

J. DUDZISZ, J. KRZYŻANOWSKI, A. KRUPA
S. MARCINKOWSKI, B. WEIGLE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN - Gdańsk

NIEKTÓRE PROBLEMY BADANIA TURBIN W SKALI NATURALNEJ

Streszczenie. W referacie opisano badania struktury przepływu w ostatnich stopniach dwóch parowych turbin kondensacyjnych o mocy 200 MW pracujących w elektrowniach. Obejmują one warunki pracy zbliżone i silnie odbiegające od nominalnych. Opisano technikę badań, napotymane trudności i problemy. Przedstawiono także niektóre osiągnięte wyniki.

1. Wstęp

Weryfikacje metod obliczeniowych i lepsze poznanie zjawisk przepływowych w układach łopatkowych turbin budzi wciąż zainteresowanie [1, 2, 3]. Osiągnięcie tych celów wymaga badań przepływu przez te maszyny. W przypadku części turbin zasilanych parą mokrą badania takie powinny być wykonywane w skali naturalnej, ponieważ część istotnych zjawisk nie modeluje się w skali.

Badania części NP turbin dużej mocy w skali naturalnej następczą jednak szereg trudności i problemów.

W referacie obok naświetlenia tych problemów podano niektóre wyniki badań części niskoprężnej krajowych turbin parowych o mocy 200 [MW].

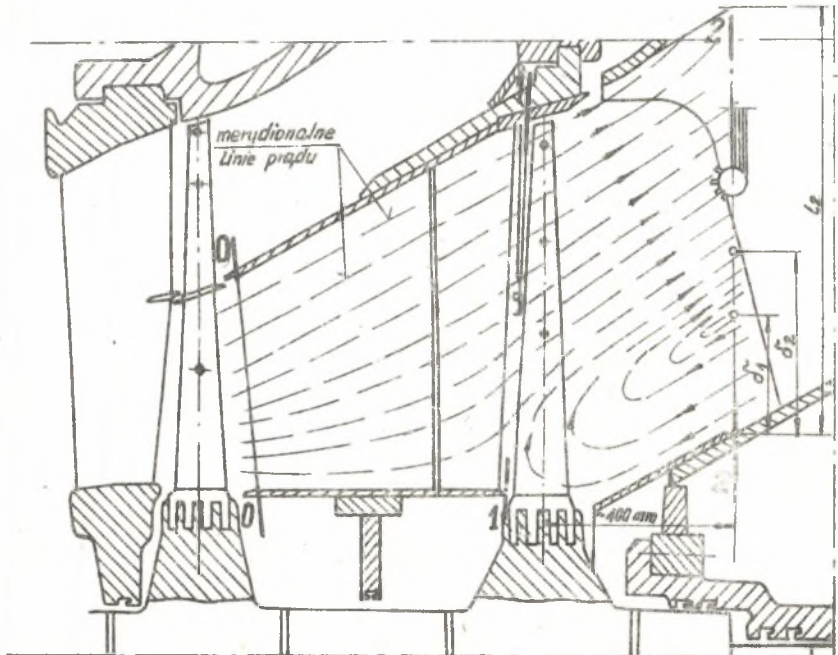
2. Technika pomiarów oraz związane z nią trudności i problemy

Określenie przepływu pary mokrej w stopniach turbinowych wymaga wykonania pomiarów ciśnienia statycznego, całkowitego, stopnia wilgotności (lub entalpii) oraz kątów, służących do wyznaczenia kierunku prędkości. Pomiary te powinny ponadto umożliwiać określenie pól wymienionych wielkości co najmniej w płaszczyznach kontrolnych przed stopniem, w szczelinie między wieńcem łopatek kierowniczych i wirnikowych oraz za stopniem. W przypadku badań ostatnich stopni turbin kondensacyjnych dużej mocy w warunkach naturalnych napotyka się jednak na bardzo duże trudności przy realizacji takiego zakresu badań. Między innymi trudności sprawia opracowanie wiarygodnej metody pomiaru stopnia wilgotności lub entalpii pary mokrej. Dlatego w badaniach przeprowadzonych przez IMP PAN ograniczono

się tylko do pomiarów ciśnień i kątów, a brak pomiaru stopnia wilgotności lub entalpii pary mokrej zastąpiono przybliżonym określeniem linii ekspansji w badanym stopniu. Linie tę określono przedłużając prostą łączącą dwa punkty reprezentujące na wykresie $i-s$ stany pary przegrzanej w procesie jej ekspansji przed badanym stopniem. W punktach tych mierzono ciśnienie i temperaturę statyczną.

