

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

82

W A R S Z A W A - P O Z N A Ń 1982

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 PRZEPŁYWOWYCH

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 1982

Printed in Poland

ISBN 83-01-03979-5
ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE – ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 340 + 90 egz.	Oddano do składania 12 X 1981 r.
Ark. wyd. 12 Ark. druk. 9,25	Podpisano do druku 18 V 1982 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 70 g 70 × 100 cm.	Druk ukończono w maju 1982 r.
Nr zam. 577/122. W-6/523.	

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

STANISŁAW MARCINKOWSKI

Gdańsk

Obserwacja przepływu pary mokrej w ostatnim stopniu turbiny 13K215 z tarczami powłokowymi *

W pracy przedstawiono koncepcję wzierników do obserwacji przepływu pary mokrej oraz rezultaty z przeprowadzonych badań. Podjęto również próbę wyjaśnienia mechanizmów zaobserwowanych zjawisk.

1. Wstęp

Prace nad konstrukcją wzierników do obserwacji przepływu pary mokrej w turbinach rozpoczęto w IMP PAN w roku 1966. Pierwsze badania z turbinami typu TK200 nie przyniosły spodziewanych efektów [1]. Zbyt duża odległość wziernika od obserwowanych powierzchni (około 700 mm) i zbyt duże zamglenie pary w miejscu osadzenia wziernika, uniemożliwiały obserwację wylotu tarczy w warunkach dużego zawilgocenia.

Podobne badania podejmowano również w innych ośrodkach. Na uwagę zasługują wyniki przedstawione w pracach [2, 3]. W [2] przedstawiono tory rozprysku wody na powierzchni łopatek kierowniczych. Obraz ten uzyskano dzięki wtryskiwaniu barwnika na łopatkę. Obserwacje przeprowadzono za pomocą endoskopu. Można stąd wnioskować o tendencjach i mechanizmach płynięcia filmów i strug po powierzchni łopatek. Ciekawą technikę pomiarową opisano w pracy [3]. Obserwacje wylotu z tarczy kierowniczej prowadzono za pomocą endoskopu, natomiast obraz rejestrowano kamerą telewizyjną. W obu przypadkach endoskopy umieszczone były w przepływie, co zapewniało obserwację powierzchni łopatek z bliskiej odległości (do kilkunastu centymetrów).

2. Cel badań

Badania wizualizacyjne przepływu pary w turbinie podjęto celem wyjaśnienia niejednoznacznych opinii co do celowości stosowania tarcz powłokowych z odsysaniem. Badania efektywności odsysania wykonywane są przez IMP PAN od roku 1976. Badania przeprowadzane na eksperymentalnych tarczach powłokowych z odsysaniem wykazały, że pomimo usunięcia części fazy wodnej z powierzchni tarcz kierowniczych za pomocą

* Praca wykonana w ramach problemu międzyresortowego MR.I.26, pt. „Podstawy projektowania maszyn i urządzeń energetycznych”, grupa tematyczna 05.

szczelin odsysających, spodziewany efekt znacznego zmniejszenia zagrożenia erozyjnego nie występował. Okazało się, że zjawiska występujące w procesie ekspansji pary w turbinie są bardzo skomplikowane [4]. W związku z tym powstała konieczność zbadania następujących zjawisk:

- zawilgocenia w stopniu w czasie uruchamiania turbiny,
- struktury przepływającej pary wilgotnej i miejsca separacji fazy ciekłej na powierzchniach łopatek kierowniczych (strona wklęsła i wypukła profilu),
- lokalizacji strefy spontanicznej kondensacji,
- efektywności odsysania wody za pomocą szczelin odsysających,
- możliwości przeciwdziałania erozji łopatek.

Podstawą tych badań była wizualizacja przepływu w określonym stopniu turbiny. Z uwagi na brak możliwości zakupu endoskopów produkowanych fabrycznie, wykonano wziernik, którego konstrukcję oparto na dostępnych elementach i materiałach.

3. Koncepcja sondy wziernika i rozmieszczenia sond w turbinie.

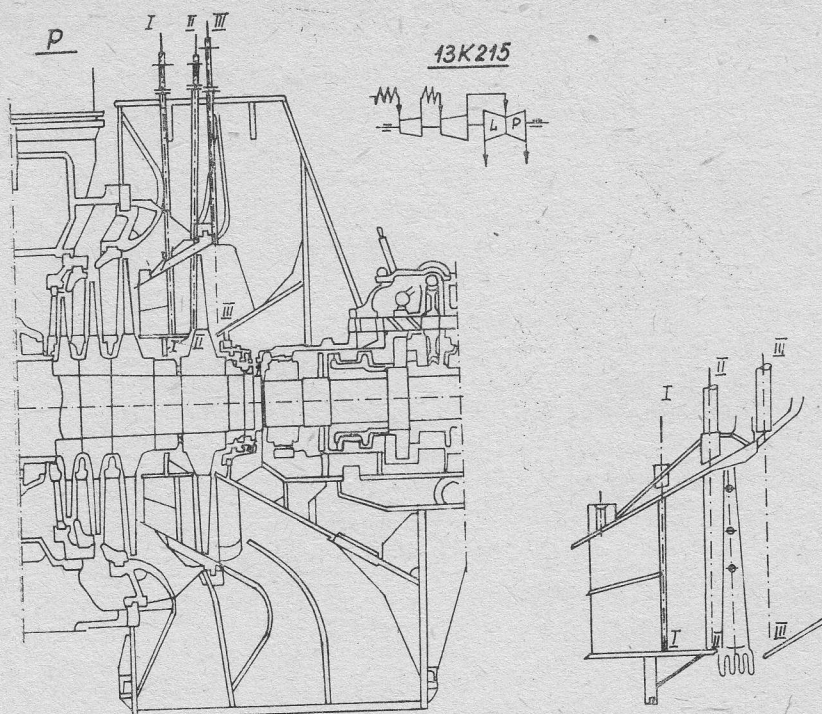
Obszar obserwacji

Przy konstrukcji wziernika wzięto pod uwagę doświadczenia opisane w [5].

Wymiary zewnętrzne sondy-wziernika przyjęto zbliżone do wymiarów sondy używanej do badania rozkładu ciśnień. W ten sposób wyzyskano możliwość osadzenia wziernika w tych samych gniazdach w turbinie. Rozmieszczenie gniazd pokazano na rysunku 1, a zamontowany w korpusie turbiny wziernik przedstawiono na rysunku 2. Rysunek 3 ukazuje pole obserwacji z wszystkich gniazd*. Głębokość sondowania (rys. 4) ograniczona jest długością sondy-wziernika za pryzmatem ($L_{\min}$ — minimalna głębokość sondowania). Wziernik jest przystosowany do obrotu wokół swej osi, a więc do obserwacji przepływu na wlocie do palisady łopatkowej, na powierzchniach bocznych kanału oraz na wylocie z palisady kierowniczej.

Schemat układu optycznego sondy-wziernika pokazano na rysunku 4. Jest to modyfikacja odwróconego układu lunetowego, w którym obiektyw jest soczewką lub zespołem soczewek rozpraszających, a okular lunetką teodolitu. W układzie optycznym sondy-wziernika wykorzystano lunetkę o powiększeniu 26-krotnym i kącie obserwacji $1^{\circ}35'$. Oświetlenie zapewniała żarówka halogenowa o napięciu 12 V, mocy 55 W, strumieniu świetlnym 1550 lm, zasilana z układu zewnętrznego umożliwiającego regulację natężenia światła. Pole obserwacji zmieniało się w zależności od odległości przedmiotu obserwowanego od pryzmatu w granicach od $(16 \times 16) \text{ mm}^2$ do około $(40 \times 40) \text{ mm}^2$ przy odległości 200 mm. Układ optyczny może być dostosowany do fotograficznej rejestracji obrazu obserwacji. W tym celu należy wymienić okular lunetki na odpowiedni okular projekcyjny i sprząc cały układ z mikroskopową przystawką fotograficzną. Poza tym wziernik może być przystosowany do pomiaru rozkładu ciśnień. Możliwość taką uzyskuje się po założeniu odpowiedniej końcówki pomiarowej.

