

## OPRZYRZĄDOWANIE ORAZ METODY EKSPERYMENTALNYCH BADAŃ PRZEPIYU PARY PRZEZ OSTATNIE STOPNIE TURBIN KONDENSACYJNYCH

STANISŁAW MARCINKOWSKI

*IMP PAN Gdańsk*

W pracy przedstawiono w ogólnym zarysie zakres prowadzonych badań oraz opis oprzyrządowania użytego do badań przepływu pary mokrej w ostatnich stopniach turbiny kondensacyjnej dużej mocy. Pokazano również wybrane przykładowe wyniki badań.

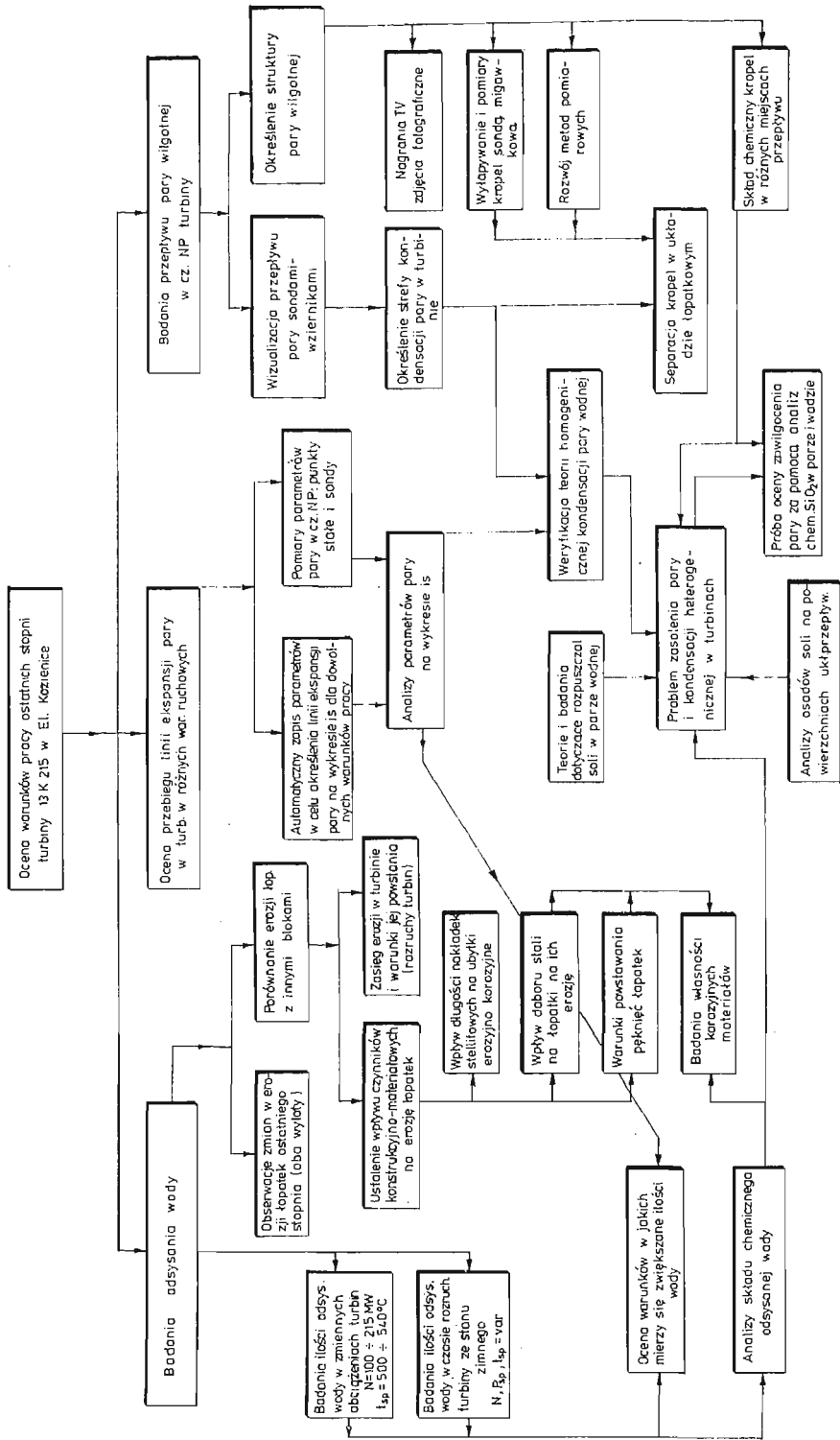
### 1. Wstęp

Badania przepływu pary wilgotnej w ostatnich stopniach prowadzone są na turbinie typu 13K215 zainstalowanej w Elektrowni Koźienice. Turbina ta została wyprodukowana przez ZAMECH-Elbląg i zainstalowana w 1974 r. Turbiny tego typu stanowią zmodernizowaną wersję turbin typu PWK 200 produkcji LMZ (PWK 200, TK 200, 13K200, 13K215). Na rys. 1 pokazany jest schemat obrazujący zakres prowadzonych badań.