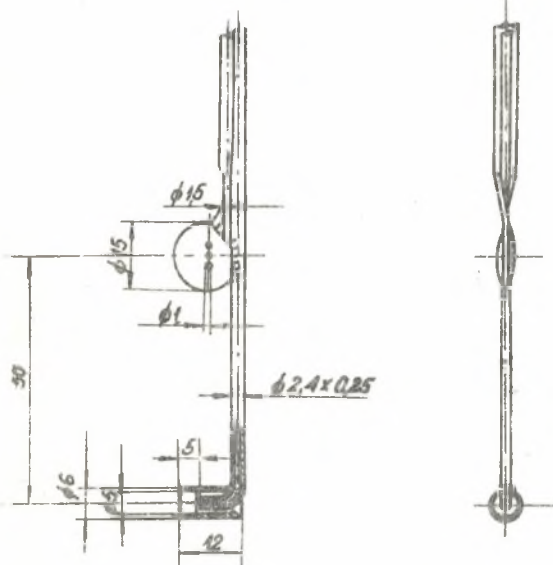
Przedmiotem badań były ostatnie stopnie turbin PWK-200 i 13K-215. Turbina PWK-200, produkcji LMZ - Leningrad, jest trójkadłubową turbiną kondensacyjną z międzystopniowym przegrzewem pary i siedmioma upustami regeneracyjnymi, przeznaczoną do bezpośredniego napędu generatora. Jej nominalna moc wynosi $N_{el} = 200$ [MW], parametry pary świeżej posiadają wartość $p_{00} = 127,4$ [bar], $t_{00} = 535$ [°C], a wtórnie przegrzanej wartość $p'_{00} = 23,1$ [bar], $t_{00} = 535$ [°C], natomiast nominalne ciśnienie w kondensatorze wynosi $p_2 = 0,0343$ [bar]. Para robocza w korpusie części NP tej turbiny rozdziela się na dwa strumienie. W każdym z nich pracują cztery stopnie, z których przedostatni jest typu Baumana. Ostatni stopień części NP turbiny zaprojektowany został według zasady $\alpha_1 = \text{const}$ z reakcyjnością u podstawy wynoszącą $\alpha_{TW} = \sim 0,07$.

Prędkość obwodowa na średnicy zewnętrznej stopnia wynosi $u_2 \approx 460$ [m/s], a stosunek długości łopetki wirnikowej do jego średnicy podziałowej posia-



Rys. 1. Schemat ostatniego stopnia turbiny PWK-200

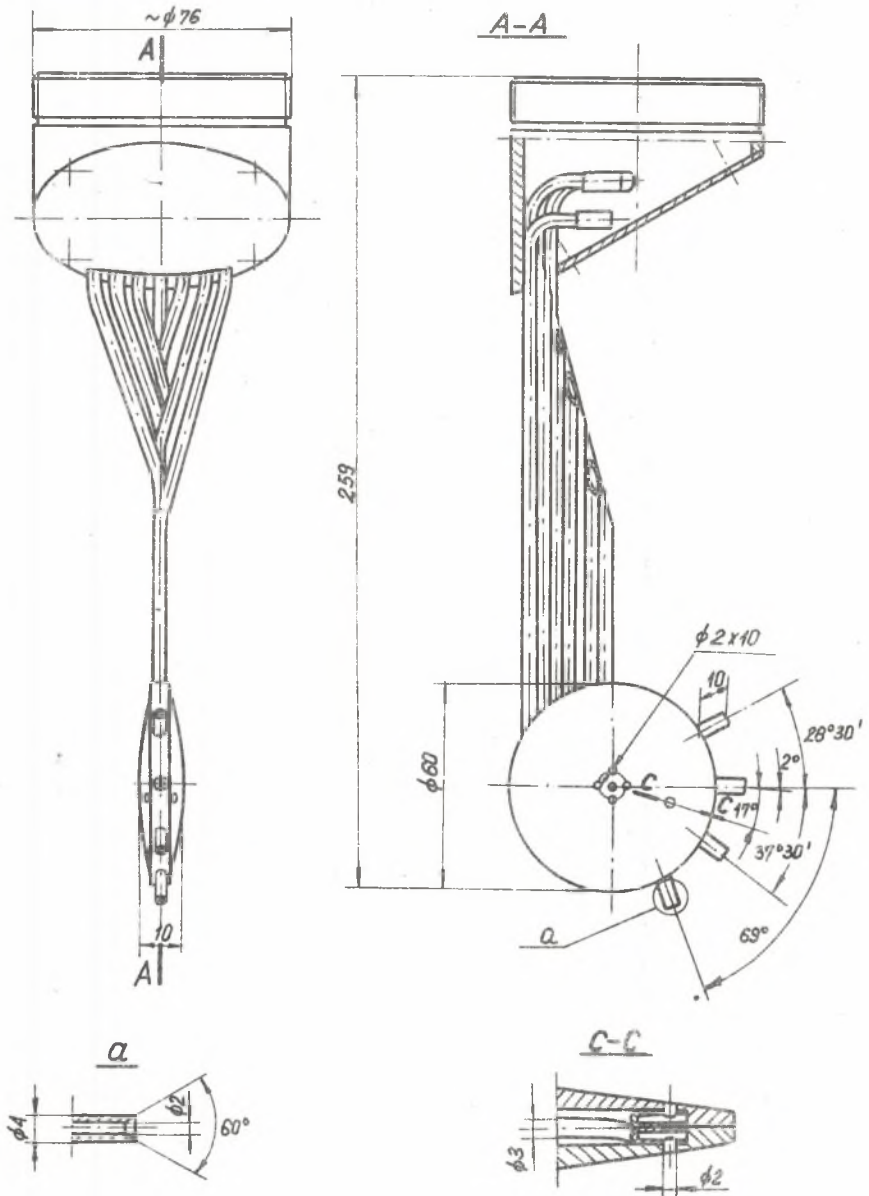
da wartość $1/D$ podz = $1/2,75$. Badana turbina zainstalowana jest w Elektrowni Turów w bloku nr 7 i pracuje tam w zamkniętym obiegu wody chłodzonej. Turbina 13K-215 jest polską wersją turbiny PWK-200. Pracuje ona przy identycznych parametrach pary świeżej i wtórnie przegrzanej oraz posiada identyczną część NP. W badanym egzemplarzu tej turbiny, zainstalowanym w bloku nr 8 w Elektrowni Kozienice, zastąpiono jedynie łopatki kierownicze ostatniego stopnia, wykonywane dotychczas z pojedynczych blach, łopatkami o pełnych profilach, z zachowaniem praktycznie rzecz biorąc takich samych kątów wylotowych. Turbina ta pracuje w Elektrowni Kozienice w otwartym obiegu wody chłodzącej.