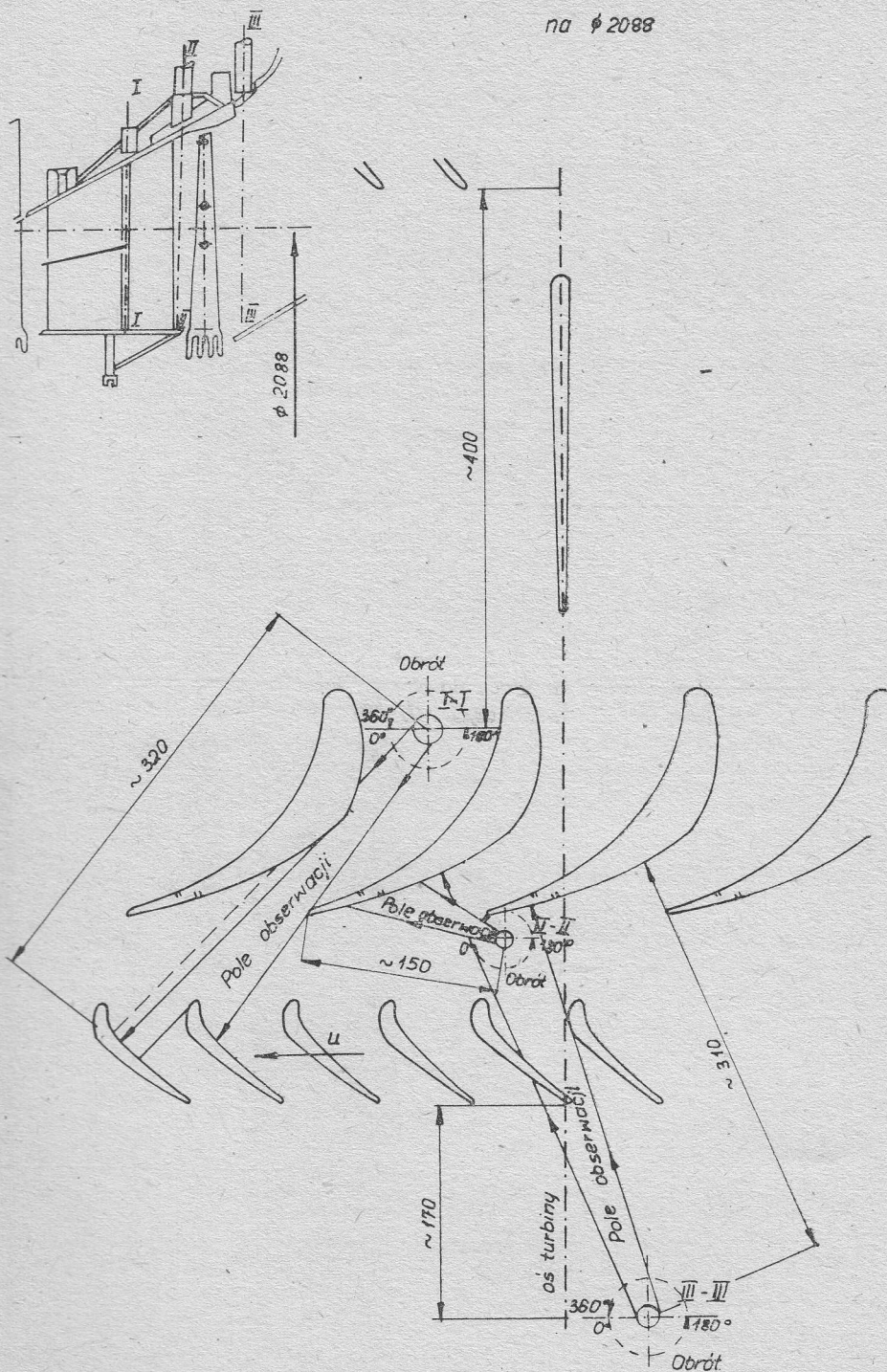
* W opisanych tutaj badaniach wizualizacyjnych korzystano jedynie z gniazda znajdującego się w płaszczyźnie I—I. Stwarzało to możliwość obserwacji przepływu na wlocie do palisady kierowniczej oraz na wylocie ze stopnia.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia gniazd w korpusie turbiny umożliwiających penetrację przepływu sondami w trzech przekrojach: I—I na wlocie do palisady łopatek kierowniczych, II—II na wylocie z palisady łopatek kierowniczych i III—III za wieńcem wirnikowym

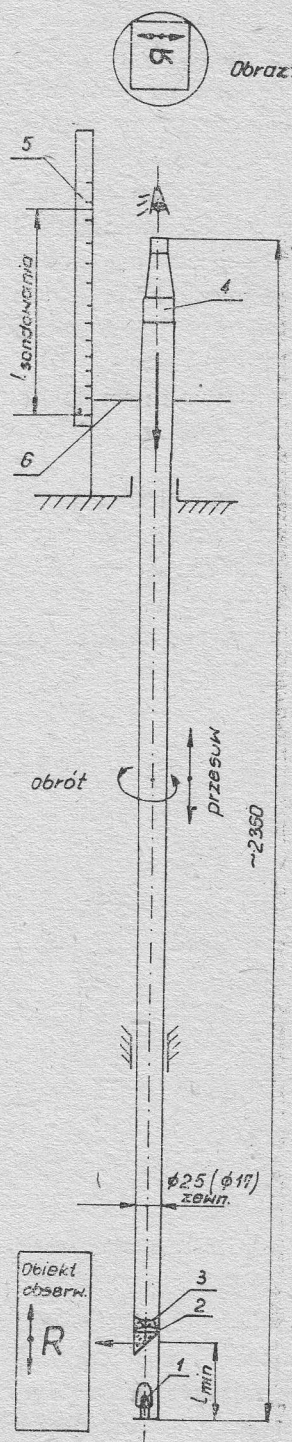
Rys. 2. Wziernik zamontowany w gnieździe korpusu turbiny (gniazdo w przekroju I—I na wlocie do palisady łopatek kierowniczych)





Rys. 3. Obszary obserwacji wziernikami

Rys. 4. Schemat układu optycznego wziernika
 1 – żarówka halogenowa, 2 – pryzmat, 3 – soczewka rozpraszająca, 4 – lunetka obserwacyjna, 5 – przymiar do pomiaru głębokości sondowania, 6 – kątomierz do pomiaru kąta obrotu sondy



4. Warunki obserwacji

Obserwacje dotyczyły ostatniego stopnia turbiny 13K215 z eksperymentalnymi tarczami powłokowymi przystosowanymi do odsysania wody za pomocą szczelin odsysających. Koncepcję oraz program badań efektywności odsysania przedstawiono w [6]. Badania struktury pary w ostatnim stopniu – za pomocą wzierników – są rozszerzeniem tego programu. Przed właściwymi badaniami przeprowadzono obserwacje wstępne w celu ustalenia warunków dobrej widoczności.

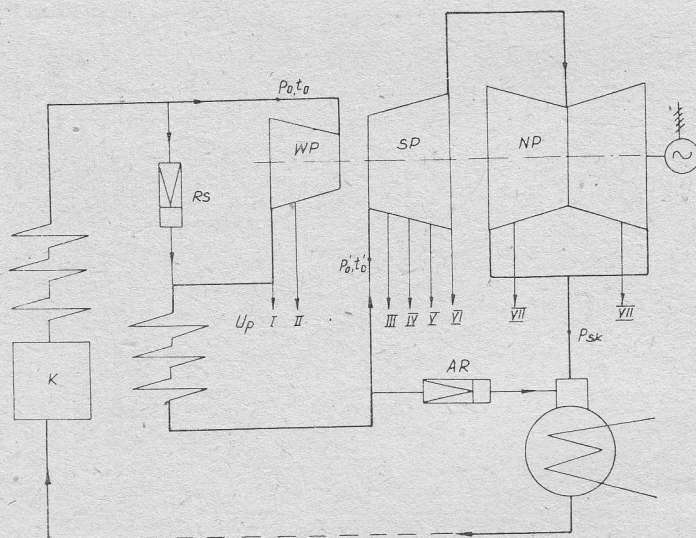
W czasie uruchamiania bloku wyodrębnić można trzy charakterystyczne okresy:

I – uruchomienie kotła – od załączenia palników rozpalowych do uzyskania parametrów pary wymaganych do rozpoczęcia nagrzewania części dolotowej turbiny (wytworzenie próżni w skraplaczu),

II – nagrzewanie części dolotowych turbiny, zwiększenie prędkości obrotowej wirnika, wykonanie prób zabezpieczeń ruchowych, synchronizacja, wstępne obciążenie turbiny,

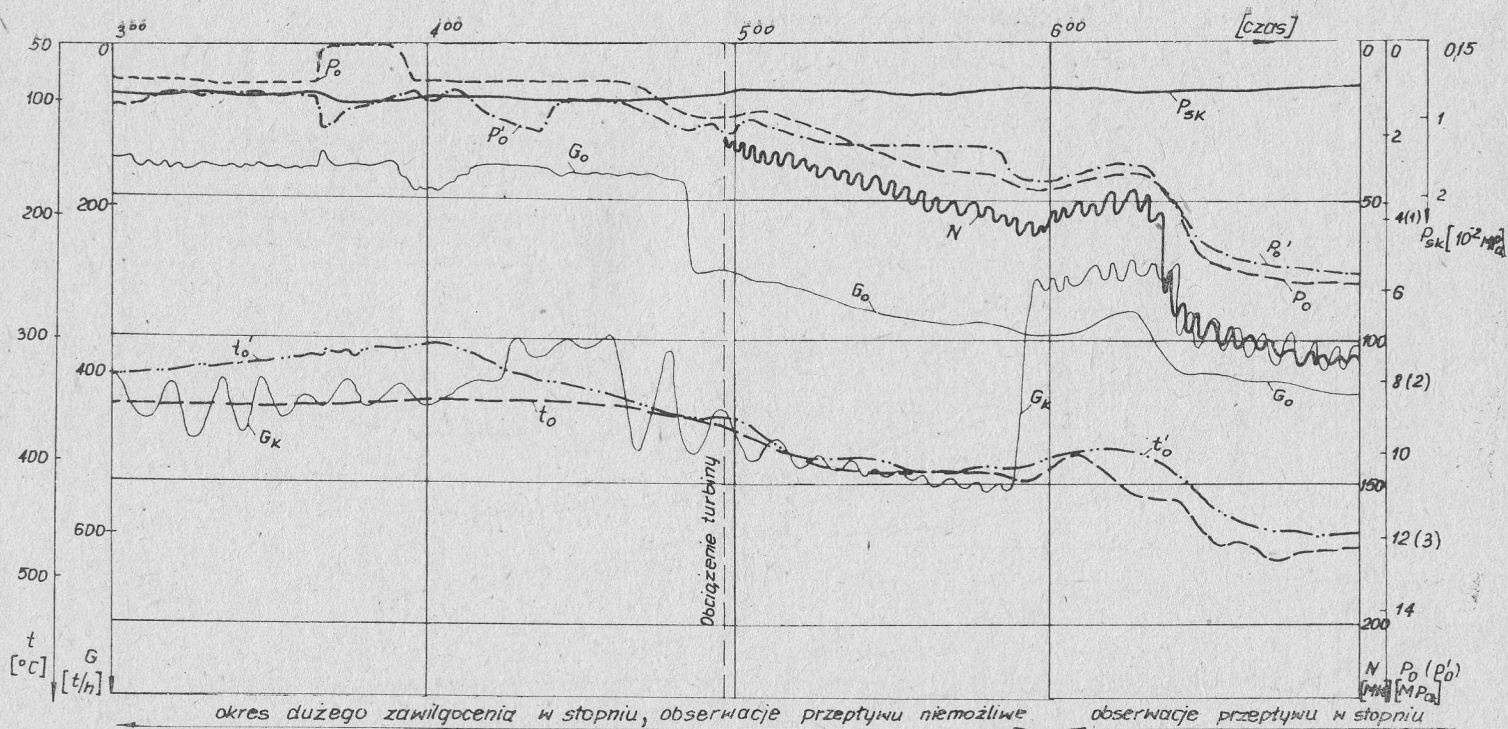
III – obciążenie bloku.

Badania prowadzono podczas uruchamiania turbiny ze stanu „zimnego” (po remoncie bloku) oraz w zmiennych warunkach pracy bloku. Na rysunku 5 przedstawiono schemat układu rozruchowego bloku. Jest to tzw. układ dwuobejściowy. Stacja redukcyjno-schładzająca *RS* zapewnia obejście części *WP* turbiny, a stacja redukcyjno-schładzająca



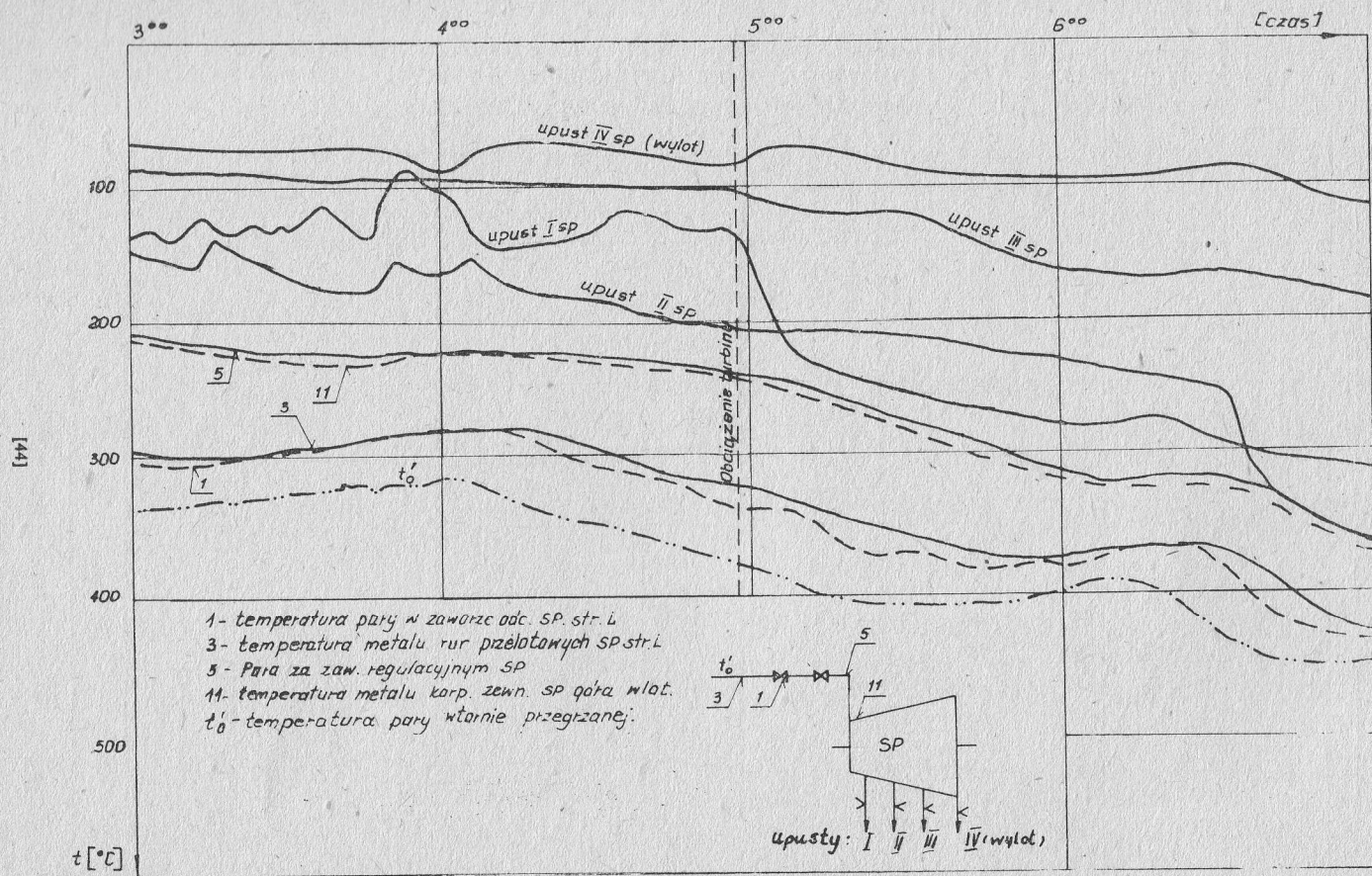
Rys. 5. Uproszczony schemat układu rozruchowego bloku badanej turbiny