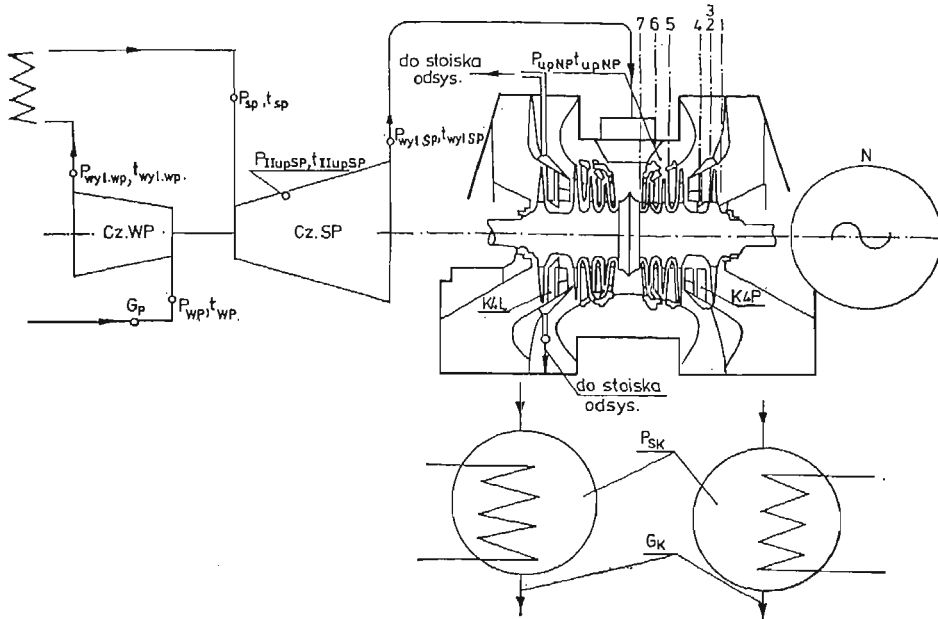
Badania obejmują:

1. Badania efektywności odsysania wody z eksperymentalnych tarcz powłokowych zainstalowanych w 4-tych stopniach cz. NP. oraz ocenę wpływu ich pracy na zmniejszenie erozji łopatek wirnikowych.
2. Zebranie informacji o warunkach pracy bloku w tym:
  - ocenę przebiegu linii ekspansji pary w turbinie (ustalenie parametrów pary w ostatnich stopniach w różnych warunkach ruchowych),
  - badania przepływu przestrzennego w ostatnich stopniach w celu weryfikacji metod obliczeniowych.
3. Badanie przepływu pary wilgotnej w turbinie w tym:
  - określenie strefy kondensacji pary w turbinie,
  - określenie struktury pary wodnej (obserwacje tworzenia się filmów wodnych, kropel),
  - określenie składu chemicznego kropel.