Rys. 2. Czujka sondy użytej do pomiarów w szczelinie między wieńcem kierowniczym i wirnikowym

i α_2 w płaszczyźnie prostopadłej do promienia, przy pomocy sond przesuwanych w kierunku promieniowym. W każdym z trzech wymienionych przekrojów kontrolnych ograniczono się tylko do pomiarów wzdłuż jednego promienia. W celu kontroli osiowej symetrii przepływu wykonano pomiary ciśnienia statycznego w przekroju kontrolnym 2-2, w punktach rozmieszczonych co 120° na obwodzie zewnętrznej i wewnętrznej ścianki ograniczającej przepływ. Oprócz tego mierzono między innymi parametry pary świeżej, parametry pary na wlocie do części SP i przed przedostatnim stopniem części NP turbiny (w celu przybliżonego określenia linii ekspansji w ostatnim stopniu) a także moc turbiny, obroty i ilość kondensatu.

Na rys. 1 pokazano schemat ostatniego stopnia turbiny PWK-200. W przekroju kontrolnym przed stopniem (przekrój 0-0) mierzono ciśnienia statyczne na ściankach ograniczających kanał przepływu przy pomocy wiewierzonych w nich otworków i ciśnienia całkowite w kilku punktach stałych, rozmieszczonych wzdłuż promienia, przy pomocy rurek Pitota. Rurki te posiadały osłony zmniejszające ich czułość na zmianę kierunku napływu pary w granicach $\pm 40^\circ$. W szczelinie między wieńcem łopatek kierowniczych i wirnikowych (przekrój 1-1) oraz za stopniem (przekrój 2-2) mierzono ciśnienia statyczne, całkowite oraz kąty α_1



Rys. 3. Czułka sondy użytej do pomiarów za wieńcem wirnikowym

Na rys. 2 pokazano czułkę sondy służącej do pomiarów w szczelinie międzywieńcowej, a na rys. 3 czułkę sondy do pomiarów za stopniem. Czułki te wykonano zgodnie z danymi zaczerpniętymi z prac [4] i [5]. U obu tych czułek do pomiaru ciśnienia statycznego i kąta przepływu służą dyski z otworami na ich bocznych ściankach. W przypadku czułki sondy międzywieńcowej do pomiaru ciśnienia całkowitego służy rurka Pitota w osłonie zmniejszającej jej czułość na zmianę kierunku napływu w granicach $\pm \sim 40^\circ$. W drugiej czułce do pomiaru ciśnienia całkowitego służą 4 rurki Pitota wystające promieniowo z dysku. Jako wartość ciśnienia całkowitego przyjmowano największą wartość spośród wskazań tych 4 rurek. Sndy połączone były z manometrami U-rurkowymi rtęciowymi, na których dokonywano odczytów wartości ciśnień z dokładnością do ± 1 mm słupa Hg.