AR (*ARS*) obejście części *SP-NP* turbiny. Układ ten zapewnia odbiór pary z kotła podczas uruchamiania i wyłączania bloku z ruchu, umożliwia grzanie przegrzewaczy pary i rurociągów, zabezpiecza kocioł przed nadmiernym wzrostem ciśnienia podczas nagłych zrzutów obciążenia turbiny oraz zapewnia odzysk kondensatu. Zagadnienia związane z funkcjonowaniem układu regulacyjnego sterującego pracą poszczególnych zaworów

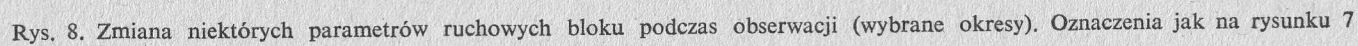


Rys. 6. Zmiana niektórych parametrów ruchowych bloku w czasie uruchomienia

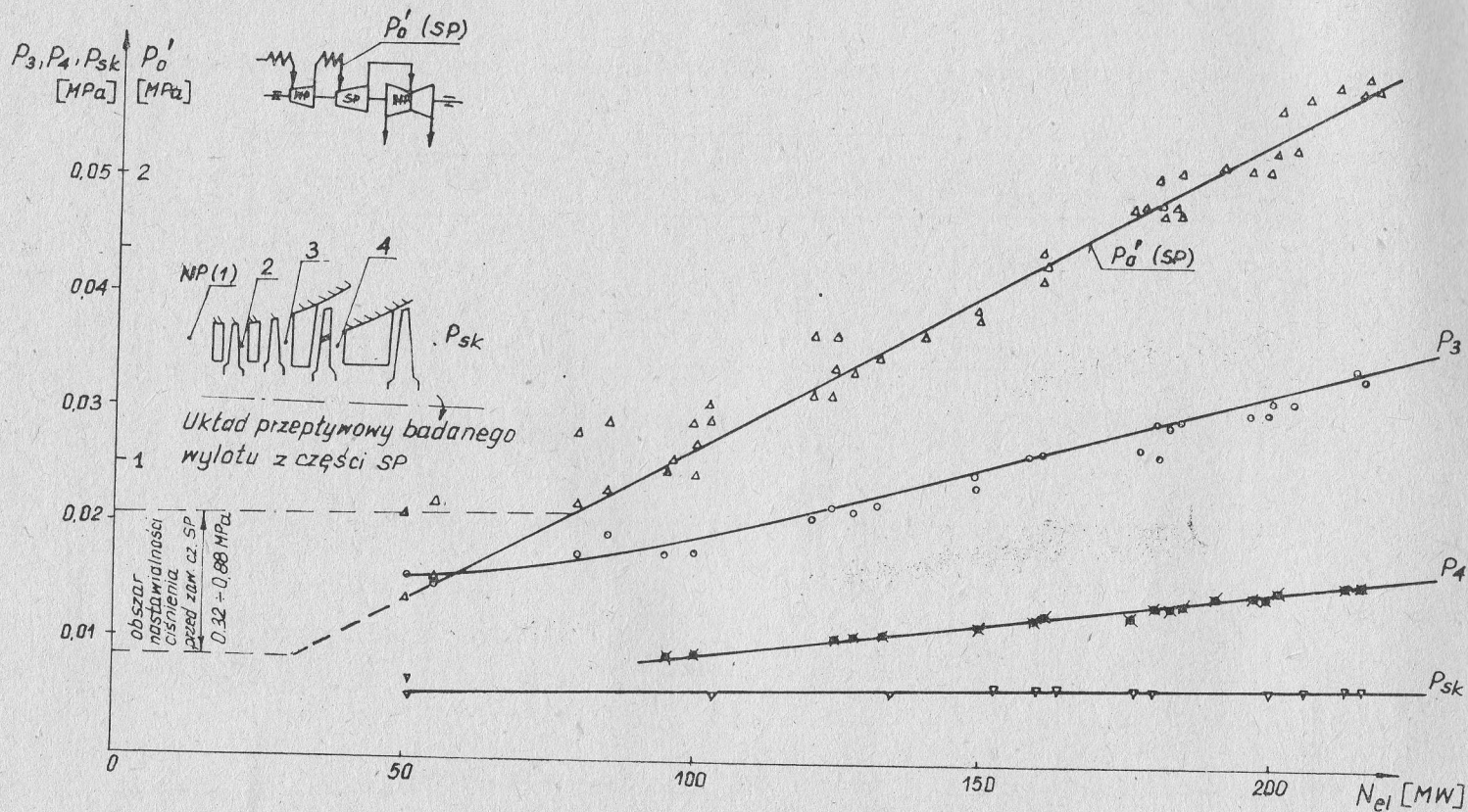
G_0 [t/h] – ilość pary świeżej z kotła, t_0 [°C] – temperatura pary świeżej, p_0 [MPa] – ciśnienie pary świeżej, N [MW] – moc turbiny, G_k [t/h] – ilość kondensatu, t'_0 [°C] – temperatura pary wtórnie przegrzanej, p'_0 [°C] – ciśnienie pary wtórnie przegrzanej, p_{sk} [MPa] – ciśnienie w skraplaczu, τ [h] – czas pomiaru (godz. zegarowe)



Rys. 7. Zmiana niektórych temperatur w obrębie części SP turbiny w czasie uruchomienia



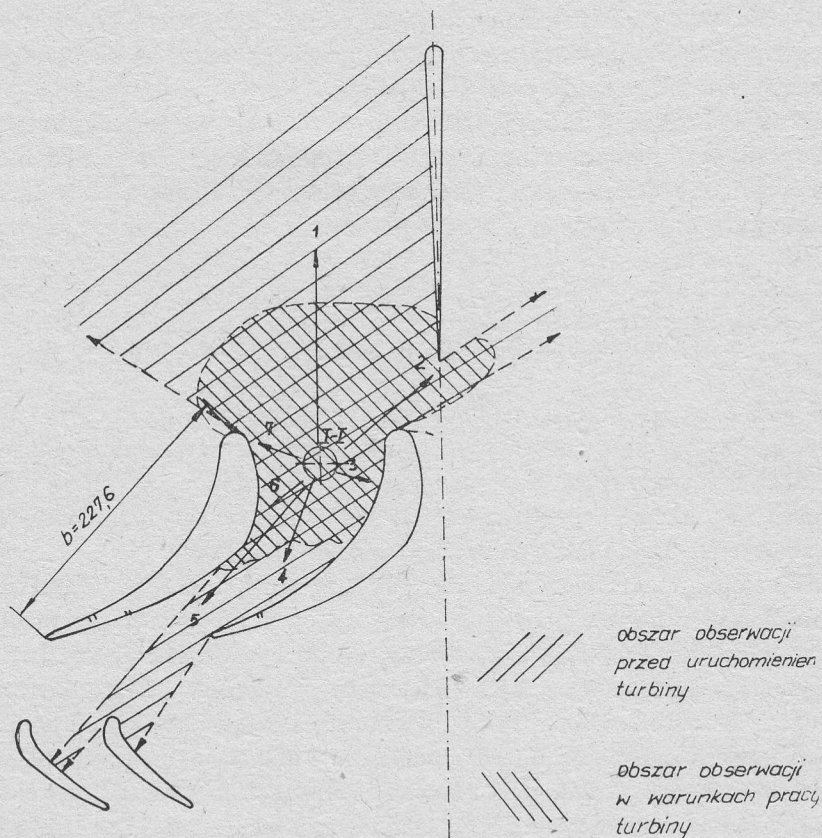
Rys. 8. Zmiana niektórych parametrów ruchowych bloku podczas obserwacji (wybrane okresy). Oznaczenia jak na rysunku 7



Rys. 9. Zmiany ciśnień przy różnych obciążeniach bloku

P_0' [°C] – ciśnienie pary wtórnie przegrzanej, P_3 [MPa] – ciśnienie pary na wlocie do 3 stopnia części NP (stopnia Baumann), P_4 [MPa] – ciśnienie pary na wlocie do badanego stopnia, P_{sk} [MPa] – ciśnienie pary na wylocie (w skraplaczu)

opisano w [7]. W tym miejscu należy wyjaśnić, że ze względu na stosowane zakresy ustawiania minimalnego ciśnienia pary przed częścią *SP* i otwierania stacji zrzutowych, oraz ze względu na kolejność otwierania zaworów, uruchamiania turbiny 13K215 mogą przebiegać niejednakowo.



