{tot2}}$ , wyrażenie (3) można napisać w postaci

$$\zeta(y, z) = 1 - \frac{1 - \left(\frac{p_2(y, z)}{g_2(y, z)}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{1 - \left(\frac{p_2(y, z)}{g_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}. \quad (4)$$

Przepływ homogeniczny w obszarze za palisadą obserwowany być może dopiero w znacznej od niej odległości ( $z \rightarrow \infty$ ), w której uzyskuje się już przestrzenną jednorodność wszystkich termogazodynamicznych parametrów strugi za palisadą ( $g_2(x, y, z) = g_2 = \text{idem}$ ;  $e_2(x, y, z) = e_2 = \text{idem}$ ). Odpowiadające temu obszarowi równania transportu masy, pędu i energii wyrażone być mogą w postaci:

— równania transportu masy

$$e_2 \cdot w_2 \cdot \sin \beta_2 = \frac{1}{t} \int_y^{y+t} e_2(y, z) \cdot w_2(y, z) \cdot \sin \beta_2(y, z) dy; \quad (5)$$

— równania pędu w kierunku osiowym i obwodowym

$$e_2 \cdot w_2^2 \cdot \sin^2 \beta_2 + p_2 = \frac{1}{t} \int_y^{y+t} [e_2(y, z) \cdot w_2^2(y, z) \cdot \sin^2(\beta_2(y, z)) + p_2(y, z)] dy, \quad (6)$$

$$\varrho_2 \cdot w_2^2 \cdot \sin \beta_2 \cdot \cos \beta_2 = \frac{1}{t} \int_y^{y+t} \varrho_2(y, z) \cdot w_2^2(y, z) \cdot \sin \beta_2(y, z) \cdot \cos \beta_2(y, z) dy; \quad (7)$$

— równania energii

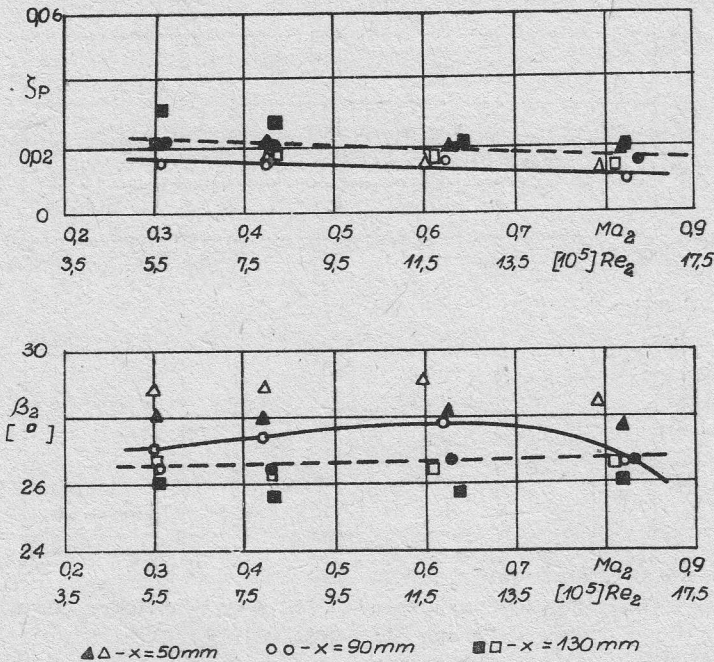
$$\left( \frac{w_2^2}{2} + h_2 \right) \cdot \varrho_2 \cdot w_2 \cdot \sin \beta_2 = \frac{1}{t} \int_y^{y+t} \left[ \frac{w_2^2(y, z)}{2} + h_2(y, z) \right] \cdot \varrho_2(y, z) \cdot w_2(y, z) \cdot \sin \beta_2(y, z) dy, \quad (8)$$

gdzie  $h_2$  jest entalpią statyczną w strefie przepływu jednorodnego. Równania (5) ÷ (8), łącznie z warunkiem  $T_{tot1} = T_{tot2}$ , pozwalają w szczególności na wyznaczenie parametrów  $g_2$  oraz  $p_2$  przepływu homogenicznego.