Kąty α_1 i α_2 mierzono przy pomocy kątomierzy z dokładnością ocenioną na $\pm \sim 3^\circ$. Człki sond ustawiano zgodnie z kierunkiem przepływu najpierw wstępnie przy pomocy manometrów U-rurkowych rtęciowych, a następnie korygowano to ustawienie przy pomocy manometrów U-rurkowych wodnych. Zastosowano specjalne przełączniki pneumatyczne, zabezpieczające przed zasaniem wody z manometrów w momencie ich włączenia.

Pomiar ilości kondensatu wykonywano przy pomocy normalnej zwężki zainstalowanej na rurociągu za pompami skroplin głównych. Celem tego pomiaru było dodatkowe określenie tą drogą masowego natężenia przepływu pary na wylocie z części NP turbiny. Natrafiono jednak na trudności z zapewnieniem takiego stanu ruchu badanych bloków energetycznych, który spełniłby postawione założenia pomiarowe.

Pomimo wyłączenia regeneracji NP, działający system regulacji obiegu skroplin i konieczność utrzymania w ruchu urządzeń pomocniczych bloku uniemożliwiały odcięcie wielu dopływów skroplin do kondensatora i z konieczności należało poprzestać na ocenie ich natężenia. Ponadto stwierdzono wahania natężenia przepływu kondensatu w miejscu jego pomiaru, niezależne od występujących wahań mocy turbozespołu w czasie przeprowadzonych badań w granicach $\pm \sim 4$ MW.

W przypadku turbiny 13K-215 wartości zmierzonej w takich warunkach ilości kondensatu przewyższały wartość obliczanego w oparciu o zmierzone ciśnienie masowego natężenia przepływu pary na wylocie z jednego końca części NP turbiny o $\sim 1 \div \sim 12\%$ przy mocach turbiny $N_{el} = 160-215$ [MW].

Przy pomiarach ciśnień i kątów przepływu w ostatnim stopniu części NP badanych turbin napotkano również na liczne trudności i problemy. Należą do nich między innymi trudności z określeniem wpływu niestacjonarności przepływu w pobliżu wirującej palisady i obserwowanych podczas badań odwrócenia przepływu na pomiary ciśnień wykonywanych przy pomocy manometrów U-rurkowych połączonych z sondami długimi rurkami.

Trudności sprawia także walka z zatykaniem się przewodów impulsowych sond wodą. W tym przypadku zastosowano specjalne środki będące przedmiotem patentu [6] i polegające na modyfikacji stanu wewnętrznej powierzchni

rurek tych sond, ułatwiającej usuwanie z nich wody poprzez przedmuchiwanie powietrzem. Problemem jest także zapewnienie idealnej szczelności połączeń punktów pomiaru ciśnień leżących we wnętrzu turbiny z manometrami. Z konieczności muszą to być przewody elastyczne. Ich odcinki biegnące we wnętrzu korpusu NP turbiny narażone są na działania sił parowych i oprócz tego wysokiej temperatury, panującej tam w okresie rozruchu turbiny.

Ze względu na konieczność kontroli stanu tych przewodów przed każdym pomiarem turbina musiała być wyłączona z ruchu na okres kilku dni.

Na duże trudności natrafiono również przy próbach zrealizowania przesuwu sondy międzywieńcowej w kierunku obwodowym, w celu umożliwienia pomiaru rozkładu ciśnień wzdłuż podziałki palisady kierowniczej. Sonda ta przebija korpus części NP turbiny i zewnętrzny pierścień tarczy kierowniczej. Wprowadzona jest następnie w wąską szczelinę między wieńcem kierowniczym i wirnikowym o szerokości wynoszącej w przypadku ostatniego stopnia turbiny PWK-200 ~ 30 mm i przesuwają się w niej wzdłuż promienia na odcinku o długości ~ 700 mm. Ze względu na trudności konstrukcyjne i bezpieczeństwo ruchu turbiny zrezygnowano z realizacji przesuwu sondy w kierunku obwodowym.

Trudności występują również przy interpretacji wartości ciśnień i kątów mierzonych przy pomocy ozułka pokazanej na rys. 2 w przepływie naddźwiękowym. Przepływ taki występuje w badanych stopniach na wylocie z kierownicy u jej podstawy. W przepływie naddźwiękowym przed ozułką sondy tworzy się zakrzywiona odsunięta fala uderzeniowa. Fala ta we współdziałaniu ze skośnymi falami uderzeniowymi, tworzącymi się w pobliżu krawędzi spływu łopatek kierowniczych, wywiera trudny do określenia wpływ na pomiar ciśnień i kątów.