Rys. 10. Kierunki i obszary obserwacji

Warunki obserwacji turbiny przedstawiono na rysunkach 6 - 10. Rysunek 6 przedstawia zmianę niektórych parametrów ruchu bloku energetycznego zarejestrowaną w czasie uruchamiania bloku ze stanu „zimnego” do obciążenia około 100 MW. Parametry te wskazują na charakterystyczne momenty tego rozruchu, a w szczególności na przebieg wzrostu ciśnień i temperatur pary na wlocie do turbiny i pary wtórnie przegrzanej na wlocie do części *SP*. Rysunek 7 ilustruje zmianę temperatur w obrębie części *SP* występującą podczas uruchamiania turbiny.

Przeprowadzono także obserwację przy obciążeniu turbiny wynoszącym około 100 MW. Wykonano ją po około 11 godzinach od momentu synchronizacji bloku. W tym czasie wzrosło w kotle ciśnienie pary świeżej. Ciśnienie to było wyższe od ciśnienia panującego tuż po uruchomieniu turbiny przy tej samej mocy (rys. 8a).

Obserwacje w zmiennych warunkach pracy turbiny wykonano po trzech dobach pracy bloku. Zmiana obciążenia turbozespołu określona była programem pomiarów i wynosiła

od około 90 do 215 MW. Regulacja pracy turbiny w zakresie od 100 do 215 MW odbywała się automatycznie (za pomocą zaworów części *WP*, przy całkowicie otwartych zaworach części *SP* turbiny), a dla mocy mniejszych niż 100 MW – ręcznie (przymykane były również zawory części *SP*). Przebieg poszczególnych zmian parametrów ruchu bloku w poszczególnych okresach obserwacji przedstawiono na rysunku 8. Na rysunku 9 przedstawiono dodatkowo wyniki pomiaru ciśnień zaczerpnięte z pracy [8]. Jak widać, ciśnienia w poszczególnych stopniach zmieniają się proporcjonalnie do obciążenia turbiny (liniowo dla mocy w zakresie od 100 do 215 MW).

Rysunek 10 informuje o zasięgu obserwacji w różnych warunkach pracy turbiny, w tym także podczas występowania zawilgocenia w stopniu. Należy nadmienić, że zarówno obserwacja obrazu odwróconego jak i ograniczone pole obserwacji utrudniały interpretację wyników obserwacji oraz wymagały pewnego okresu adaptacji obserwatora do warunków obserwacji.

5. Wyniki obserwacji przepływu pary przez badany stopień

Badania wizualizacyjne polegały na obserwacji przepływu pary przez określony stopień turbiny oraz na sporządzaniu szkiców sytuacyjnych i opisów dotyczących obrazu widzianego za pomocą sondy-wziernika. Obserwowano również przepływ za pomocą wzierników umieszczonych na trakcie odsysającym stoiska do badania efektywności odsysania [6]. W czasie badań rejestrowano także parametry ruchowe bloku.

Obserwacje sondą-wziernikiem wykazały obecność fazy ciekłej we wszystkich okresach badań, to jest w okresie przed synchronizacją, podczas obciążania turbiny oraz podczas pracy przy różnych obciążeniach. Potwierdzono wyniki wcześniejszych ustaleń [8], że ilość odsysanej wody za pomocą szczelin odsysających powłokowych tarcz kierowniczych jest proporcjonalna do obciążenia turbiny w zakresie mocy od około 100 do 215 MW. Przy mocach w zakresie od 50 do 100 MW odsysanie praktycznie przestaje funkcjonować.

Stwierdzono, że podczas zrzutu pary z kotła do kondensatora w rurociągach stanowiska do badania odsysania (opisanego w [6]) gromadzi się woda, a przepływ czynnika przez te rurociągi prawie nie występuje. Za pomocą sondy-wziernika stwierdzono, że przy małych obciążeniach turbiny występują duże krople oraz duże zamglenie przepływu. Wykonywane równocześnie badania efektywności odsysania wykazały, że odsysanie wody z łopatek kierowniczych praktycznie nie występuje w tym okresie, pomimo wytworzenia odpowiedniej różnicy ciśnień w szczelinach odsysających (wspomaganie smoczkiem parowym).

5.1. Rozruch turbiny

Zmianę podstawowych parametrów pracy bloku energetycznego w czasie rozruchu turbiny ilustruje rysunek 6, natomiast poniżej zamieszczono wyniki obserwacji przepływu przez turbinę.

a. Podczas grzania części dolotowych turbiny i zwiększania jej prędkości obrotowej, obserwacje przepływu w stopniu nie były możliwe. Powierzchnia przyzmatu sondy była

pokryta dużymi kroplami, które rozpraszały obraz. Po wyjęciu sondy stwierdzono ślady nacieków pozostawionych przez spływające po niej strugi wody. Świadczy to o intensywnym procesie kondensacji pary na wszystkich powierzchniach i o dużym zawilgoceniu przepływu.

b. Również początkowy okres obciążania turbiny (około 1 godziny przed wyłączeniem stacji zrzutowej; patrz krzywa G_K na rys. 6) nie sprzyjał obserwacji przepływu. Od stromy wylotu z palisady pojawiły się duże krople, które padały na wziernik (kierunki obserwacji 4 i 5 na rys. 10).

c. Po wyłączeniu stacji zrzutowej nastąpiła poprawa w warunkach obserwacji. Mimo dużego zamglenia (mleczno-białego) powierzchnia pryzmatu ulegała widocznemu osuszaniu. Nie dostrzegano wprawdzie zarysu krawędzi łopatek, lecz obserwowano duże krople w przepływie (padały na pryzmat) i krople przemieszczające się po wypukłej stronie łopatki kierowniczej (kierunki obserwacji 6 i 7 na rys. 10).

d. Obserwacje w czasie obciążania turbiny do około 100 MW ujawniły obecność dużej ilości dużych kropeł na powierzchni łopatki (kierunki obserwacji 3 i 4 na rys. 10) oraz spływanie cienkich filmów falujących i strug po powierzchni pryzmatu w przypadku ustawienia sondy-wziernika na kierunku obserwacji 4 i 5.

e. Obserwacje przy obciążeniu około 100 MW i zwiększonym ciśnieniu (patrz rys. 8a) wykazały zmniejszenie ilości kropeł w stosunku do obserwacji opisanych w punkcie d.

5.2. Zmienne obciążenie turbiny

Obserwacje prowadzono przy obciążeniach około 90, 120, 145, 160, 180, 200 i 215 MW (rys. 8). W tym czasie bilansowano również wydatek pary przepływającej przez stopień, wyłączając upusty regeneracyjne w częściach *SP* i *NP*. Bilans ten wykorzystano w badaniach przepływu przestrzennego przez turbinę.

Zmiany ciśnień w zależności od obciążenia turbiny (rys. 9) pozwalają przewidzieć położenie linii ekspansji pary wodnej w częściach *SP-NP* turbiny i w poszczególnych stopniach tych części. Korzystając z [5, 8] naniesiono na rysunku 12 kilka przebiegów linii ekspansji dla różnych mocy.

W czasie obserwacji panowała dobra widoczność – pryzmat nie był zaparowany, a osiadające na pryzmacie krople usuwane były przez przepływ podczas zmiany kierunku obserwacji. Obserwowane formy fazy ciekłej uwidoczniono na rysunku 11. Formy te występowały z różnym nasileniem i w różnych zestawieniach. W wyniku obserwacji przepływu w różnych kierunkach (rys. 10) stwierdzono co następuje:

Kierunek 1. Przy obciążeniu 90 MW i mocach ≥ 180 MW pojawiają się refleksy pochodzące od bardzo cienkich filmów na powierzchni pryzmatu.