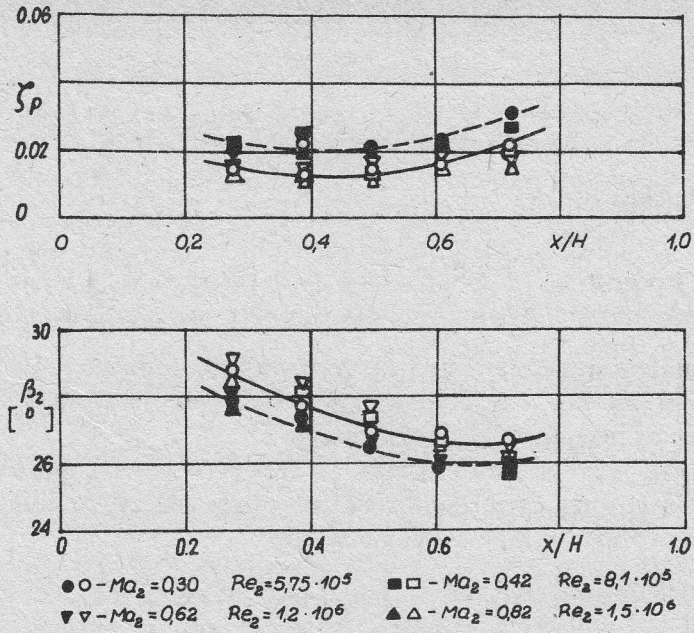
Wykorzystując powyższe stwierdzenia, związek (4) użyty być może do określenia straty profilowej  $\zeta_p$ , przy czym podkreślić raz jeszcze należy, że parametry  $g_2$  i  $p_2$  określane są w obszarze przepływu jednorodnego,

$$\zeta_p = 1 - \frac{1 - \left( \frac{p_2}{g_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{1 - \left( \frac{p_2}{g_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}. \quad (9)$$

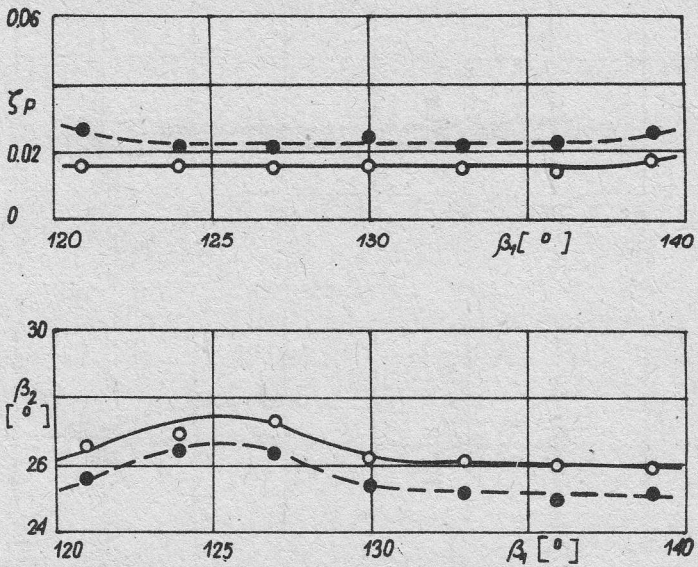
Rezultaty wpływu erozji krawędzi natarcia łopatek na współczynnik strat profilowych przedstawiono na rysunkach 13 ÷ 17. Czarne i białe punkty określają odpowiednio wielkości dotyczące zerodowanych i gładkich łopatek.



Rys. 13. Wyniki badań palisadowych gładkich i zerodowanych profili;  $H = 180$  mm,  $\beta_1 = 127^\circ$