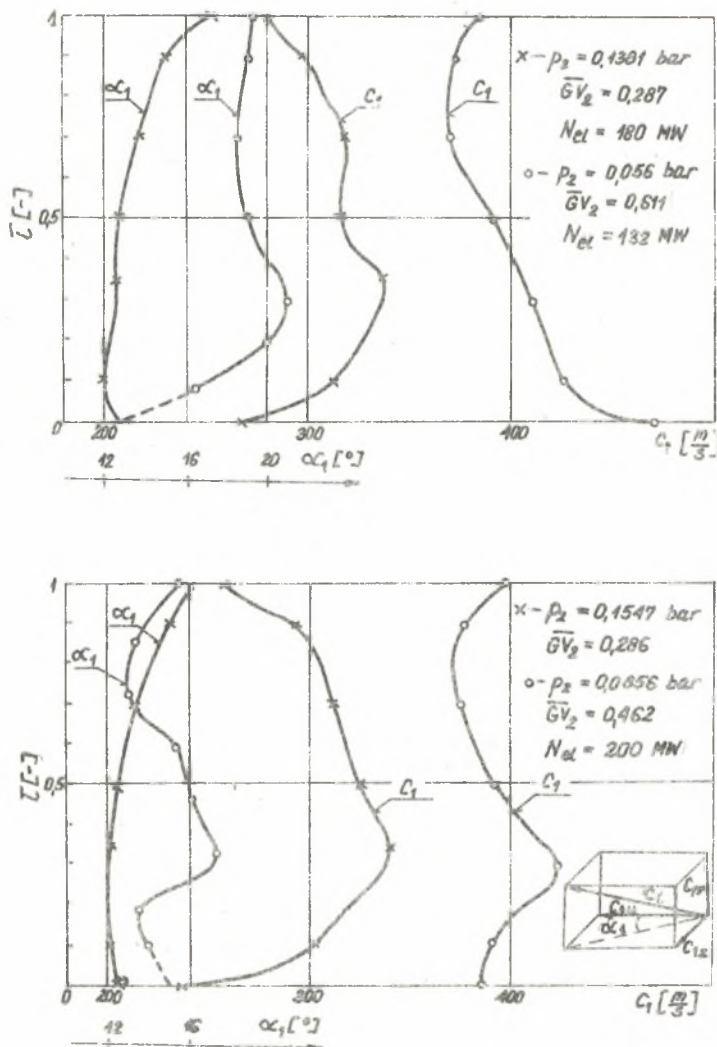
Wykonano również próby wizualizacji przepływu pary mokrej przy pomocy podświetlanej nici. Zaletą tej metody badań jest bezpośrednie przekazywanie informacji. Próby te, przeprowadzone przy obciążeniu turbiny większym od $N_{e1} \cong 100$ MW, zakończyły się niepowodzeniem ze względu na małą przezroczystość pary mokrej dla światła białego.

3. Niektóre wyniki pomiarów i wynikające z nich wnioski

Badanie turbiny PWK-200 wykonano przy mocach zmieniających się w granicy $N_{e1} = \sim 200 - \sim 132$ [MW]. Turbina ta pracuje w Elektrowni Turów w zamkniętym obiegu wody chłodzącej. W polskich warunkach klimatycznych powoduje to, szczególnie w okresie letnim, duże zwiększenie ciśnienia w kondensatorze w porównaniu z jego wartością obliczeniową. W rezultacie ostatni stopień tej turbiny w badanym zakresie jej mocy pracuje w warunkach silnie odbiegających od nominalnych. Względna wartość objętościowego natężenia przepływu pary na wylocie z jej ostatniego stopnia zmieniała się w trakcie badań w granicach $\bar{G}_{v2} = G_{v2} / (G_{v2})_{nom} = \sim 0,286 - \sim 0,52$, gdzie