Kierunek 2. Między żebrami i łopatką pojawiają się krople różnej wielkości. Przy obciążeniu 90 MW krople występują sporadycznie, przy 120 MW są drobne o średnicach około 1 mm, przy 145 i 160 MW ich średnice osiągają około 4 mm, przy 180 MW następuje zmniejszenie ilości i wielkości kropeł, a przy obciążeniach 200 i 215 MW zanikają.

Kierunek 3 i 4. Przy obciążeniach około 145, 160, 180, 200 i 215 MW dostrzegano krople przylegające do powierzchni łopatki. Ich średnice oceniono na $1 \div 4$ mm.

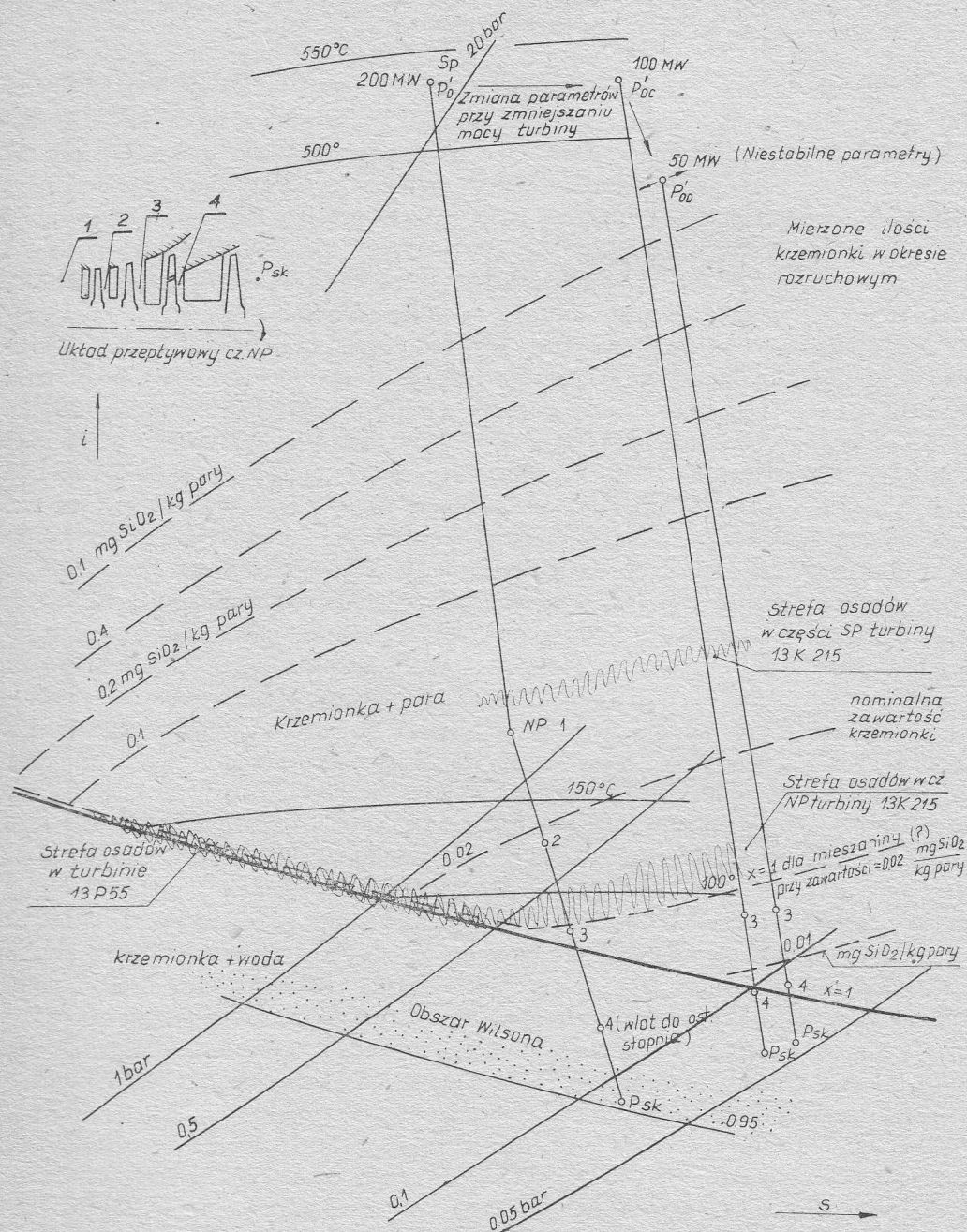
6. Próba analizy zaobserwowanych zjawisk*

W wyniku obserwacji potwierdzono przypuszczenie o dużym zawilgoceniu pary przepływającej przez ostatni stopień turbiny w stanach rozruchowych i podczas pracy turbiny przy różnych obciążeniach. Przed synchronizacją turbiny zawilgocenia te były tak duże, że uniemożliwiały prowadzenie obserwacji przepływu. Obserwacje stały się możliwe dopiero po wyłączeniu stacji zrzutowej pary do kondensatora *AR* (*ARS*), co nastąpiło przy obciążeniu turbiny mocą około 60 MW. Obserwacje te potwierdziły wyniki badań radzieckich opublikowanych w [9, 10], a w szczególności wnioski dotyczące wpływu pracy stacji zrzutowej pary na zagrożenie erozyjne ostatniego stopnia.

Na podstawie obserwacji przepływu przy zmiennych obciążeniach turbiny stwierdzono, że zawilgocenie pary w przepływie występuje już na wlocie do ostatniego stopnia. Natomiast z przebiegu linii ekspansji pary w częściach *SP* i *NP* badanej turbiny wynika (rys. 12), że przy obciążeniach od 100 do 200 MW para na wlocie do stopnia winna mieć zawilgocenie w granicach od 0 do 3% (błąd określenia $\Delta y_{\max} \approx 0,5\%$). W związku z tym przy obciążeniu około 100 MW kondensacja pary na wlocie do palisady kierowniczej nie powinna wystąpić ($x \approx 1$). To stwierdzenie oparto na informacji [11], że początek kondensacji następuje dopiero przy zawilgoceniu $y = 3\%$, co odpowiada tzw. strefie Wilsona (tzw. kondensacja homogeniczna). Ponieważ para wilgotna występowała przy wszystkich obciążeniach, stąd wniosek, że początek kondensacji pary w turbinie nie pokrywa się z położeniem obszaru Wilsona. Do podobnych wniosków doszli A. Smith [14], J. S. Wyler i K. J. Desai [15] oraz T. A. Filipow i inni [13]. Podejmując próbę wyjaśnienia tych rozbieżności T. A. Filipow i inni zwrócili uwagę także na to, iż wcześniejsza kondensacja może się rozwijać głównie w śladach wirowych za łopatkami kierowniczymi. Odmienne poglądy ma G. Gyarmathy [12], który uważa, że w przepływie pary przez turbinę część czynnika ekspanduje bez strat do stanu dużego zawilgocenia oraz że w następstwie tego uzyskuje się parę o różnych entalpiach i różnym stopniu zawilgocenia. W efekcie obserwuje się „rozmycie” strefy kondensacji i występowanie zawilgocenia w przepływie pary przed obszarem Wilsona. G. Gyarmathy wypowiada się również [12] na temat domieszek i soli zawartych w parze wodnej, które mogą być zarodkami kondensacji. Między innymi stwierdza (odmiennie niż w [11]), że choć ilości zarodki homogenicznych i ilości zarodki w postaci soli (heterogeniczne) są porównywalne, a ich oddziaływanie na przepływ powinno być podobne, to jednak rola zarodki heterogenicznych w procesie kondensacji pary nie jest dokładnie zbadana. (Prawidłowa ocena ilości zarodki kondensacji w jednostce objętości ma decydujące znaczenie w analizie procesu kondensacji.)