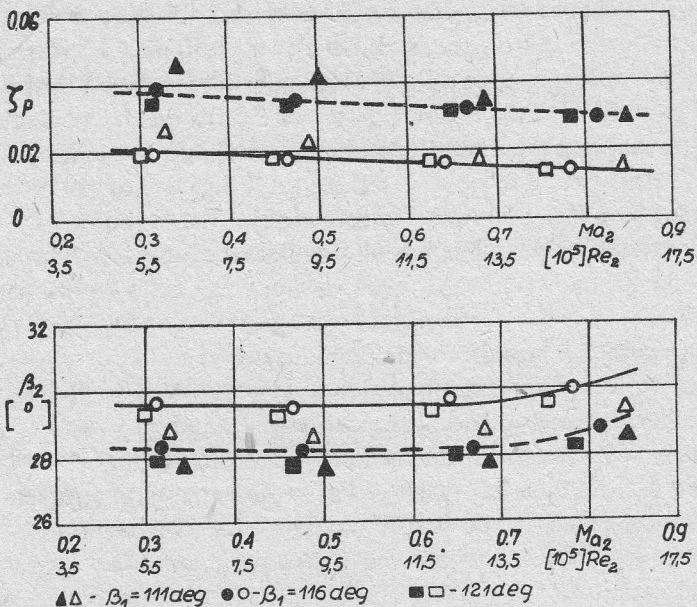


Rys. 14. Zmiana współczynnika strat profilowych i kąta wypływu z palisady wzdłuż wysokości łopatki dla różnych liczb Macha i Reynoldsa;  $H = 180$  mm,  $\beta_1 = 127^\circ$

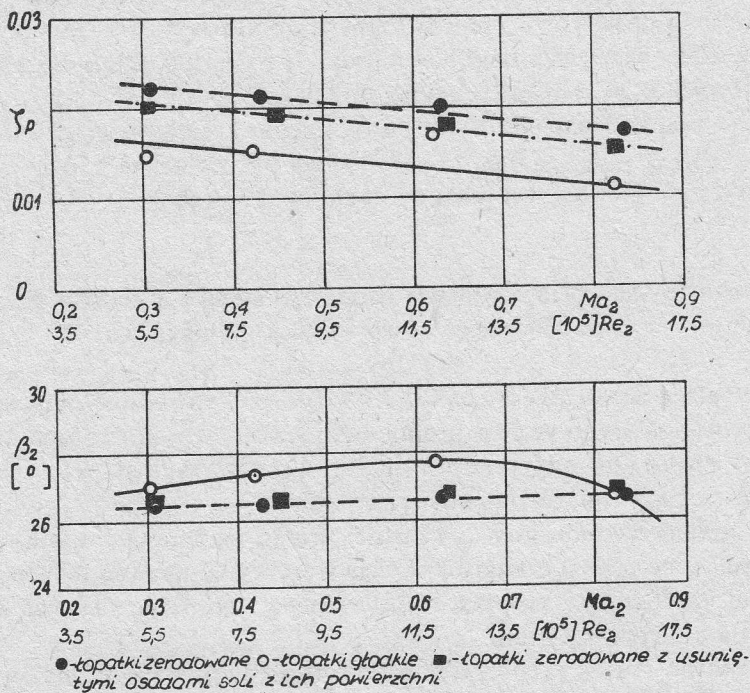


Rys. 15. Zależność współczynnika strat profilowych i kąta wypływu z palisady od kąta napływu;  $H = 180$  mm,  $x = 90$  mm,  $Ma_2 = 0,42$ ,  $Re_2 = 8,1 \cdot 10^5$





Rys. 16. Wyniki badań palisadowych gładkich i zerodowanych profili;  $H = 100$  mm,  $x = 50$  mm



Rys. 17. Zmiana współczynnika strat profilowych spowodowana chropowatością osadów soli na powierzchni łopatek;  $H = 180$  mm,  $x = 90$  mm,  $\beta_1 = 127^\circ$

Rysunki 13 ÷ 15 przedstawiają wyniki pomiarów palisad o wysokości łopatek  $H = 180$  mm uzyskane w zakresie liczb Macha od 0,30 do 0,82. Współczynnik strat profilowych  $\zeta_p$  oraz kąt wypływu  $\beta_2$  uzależnione tu zostały od liczby Macha ( $Ma_2$ ) oraz liczby Reynoldsa ( $Re_2$ ), lub kąta napływu  $\beta_1$  i względnej odległości od ściany tunelu. W porównaniu z łopatkami gładkimi stwierdzono nieznaczny wzrost wartości współczynnika strat profilowych  $\Delta\zeta_p = (\zeta_p)_{\text{zerod}} - (\zeta_p)_{\text{gład}} = 0,65\%$  dla łopatek zerodowanych o wysokości  $H = 180$  mm przedstawionych na rysunku 7a.

Jak widać z rysunku 14 zmiana współczynnika strat profilowych wzdłuż wysokości łopatki  $\zeta_p = \zeta_p(x/H)$  spowodowana jest kilkoma wzajemnie wpływającymi na siebie czynnikami:

- zmianą geometrii kanału międzyłopatkowego,
- zmiennymi warunkami napływu,
- zmiennym stopniem zerodowania krawędzi natarcia.