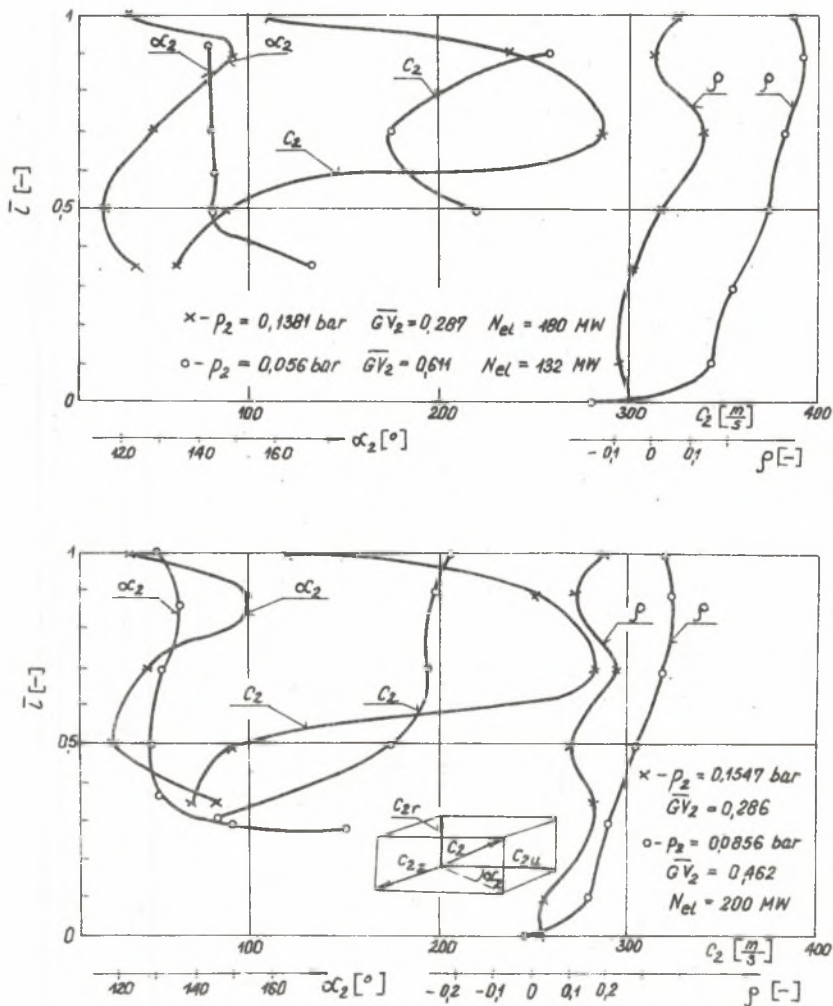
$(GV_2)_{nom}$ oznacza wartość objętościowego natężenia przepływu pary w warunkach nominalnych.

Badana turbina 13K-215 pracuje w Elektrowni Kozienice w otwartym obiegu wody chłodzącej. Ciśnienie w kondensatorze tej turbiny zmieniało się podczas przeprowadzonych badań w granicach $p_2 = \sim 0,047 - \sim 0,055$ [bar]. Poprzez zmianę mocy turbiny w granicach $N_{el} = \sim 215 \div \sim 100$ [MW] uzyskano warunki pracy jej ostatniego stopnia charakteryzujące się wartością współczynnika \overline{GV} zmieniającą się w granicach $\overline{GV}_2 = \sim 0,78 - \sim 0,44$.

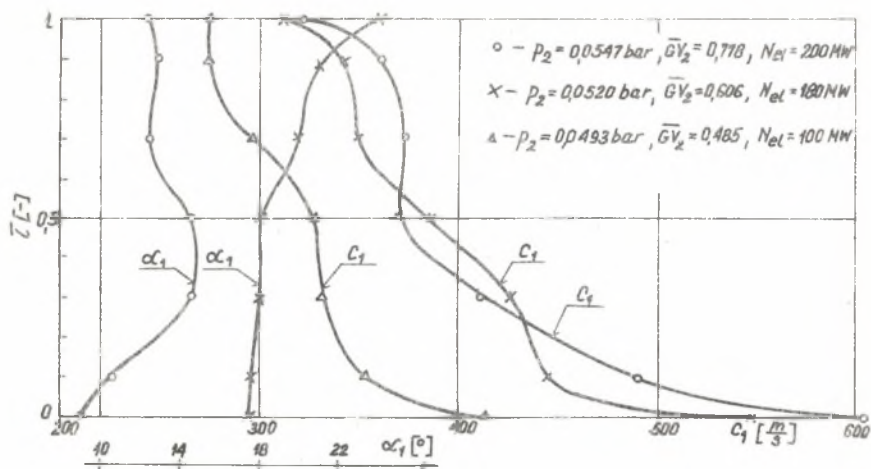


Rys. 4. Wykresy prędkości kątów na wylocie z kierunku osi ostatniego stopnia turbiny PWK-200