Własne obserwacje dowodzą, że sole (patrz rys. 13 i 14) wytrącają się w określonych strefach układu łopatkowego. Głównym składnikiem tych osadów jest krzemionka (SiO_2). Mechanizm przenoszenia się soli i jej wytrącania z pary przedstawiono w [16, 17]. Wydzielanie się nadmiaru krzemionki z pary (ponad wartość graniczną) następuje po obniżeniu parametrów pary (w czasie ekspansji pary następuje również spadek rozpuszczalności

* W związku z zastrzeżeniami PT Recenzentów co do podstaw dla niektórych hipotez rozdział ten skrócono, ograniczając jego treść do niezbędnej oceny zjawisk zaobserwowanych. W pierwotnej wersji tego rozdziału szczególną uwagę zwrócono na czynniki, które prawdopodobnie są przyczyną różnicy między przebiegiem procesu kondensacji w turbinach i na stoiskach modelowych.

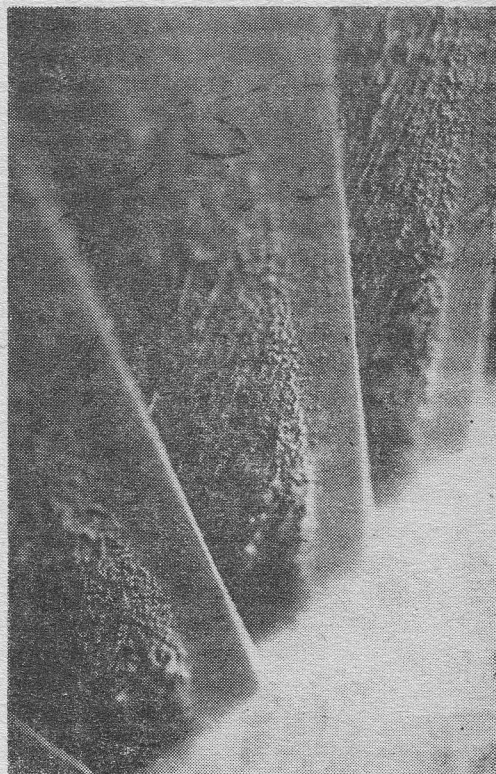


Rys. 12. Rozpuszczalność krzemionki w parze na tle przebiegu linii ekspansji w częściach SP i NP turbiny 13K215

krzemionki w parze). Stan ten ilustruje rysunek 12. Linie przerywane na tym rysunku wskazują na graniczną rozpuszczalność krzemionki w parze o danych parametrach. Na rysunku 13 przedstawiono fotografię łopatek pokrytych osadami. Obraz ten odpowiada

nominalnym wartościom krzemionki wynoszącym około $0,02 \text{ mg SiO}_2/\text{kg}$ pary (lub kondensatu). Zawartość ta była utrzymywana i kontrolowana w czasie pracy turbiny.

Sprawy związane z wydzielaniem się soli z pary, w tym także powstanie osadów soli w części *SP* (rys. 14), związanych z obecnością tzw. „krzemionki niereaktywnej”, wy-



Rys. 13. Osady na łopatkach wirnikowej 2 stopnia części *NP* turbiny 13K215 (obszar pary przegrzanej)

magają oczywiście dokładnego wyjaśnienia. Oceniając możliwość wpływu tych soli na proces kondensacji należy stwierdzić, że wyniki własnych obliczeń świadczą o tym, że ilość zarodki heterogeniczne może przewyższać ilość zarodki homogeniczne wynikających z obliczeń kondensacji pary dla strefy rozwiniętej kondensacji (nawet 10^4 razy). Nasuwają się również wątpliwości co do traktowania zarodki heterogeniczne jako „biernego czynnika w procesie kondensacji”. Na uwagę zasługują też własności fizykochemiczne krzemionki, która występuje w parze częściowo w postaci jonowej. Należy przypuszczać, że krzemionka jonowa wydzielona w przepływie powoduje reakcje chemiczne [18] wiążąc się z innymi pierwiastkami (np. sól, chlorki itp.) oraz z cząsteczkami wody.

Porównując warunki eksperymentów wykonywanych na stoiskach modelowych z wynikami eksperymentów na turbinach należy zwrócić uwagę na możliwość występowania różnic w składzie chemicznym pary. Różnice te mogą wynikać z niskich parametrów pary i innego składu chemicznego wody kotłowej w wytwornicach pary zasilających stoiska modelowe, w stosunku do kotłów energetycznych. Czynniki te wpływają na powstanie rozpuszczonych soli w parze [16, 17]. Te różnice wpływają prawdopodobnie na różny obraz zjawisk obserwowanych w przepływie.

Ostatecznie należy stwierdzić, że na podstawie obserwacji pary wilgotnej i dużych kropeł w przepływie przy obciążeniu około 100 MW nie wyklucza się kondensacji pary nawet przed górną krzywą graniczną ($x=1$). O słuszności tego poglądu świadczą m. in. ostatnie badania autora przeprowadzone przy obciążeniu około 140 MW. W badaniach tych (wyniki będą publikowane oddzielnie) obserwowano parę wilgotną na wlocie do przedostatniego stopnia (punkt 3 na rys. 12).



Rys. 14. Osady na łopatkach wirnikowych ostatniego stopnia części SP turbiny 13K215

Na uwagę zasługuje także występowanie w przepływie dużych kropeł. Wprawdzie w [3] opisano i przedstawiono zdjęcia takich kropeł o średnicach $1 \div 2$ mm, niemniej mechanizm ich powstawania wymaga dokładnego wyjaśnienia. Obserwacje własne nie są dostatecznie jednoznaczne do podjęcia takich prób. Krople wpadające na pryzmat były trudne do odróżnienia od kropeł przemieszczających się z przepływem. Przyszłe prace winny doprowadzić do uzyskania odpowiedniej głębi i perspektywy obserwowanego obrazu. Można jednakże stwierdzić, że duże krople występują w przepływie i na łopatkach kierowniczych. Powstawanie takich kropeł można wyjaśniać mechanizmem kondensacji kropłowej [20] oraz koagulacją kropeł.

7. Wnioski

Z obserwacji przepływu pary przez ostatni stopień turbiny 13K215 wynika kilka ważnych wniosków:

a. Nie ma zgodności pomiędzy teorią homogenicznej kondensacji, opracowaną na podstawie eksperymentów z dyszami naddźwiękowymi, a kondensacją pary w turbinie. Parę wilgotną obserwowano już przy stopniu suchości $x \approx 1$ (a nawet w obszarze pary przegrzanej). Nadmieniam, że wyniki własnych obserwacji w zakresie kondensacji pary mało zawilgoconej są zgodne z wynikami obcymi [14, 15].

b. Na powierzchniach łopatek kierowniczych i w przepływie pary wodnej występują krople o średnicach około $1 \div 4$ mm. Zjawisko to nie jest teoretycznie wyjaśnione.

c. Na powierzchniach łopatek kierowniczych występują słabe efekty separacji wody (przede wszystkim dużych kropeł).

Dotychczasowe badania uzasadniają przypuszczenie, że początek kondensacji pary wodnej w turbinie ma charakter kondensacji heterogenicznej oraz że para wodna kondensuje się na zarodkach heterogenicznych wcześniej aniżeli wynika to z obszaru Wilsona. W procesie tej kondensacji dużą rolę odgrywają niewątpliwie jonowe osadzanie się cząstek oraz wiązania chemiczne.

Obserwacje nie wyjaśniły przyczyny występowania bardzo dużych kropeł w przepływie. Należy przypuszczać, że krople te powstały w wyniku kondensacji kropłowej na chłodniejszych powierzchniach elementów przepływowych. Możliwa jest również koagulacja kropeł w obszarach małej prędkości pary, w których duże krople mogą być kroplami stabilnymi w przepływie (wynika to z kryterialnej liczby Webera). Obserwacje kropeł w przepływie nie potwierdziły przypuszczeń zawartych w [3]. Słabe efekty separacyjne spowodowane są przypuszczalnie stanem powierzchni łopatek (niezwilżalność lub słaba zwilżalność) i składem chemicznym kropeł. Skład ten wpływa na obniżenie napięcia powierzchniowego i wzrost lepkości, które to czynniki mają istotny wpływ na procesy separacji kropeł oraz ich rozpad w przepływie.