Na rysunku 16 przedstawiono zależność współczynnika strat profilowych  $\zeta_p$  i kąta wypływu  $\beta_2$  w funkcji liczby  $Ma_2$  i liczby  $Re_2$  oraz kąta napływu  $\beta_1$  dla palisady o wysokości łopatek  $H = 100$  mm. Pomiary tej palisady wykonano tylko w płaszczyźnie środkowej  $x/H = 0,5$ . Stan erozji krawędzi natarcia rozpatrywanych łopatek (rys. 7b) oceniono jako „silny”, podobnie jak na rysunku 8. W porównaniu z łopatkami gładkimi stwierdzono wzrost współczynnika strat profilowych  $\Delta\zeta_p = (\zeta_p)_{\text{zerod}} - (\zeta_p)_{\text{gład}} = 1,65\%$ .

Dla zbadania wpływu chropowatości spowodowanej osadami soli zalegającymi na powierzchni łopatek zerodowanych (rys. 9) na wzrost współczynnika strat profilowych, wykonano dodatkowe badania łopatek zerodowanych z usuniętymi osadami soli ( $\zeta_p)_{\text{uos}}$  z ich powierzchni. Badania te (rys. 17) wykazały obniżenie współczynnika strat profilowych o  $\Delta\zeta_p = (\zeta_p)_{\text{zerod}} - (\zeta_p)_{\text{uos}} = 0,2\%$ .

Różnice w wartościach kąta wylotu  $\beta_2$  pomiędzy łopatkami gładkimi i zerodowanymi  $\Delta\beta_2 = (\beta_2)_{\text{gład}} - (\beta_2)_{\text{zerod}}$  (rys. 13 ÷ 17) mogą być związane z różnymi wartościami geometrycznych kątów wypływu  $\beta_{2g}$  tych łopatek (tabela 3).

### 3. Ocena wzrostu strat przepływowych ostatniego stopnia turbiny o mocy 200 MW spowodowanego erozją łopatek wirnikowych

Chropowatość wywołana erozją nie jest rozłożona równomiernie wzdłuż profilu, lecz selektywnie, zarówno wzdłuż profilu, jak i wzdłuż wysokości łopatki. Powoduje to typowe i istotne (po odpowiednio długim okresie eksploatacji) zmiany kształtu profilów łopatkowych w obrębie krawędzi natarcia.

Wpływ zmiany kształtu i chropowatości profilu na sprawność palisad przejawia się przez zmianę położenia obszaru przejścia warstwy laminarnej w turbulentną oraz zmianę strat w obszarze omywanym tą warstwą. Do wymienionych mogą także dojść straty lokalnych oderwań.

Na podstawie badań eksperymentalnych (rozd. 3) bezwzględny przyrost strat profilowych spowodowany chropowatością krawędzi natarcia oszacowano na 0,65 i 1,65%, w zależności od stopnia chropowatości. Nasuwa się teraz pytanie o wpływ