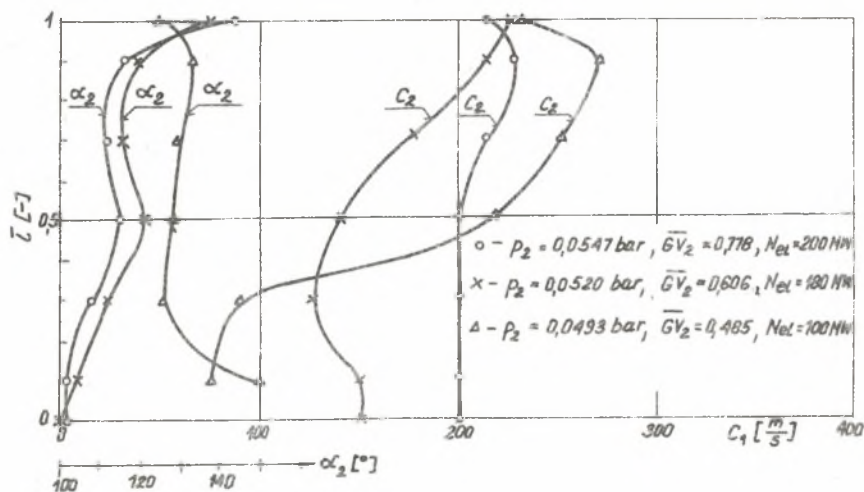
Na rys. 4 pokazano wykresy prędkości c_1 oraz kątów α_1 na wylocie z kierownicy ostatniego stopnia w funkcji bezwymiarowej długości łopatki T , dla wybranych kilku mocy turbiny PWK-200. Natomiast na rys. 5 pokazano dla tej samej turbiny wykresy prędkości c_2 , kątów α_2 na wylocie ze stopnia oraz jego reakcyjności ρ . Z kolei na rys. 6 pokazano wykresy prędkości i kątów na wylocie z kierownicy, a na rys. 7 wykresy prędkości i kątów na wylocie z ostatniego stopnia turbiny 13K-215, również dla wybranych kilku mocy.



Rys. 5. Wykresy reakcyjności ostatniego stopnia oraz wykresy prędkości i kątów na wylocie z wirnika ostatniego stopnia turbiny PWK-200



Rys. 6. Wykresy prędkości i kątów na wylocie z kierownicy ostatniego stopnia turbiny 13K-215



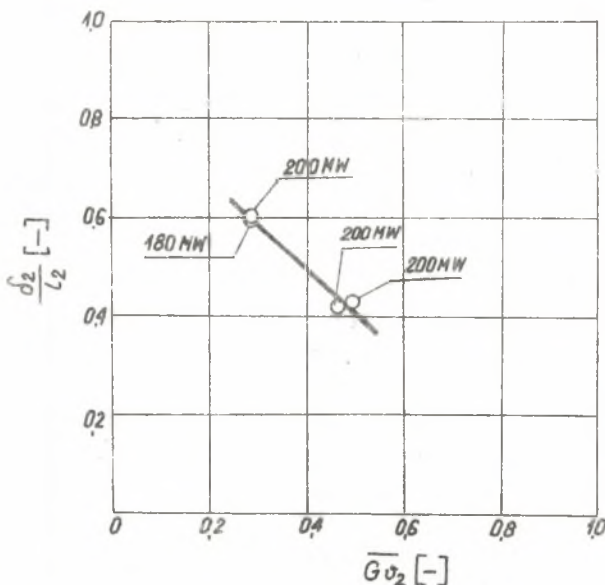
Rys. 7. Wykresy prędkości i kątów na wylocie z wirnika ostatniego stopnia turbiny 13K-215

Prędkości policzono w oparciu o zmierzone wartości ciśnień statycznych i całkowitych, korzystając z wykresu i-s dla pary wodnej.

Z wykresów prędkości c_1 i kątów α_1 pokazanych na rys. 4 i 6 wynika, że regularny przepływ (bez oderwania) wypełnia całą wysokość palisady łopatek kierowniczych (w zakresie mierzonych mocy) badanych ostatnich stopni obu turbin. Również o istnieniu regularnego przepływu w przekroju 2-2

możemy wnioskować z wykresów prędkości c_2 i kątów α_2 przytoczonych na rys. 6 dla ostatniego stopnia turbiny 13K-215 (przy mocach turbiny $N_{e1} = 215$ i 180 [MW]). Na rys. 5 natomiast widoczny jest silny spadek prędkości c_2 i gwałtowny wzrost kąta α_2 u podstawy ostatniego stopnia turbiny PWK-200 przy wszystkich badanych mocach, a na rysunku 7 widoczny jest podobny przebieg tych wielkości w ostatnim stopniu turbiny 13K-215, przy mocy $N_{e1} = 100$ [MW]. Na podstawie tych wykresów można wyciągnąć wniosek o występowaniu w okolicy stopy łopatkki wirnikowej ostatniego stopnia obszernych obszarów oderwania przepływu. W obszarach tych występują strefy ze zwrotnym kierunkiem przepływu pary (skierowanym od kondensatora ku turbinie). Intensywność tego zjawiska rośnie ze wzrostem ciśnienia p_2 w kondensatorze i ze spadkiem mocy turbiny.