Reasumując należy stwierdzić, że analiza kondensacji pary wodnej i separacji wymaga uwzględnienia występujących w parze zanieczyszczeń i składników wprowadzanych do obiegu parowego. Traktowanie pary wodnej jako czystego medium może prowadzić do niedostrzegania wpływu wytrącania się soli w przepływie na sprawność stopni i zagrożenie erozyjno-korozyjne. Niedostrzeganie tego zjawiska oznacza pomijanie przyczyn wpływających na awaryjność stopni pracujących w strefie przejściowej z pary suchej do wilgotnej [20, 21].

Na specjalną uwagę zasługuje też praca turbiny w okresie zrzutu pary do kondensatora. Zrzut powoduje intensywną kondensację pary w następujących warunkach: przy dużej prędkości obrotowej wirnika (nominalnej lub bliskiej nominalnej) oraz przy braku przepływu pary w stopniu (lub przy przepływie z niewielkimi prędkościami). Niewielki przepływ sprzyja przemieszczaniu się kropeł, lecz wyklucza możliwość ich rozpadu pod wpływem sił aerodynamicznych.

Problemy związane z rozruchem turbin, a także zagadnienia erozyjno-korozyjne, nie są jeszcze dostatecznie rozpoznane. Stan ten rzutuje na eksploatację krajowych bloków energetycznych. Sprawa ta wymaga jednak oddzielnego omówienia.

Praca wpłynęła do Redakcji w styczniu 1980 r.

Literatura

- [1] J. Krzyżanowski, J. Święch, T. Król, *Badania struktury pary za ostatnim stopniem turbiny kondensacyjnej*. Prace IMP, z. 57, 1971.
- [2] M. J. Moore, P. Sculpher, *Conditions Producing Erosion in Large Steam Turbines*. Proceedings Inst. Mech. Engrs., Vol. 184, Part 3G (III), 1969 - 70.

- [3] A. Kleitz, *Observations Endoscopiques D'un Etage De Turbine Travaillant En Vapeur Humide A La Centrale De Martiques-Ponteau Electricite De France*, Direction des Etudes et Recherches, J/032/031/29.IX.1972.
- [4] S. Marcinkowski, J. Krzyżanowski, R. Puzyrewski, E. Błażko, *Metoda zapobiegania erozji łopatek turbin parowych (projekt wynalazczy)*. IMP PAN, nr ew. 76/3/77, Gdańsk 1977.
- [5] J. Dudzisz, S. Marcinkowski, *Wyniki pomiarów ciśnień w ostatnim stopniu turbiny 13K215 w warunkach naturalnych (Elektrownia Kozienice)*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr arch. 25/76.
- [6] R. Puzyrewski, S. Marcinkowski, L. Bitel, *Program pomiarów, dokumentacja oprzyrządowania tarczy kierowniczej oraz instrukcja obsługi stoiska do badania efektów odsysania wody z doświadczałnej tarczy kierowniczej*. Oprac. zewn. IMP-PAN, nr arch. 77/74.
- [7] Z. Klimacki, *Układy połączeń parowych i zasadnicze schematy regulacyjne kocioł-turbina z prze-grzewaczem międzystopniowym*. Prace IMP, z. 4, 1961.
- [8] R. Puzyrewski, S. Marcinkowski, *Wyniki badań odsysania filmu wodnego z powierzchni ostatniego stopnia turbin 13K215 bloku nr 8 w Elektrowni Kozienice przy zmiennych obciążeniach*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr arch. 33/77.
- [9] W. W. Kuliczichin, E. I. Sołowjewa, M. A. Trubiłow, *O niektórych przyczynach erozji wychodnych kromok roboczych łopatek posiednich stopieniej parowych turbin*. Tieploenergietika, nr 5, 1978.
- [10] W. P. Łagun, Ł. Ł. Simoju, Ju. W. Machman, Ju. E. Siemienow, A. B. Nachtulin, W. M. Kołokolcew, *Erozija wchodnych kromok roboczych łopatek posiednich stopieniej parowych turbin*. Tieploenergietika, nr 10, 1977.
- [11] G. Gyarmathy, *Grundlagen einer Theorie der Nassdampfturbine*. Juris-Verlag, Zürich 1962.
- [12] M. J. Moore, C. H. Sieverding, *Two-phase Steam Flow in Turbines and Separators-Theory, Instrumentation, Hemisphere*. McGraw-Hill Book Company, 1976.
- [13] T. A. Filipow, O. A. Powarow, W. W. Priachin, *Issledowanija i rasczioty turbin wlażnogo para*. Energija, Moskwa 1973.
- [14] A. Smith, *Wilson Point Experiments in Turbines*. Prace IMP, z. 70 - 72, 1976, p. 327.
- [15] J. S. Wyler, K. J. Dessai, *Moisture Measurements in a Low Pressure Steam Turbine Using a Laser Light Scattering Probe*. Trans. ASME, vol. 100, October, 1978.
- [16] A. Jakubik, *Woda w wysokoprężnych elektrowniach parowych*. WNT, Warszawa 1967.
- [17] M. S. Szkrob, F. G. Prichin, *Wodopodgotowka i wodnyj rieżim paroturbinnych elektrostancij*. Gosenergoizdat, Moskwa 1961.
- [18] W. Trzebiatowski, *Chemia nieorganiczna*. PWN, Warszawa 1977.
- [19] Ju. W. Zienkiewicz, A. N. Astafijew, *K woprosu ispolzowanija wlagoulawliwajuszczich ustrojstw parowych turbin dla wywoda solej iz cikla*. Energiomaszynostrojenije, nr 11, 1959.
- [20] W. P. Isaczenko, *Tieploobmien pri kondensacii*. Energija, Moskwa 1977.
- [21] EPRI's Fossil Plant Performances Reliability Program and Turbine Generator Subprogram. Turbomachinery International, April, 1979.
- [22] H. J. Bonsted, P. H. Effertz, P. Forchhammer, L. Lang, *Zum Problem der Spannungs- und Schwingungsrisikokorrosion an Dampfturbinenschaufeln im Übergangs- und Nassdampfgebiet*. Der Maschinenschaden 51, H. 2, 1978.

Наблюдение течения влажного пара в последней ступени турбины 13K215 с оболочечными направляющими аппаратами

Резюме

В работе представлен способ и результаты наблюдений течения пара в последней ступени части НД турбины 13K215. На основе наблюдений констатируется присутствие влажного пара в ступени так во время пуска турбины из „холодного” состояния, как и во время работы при различных на-

грузках. Таким способом подтверждается первоначальное предположение о возможности эрозии рабочих лопаток во время пуска турбины из холодного состояния. Наблюдаемое увлажнение пара в различных условиях работы турбины позволяет предполагать, что зона конденсации появляется раньше, чем это следует из локализации зоны Вильсона. Ответственность за это состояние приписывается солям и засорениям в паре. Часть этих засорений видна в форме осадков на лопатках турбинных ступеней работающих непосредственно перед зоной влажного пара. Наблюдались также большие (миллиметровые) капли жидкости. Предполагается, что они возникли вследствие капельной конденсации на поверхностях лопаток или также в результате коагуляции. Выражается мнение, что химический состав капель может влиять на недостаточную эффективность сепарации и устранение водяной фазы с поверхности лопаток.

Observation of the Wet Steam Flow in the Final Stage of 13K215 Turbine with Hollow Disks

Summary

The method and results of observation of the wet steam flow in the final stage of L. P. part of 13K215 turbine are presented. The presence of wet steam in the stage during a start-up from the „cold” state as well as during operation under various loads were ascertained based on the observation. This proved that erosion of rotor blades may occur during a start-up from the „cold” state, as was already supposed. The steam moistness observed in various turbine operating conditions leads to the conclusion that the condensation occurs sooner than expected according to the Wilson zone location. It is believed that salts and steam impurities are responsible for this. A part of these impurities can be observed as deposits on blades of turbine stage located directly upstream of the wet steam zone. Also large (millimetre size) liquid droplets were observed. They were formed supposedly in the process of droplet condensation on blade surfaces or due to coagulation. In the author's opinion presented in the paper insufficient efficiency of separation and removal of water phase from blade surfaces may be connected with the chemical composition of droplets.