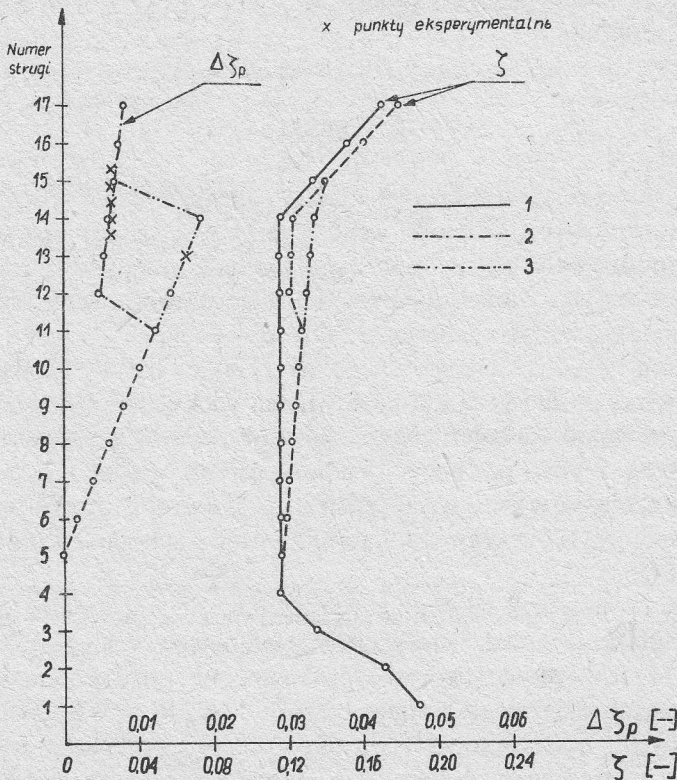


takiego wzrostu strat profilowych na wartość strat przepływowych stopnia turbiny. W tym celu wykonano obliczenia numeryczne przepływu przestrzennego przez stopień przy zadanych współczynnikach prędkości. Obliczenia te wykonano według algorytmu [7] i programu obliczeń numerycznych [8], przy następujących założeniach:

- dane geometryczne stopnia przyjęto na podstawie dokumentacji konstrukcyjnej,
- współczynniki prędkości oraz przelotności założono jak w opracowaniu [9],
- dane termodynamiczne przyjęto według [4].

Wielkości termodynamiczne charakteryzujące ekspansję w stopniu, przyjęte jako dane do obliczeń, pochodzą z pomiarów wykonanych w roku 1978 przez ekipę IMP PAN w turbozespole nr 8 Elektrowni Koźnice [4] (rys. 3).

Przepływ pary przez stopień podzielono na 17 równomiernie rozłożonych strug, począwszy od stopy łopatki. Każdej strudze przyporządkowano wartości strat  $\zeta$  wynikających z przyjętych współczynników prędkości  $\psi$  (linia ciągła na rys. 18). Opierając się na wynikach badań przedstawionych w rozdziale 3 oraz na pomiarach długości pola erozji wzdłuż długości pióra łopatki prezentowanych w [10], przyjęto



Rys. 18. Rozkład strat w funkcji numeru strugi (długości pióra łopatki)

1 — łopatka niezerodowana,  $\tau = 0$ ; 2 — łopatka zerodowana z nakładką stelliteową o długości 300 mm,  $\tau \approx 55,5$  tys. godz.; 3 — łopatka zerodowana z nakładką stelliteową o długości 150 mm,  $\tau \approx 44$  tys. godz.



dość arbitralnie prostoliniowy rozkład przyrostu bezwzględnej wartości współczynnika strat profilowych  $\Delta\zeta_p$  wzdłuż długości pióra łopatki po okresie eksploatacji  $\tau = 44 - 55,5$  tys. godz. dla przypadku łopatki z nakładką stelliteową o długości 300 mm (linia przerywana z kropką) i 150 mm (linia przerywana z dwiema kropkami; rys. 2 i 18).

Rysunek 18 zawiera także rozkłady strat uzupełnione o przyrost strat profilowych w przypadku łopatek zerodowanych (linia przerywana z kropką oraz z dwiema kropkami dla łopatek z nakładką stelliteową o długości 300 i 150 mm).

Dla tak przyjętych rozkładów strat wzdłuż długości pióra łopatki wykonano obliczenia przepływu przestrzennego, w wyniku których otrzymano spadek sprawności oraz mocy ostatniego stopnia części NP turbiny 13K215 (PWK-200). Spadek sprawności oraz spadek mocy łącznie dla dwóch wylotów części NP turbiny wynosi odpowiednio  $\Delta\eta_i = 0,31$  i  $0,44\%$  oraz  $\Delta N_i = 30$  i  $43,6$  kW dla przypadku wieńca wirnikowego złożonego z zerodowanych łopatek o długości nakładek stelliteowych 300 mm (turbina 13K215) oraz 150 mm (turbina PWK-200).

Należy tutaj wyraźnie zaznaczyć, że oszacowany powyżej spadek sprawności  $\Delta\eta_i$  stopnia turbinowego jest wynikiem tylko zmiany straty profilowej spowodowanej erozją krawędzi natarcia. Nie uwzględniono natomiast wpływu erozji profilów wierzchołkowych łopatek na straty brzegowe co może być źródłem dalszego obniżenia sprawności stopnia.