Strukturę przepływu w ostatnim stopniu turbiny PWK-200 przedstawiono na rys. 1. Podobna struktura przepływu występuje w ostatnim stopniu turbiny 13K-215 przy jej mocy $N_{e1} = 100$ [MW]. Na rysunku tym przez δ_1 oznaczono położenie miejsca, w którym składowa osiowa prędkości c_2 przyjmuje wartość zerową (co jest równoznaczne z wartością kąta $\alpha_2 = 180^\circ$), a przez δ_2 - grubość strefy oderwaniowej w przekroju kontrolnym 2-2. Grubość strefy oderwaniowej δ_2 określono z równania ciągłości, przyjmując, że masowe natężenie przepływu pary roboczej na wylocie z kierownicy, otrzymane na drodze całkowania parametrów przepływu pary na całej wysokości łopatkki kierowniczej w przekroju kontrolnym 1-1, jest równe masowemu natężeniu przepływu pary w przekroju 2-2. Przy obliczaniu masowego natężenia przepływu założono, że przepływ przez stopień jest osiowo-symetryczny.



Rys. 8. Bezwymiarowa wielkość strefy oderwaniowej w funkcji $G\sigma_2$ (Elekrownia Turów)

Na rys. 8 przedstawiono grubość strefy oderwaniowej $\frac{\delta_2}{I_2}$ w zależności od parametru $\overline{G\sqrt{\sigma_2}}$. Z rysunku tego wynika, że przy $\overline{G\sqrt{\sigma_2}} = 0,286$ grubość strefy oderwaniowej obejmuje około 60% wysokości kanału przepływowego w przekroju kontrolnym 2-2 ostatniego stopnia turbiny PWK-200. Podobne zjawiska oderwania się przepływu od podstawy wieńca łopatek wirnikowych, przy pracy ostatniego stopnia w warunkach silnie odbiegających od nominalnych, opisane są między innymi w pracach [2] i [3].

Z przedstawionych tutaj fragmentarycznie badań wynika, że w warunkach klimatycznych polskich i przy zamkniętym układzie chłodzenia ostatni stopień turbiny PWK-200 pracuje w warunkach oderwania przy pełnej (200 [MW]) i częściowych mocach. Natomiast ostatni stopień turbiny 13K-215 ze zmodernizowanymi tarczami kierowniczymi, pracującej przy otwartym obiegu wody chłodzącej, pracuje z oderwaniem dopiero przy mocy wynoszącej około $N_{el} = 130$ [MW].

Obszar oderwania nie wchodzi do palisady łopatek kierowniczych ostatnich stopni badanych turbin, ale obejmuje on jednak pokaźną część łopatki wirnikowej i obszar za stopniem. Ten wynik badań powinien być zachętą do modernizacji ostatniego stopnia turbin PWK-200 pracujących w opisanych warunkach.

LITERATURA

- [1] Renaudin A., Somn E.: Quasi three dimensional flow in a multistage turbine. Calculation and experimental verification. Proc. of the Symposium on Flow Research on Blading. Brown Boveri and Comp. Limited, Baden, Switzerland 1969, edited by Lang S. Dzung, Amsterdam - London - New York, 1970.
- [2] Łagun W.P., Simoju L.L.: Gazodinamiczeskije issledowanija posledniej stupienija naturalnoj czasti niskawo dawlenija turbiny WK-100-5 do i posle modernizacii. Tieploenergetika 8/1969.
- [3] Statny M., Falont F.: Experimental research of flow in last stage of 200 MW steam turbine. Skoda Review, 1/1971.
- [4] Moore M.J., Sculpher P.: Conditions producing concentrated erosion in large steam turbines. Thermodynamics and Fluid Mech. Convention 1970. Proc. Inst. Mech. Engrs, Vol. 184, part. 3.
- [5] Łagun W.P., Simoju L.L.: Kombinirowannyj zond, schema i metodika izmierenija parametrov potoka w stupieniach niskawo dawlenija parowych turbin. Tieploenergetika 6/1966.
- [6] Marcinkowski S.: Metodyka zapobiegania błędom pomiaru ciśnień spowodowanych występowaniem korków cieczy w trakcie pomiarowym. IMP PAN - Gdańsk, 1977 r., zgłoszenie patentowe nr swid. 75/2/77.

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБИН В НАТУРНОМ МАСШТАБЕ

Резюме

В реферате описаны исследования структуры течения в последних ступенях двух паровых конденсоционных турбин мощностью 200 Мвт, работающих на электростанциях. Исследования проводились на переменных режимах работы турбин.

Описана техника измерений и связанные с ней трудности и проблемы. Показаны также некоторые результаты исследований.

SOME PROBLEMS OF STEAM FLOW MEASUREMENTS IN REAL TURBINES

Summary

Steam flow field examinations in the last stages of low pressure (l.p.) cylinders in the design and the wide range of off-design conditions are described. The two condensing turbines examined are of 200 MW electric power output installed in power stations.

The experimental technics, the problems encountered and some results are presented.