#### 4. Wnioski

1. Przedstawiono rezultaty wpływu dwóch rodzajów stanu erozji krawędzi natarcia łopatek turbinowych. Wartości współczynników strat profilowych otrzymane dla łopatek zerodowanych porównano z wartościami odpowiadającymi łopatom gładkim. Wzrost współczynnika strat profilowych spowodowany erozją krawędzi natarcia, otrzymany z badań eksperymentalnych, wynosi  $\Delta\zeta_p = 0,65$  i  $1,65\%$  odpowiednio dla stanu erozji przedstawionego na rysunkach 7a i b. Brak pomiarów współczynnika strat profilowych dla liczb Macha większych od jedności ( $Ma_2 > 1$ ) nie pozwala na wyciągnięcie bardziej ogólnych wniosków dotyczących wpływu erozji na straty profilowe. Wyniki podobnych badań dla liczb Macha  $Ma_2 > 1$  i prezentowane w [1] wskazują na wyższe wartości strat profilowych. Są to jednak wyniki dla przypadku dużych ubytków krawędzi natarcia profili dochodzących do 20% wartości cięciwy profilu.

2. Usunięcie osadów soli występujących na powierzchni łopatek zerodowanych spowodowało obniżenie współczynnika strat profilowych o  $\Delta\zeta_p = 0,2\%$ .

3. Dla przykładowego zilustrowania problemu przeprowadzono ocenę wzrostu strat przepływowych ostatniego stopnia turbiny 13K215 (PWK-200) spowodowanych erozją krawędzi natarcia łopatek wirnikowych. Dla przypadku wieńca wirnikowego złożonego z zerodowanych łopatek o długości nakładek stelliteowych 300 mm oraz 150 mm otrzymano w stosunku do łopatek gładkich odpowiednio spadek sprawności stopnia  $\Delta\eta_i = 0,31$  i  $0,44\%$  oraz spadek mocy  $\Delta N_i = 30$  i  $43,6$  kW.

W powyższej ocenie nie uwzględniono wpływu erozji na wzrost strat brzegowych stopnia oraz wzrost strat przy prędkościach naddźwiękowych dla liczb Macha  $Ma_2 > 1$ . Należy się spodziewać większego spadku sprawności stopnia niż  $\Delta\eta_i = 0,31$  i  $0,44\%$  po uwzględnieniu dwóch powyższych czynników.

Praca wpłynęła do Redakcji w lipcu 1984 r.

#### Literatura

- [1] A. W. Garkusza, M. F. Fiedorow, S. P. Sudarkina, W. A. Mieltuchow, A. G. Ponkratowa, *O wlijanii eroziennogo iznosa mietalla raboczich lopatok na ekonomicznost parowych turbin*. Energiyeti-czeskoje Maszinostrojenije 23, 1977.
- [2] G. Groschup, *Strömungstechnische Untersuchung einer Axialturbinenstufe im Vergleich zum Verhalten der ebenen Gitter ihrer Beschauelung*. Diss. TU, Hannover 1977.
- [3] J. Dudzisz, S. Marcinkowski, B. Weigle, *Wyniki pomiarów ciśnień w ostatnim stopniu turbiny PWK-200 w warunkach naturalnych (Elektrownia Turów)*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 27/77, 1977.
- [4] J. Dudzisz, A. Krupa, B. Weigle, *Wyniki pomiarów ciśnień w ostatnim stopniu turbiny 13K215 w warunkach naturalnych (Elektrownia Koźienice) uzyskane po udoskonaleniu oprzyrządowania pomiarowego*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 187/79, 1979.
- [5] J. Krzyżanowski, B. Weigle, H. Severin, *Semiempirical Criterion of Erosion Threat in Modern Steam Turbines*. Trans. ASME, J. Engg. for Power, Vol. 93, Sér. A, no. 1, 1971.
- [6] J. Elsner, *Aerodynamika palisad łopatkowych. Maszyny przepływowe t. II*. PWN (w druku).
- [7] E. Błażko, *Algorytm obliczeń przepływu przestrzennego przez stopnie w zmiennych warunkach pracy turbiny*. Oprac. zewn. IMP PAN nr arch. 18/70—54, 1972.
- [8] M. Lidke, *Program obliczeń numerycznych przepływu przestrzennego przez stopnie w zmiennych warunkach pracy stopnia turbiny*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr arch. 18/70—55, 1972.
- [9] E. Błażko, S. Sadowski, *Wolnonośna łopátka wirnikowa  $l_w = 765$  mm. Obliczenia cieplne*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr arch. 18/70—33, 1971.
- [10] J. Krzyżanowski, B. Weigle, H. Severin, *Uwagi o czasowym przebiegu uszkodzeń erozyjnych łopatek wirnikowych ostatnich stopni turbin kondensacyjnych*. Prace IMP, z. 57, 1971.

### Влияние эрозии на потери в течении через решетки и турбинные ступени

#### Резюме

Рабочие лопатки паровых турбин, действующие во влажном паре, подвергаются в основном явлениям соестсложений, коррозии, а также эрозионному действию потока вторичных капель. Как результата этого действия можно ожидать значительных эрозионных повреждений входных кромок рабочих лопаток. Состояние этих повреждений может быть одним из факторов влияющих на увеличение потерь связанных с превращениями энергии в турбинной ступени после определенного периода времени.

С целью происследования влияния эрозии входных кромок рабочих лопаток на коэффициент профильных потерь произведены экспериментальные исследования двух решеток вершинных профилей последней степени турбины мощностью 200 Мвт для различных степеней эрозионного износа входных кромок. Исследуемые решетки состояли как из гладких так и из эродированных лопаток.



Так как нет возможности искусственно отобразить специфическую структуру эрозионных повреждений входных кромок, как гладкие так и эродированные отрезки лопаток были вырезаны из серийно производимых лопаток. Отсюда свинчивание отрезков лопаток, выражающееся изменением угла установки профиля в решетке, вдоль высоты лопатки не превышало  $10^\circ$ .

Значения коэффициентов профильных потерь, полученные для эродированных лопаток, сравнивались со значениями полученными также для гладких лопаток. Увеличение коэффициентов профильных потерь, по отношению к гладким лопаткам, вызванное эрозией входных кромок, определенное экспериментально,  $\Delta\zeta_p = 0,65$  и  $1,65\%$  соответственно для состояния эрозии указанного на рис. 7а и б. Исследования эродированных лопаток, после устранения солеотложений из их поверхности, показали на уменьшение коэффициента профильных потерь на  $\Delta\zeta_p = 0,2\%$  по отношению к результатам исследований эродированных лопаток с солеотложениями.

Проведенная оценка увеличения аэродинамических потерь последней ступени турбины 13К215 (ПВК-200), вызванного эрозией входных кромок рабочих лопаток, показала на уменьшение к.п.д. ступени  $\Delta\eta_i = 0,31$  и  $0,44\%$ , а также на суммарное понижение мощности двух последних ступеней на  $\Delta N_i = 30$  и  $43,6$  кВт, соответственно для случаев рабочих венцов составленных из эродированных лопаток со стеллитными накладками длиной 300 и 150 мм.

## The Influence of Erosion on the Flow Losses of Blade Cascades and Turbine Stages

### Summary

The rotor blades of steam turbines operating in wet steam are subjected mainly to salt deposition, corrosion and erosion due to interaction with streams of secondary droplets. Considerable erosion damage to the rotor blade leading edges may be expected as a result. The damage progress may be one of factors affecting the energy conversion losses in a turbine stage after some time of operation.

To investigate the influence of erosion of the rotor blade leading edges on the coefficient of profile losses two cascades of tip-end profiles of the 200 MW turbine and stage rotor blades have been examined. The cascades were composed of smooth as well as eroded blades.

As the specific surface structure due to the leading edge erosion damage cannot be obtained artificially the smooth as well as eroded blade pieces were cut out of blades from series production. Hence, the blade piece twisting described by variation of the profile angular position in the cascade of blades taking place within the blade height did not exceed 10 degrees.

The values of coefficients of profile losses obtained for the eroded blades were compared with those concerning smooth blades. It was found that the increase due to the leading edge erosion amounted to  $\Delta\zeta_p = 0.65\%$  and  $1.65\%$  for the states of erosion as shown in figures 7a and b, respectively. For eroded blades with salt deposits removed the coefficient of profile losses dropped by  $\Delta\zeta_p = 0.2\%$  compared to those obtained for such blades with salt deposits left untouched.

Evaluation of the increase of flow losses in the final stage of 13K215 (PWK-200) turbine resulting from erosion of the rotor blades leading edges gave the following results: the stage efficiency drop of  $\Delta\eta_i = 0.31\%$  and  $0.44\%$  and the power decrease for the last two stages amounting to  $\Delta N_i = 30$  kW and  $43.6$  kW for the rotor blade-ring composed of eroded blades with stellite cover plates of 300 mm and 150 mm lengths, respectively.