Na rys. 2 podany jest schemat oprzyrządowania pomiarowego zainstalowanego w badanej turbinie do chwili obecnej. Na schemacie cieplnym turbiny zaznaczono rejestrowane automatycznie parametry pary pozwalające na analizę linii ekspansji pary w turbinie,



Rys. 1. Schemat graficzny ujmujący zagadnienia podane w ocenie warunków pracy ostatnich stopni turbiny energetycznej 13K215. Liniami i strzałkami oznaczono zależności między poszczególnymi tematami lub ich wynikanie z określonego tematu



Rys. 2. Schemat ciepłny turbiny z zaznaczonymi punktami pomiaru ciśnień i temperatur pary oraz schemat części NP z zaznaczonym umiejscowieniem stoisk odsysania i badania przepływu pary.

- $p_{WP}, t_{WP}$  — ciśnienie i temperatura pary na wlocie do cz. WP  
 $G_p$  — ilość pary świeżej  
 $p_{wylWP}, t_{wylWP}$  — ciśnienie i temperatura pary na wylocie z cz. WP  
 $p_{SP}, t_{SP}$  — „ „ „ na wlocie do cz. WP  
 $p_{IIupSP}, t_{IIupSP}$  — „ „ „ w II upuście cz. SP  
 $p_{wylSP}, t_{wylSP}$  — „ „ „ na wylocie z cz. SP  
 $p_{upNP}, t_{upNP}$  — w upuście cz. NP (przed 3-cim stopniu z NP)  
 $p_{sk}$  — ciśnienie pary w skraplaczu  
 $G_k$  — ilość kondensatu  
 $N$  — moc turbiny.

oraz podstawowe parametry mówiące o pracy bloku takie jak: moc turbiny ( $N$ ), ilość pary ( $G_p$ ), ilość kondensatu ( $G_k$ ).

Na schemacie części niskoprężnej pokazane jest umiejscowienie sond pomiarowych w przepływie (prawy wylot — od strony generatora) oraz tarczy powłokowej podłączonej do stoiska zewnętrznego odsysania (lewy wylot — od strony części SP). Badania prowadzone są od 1976 r. a zainstalowane oprzyrządowanie montowane było w kolejnych kampaniach remontowych bloku w oparciu o projekty i nadzór ze strony IMP PAN.

Bez gromadzenia wyżej opisanych informacji z badań nie jest możliwa weryfikacja uproszczonych modeli teoretycznych dotyczących zarówno przepływu fazy gazowej jak i fazy ciekłej. Nie byłoby również możliwe zrozumienie tych zjawisk mających tak istotne znaczenie zarówno dla konstrukcji, eksploatacji oraz projektowania układów przepływowych ostatnich stopni turbin parowych dużej mocy.

Jednocześnie złożoność zadania polegającego na badaniach prowadzonych na turbinie będącej w normalnej eksploatacji stanowi o specyfice tego typu badań w odróżnieniu od badań laboratoryjnych na stoiskach modelowych. Złożoność zjawisk zachodzących w przepływie pary przez ostatnie stopnie turbin parowych dużej mocy wymaga gromadzenia

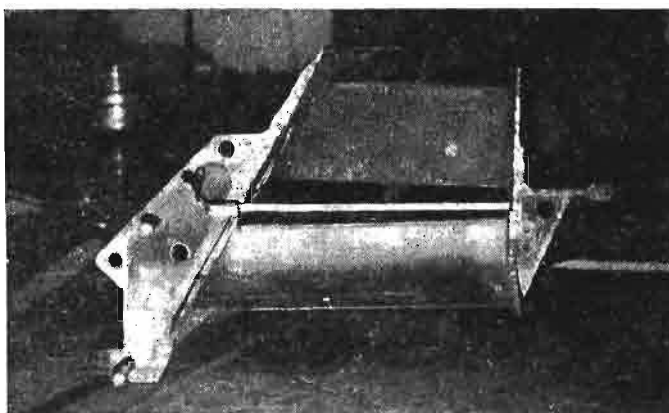
informacji „in situ”. Jest to skomplikowane zadanie, bowiem spełnionych winno być kilka podstawowych elementów stanowiących o powodzeniu prowadzonych badań a mianowicie:

- a) dostosowaniu sond pomiarowych do wymiarów elementów turbiny i kanałów przepływowych,
- b) realne winny być z punktu widzenia konstrukcji turbiny i jej eksploatacji konieczne przeróbki w istniejących maszynach oraz zapewnienie możliwości wykonawczych dla realizacji tych przeróbek,
- c) zapewnienia bezpieczeństwa w czasie badań z uwagi na możliwość spowodowania awarii turbiny przy sondowaniu przepływu pary w pobliżu łopatek wirnikowych,
- d) pomiary powinny być zsynchronizowane z wymogami eksploatacyjnymi bloku energetycznego.

## 2. Opis stoisk pomiarowych

### a) Stoisko do badań efektywności odsysania wody

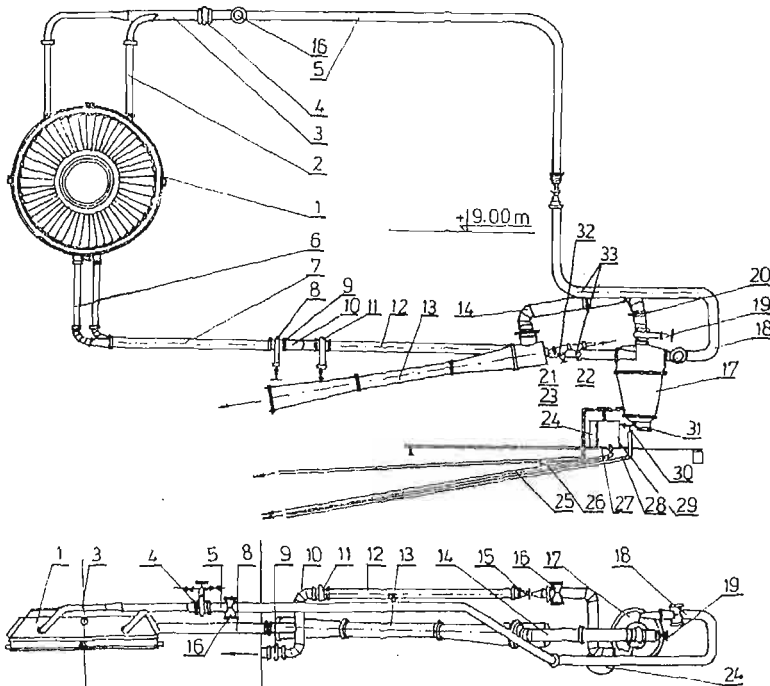
Stoisko do badania efektywności odsysania powstało w 1976 r. W okresie remontu turbiny zostały wyjęte typowe tarcze kierownicze czwartego stopnia cz. NP, a na ich miejsce zamontowano eksperymentalne tarcze powłokowe z odsysaniem. Na prawym wylocie zainstalowano eksperymentalną tarczę kierowniczą przystosowaną do ciągłego odsysania wody (tarcza K4P). Na lewym wylocie zainstalowano eksperymentalną tarczę kierowniczą przystosowaną do odsysania wody (tarcza K4L) — patrz rys. 3. Tarcza ta połączona



Rys. 3. Widok na płaszczyznę podziału tarczy powłokowej z odsysaniem (jedna strona tarczy)

jest rurociągami ze stoiskiem zewnętrznego odsysania. Schemat tej instalacji pokazany jest na rys. 4. Instalacja ta składa się z 5 głównych części:

1. tarczy powłokowej K4L,
2. rurociągów górnego (poz. 5) i rurociągu dolnego (poz. 12),
3. separatora zawilgocenia (poz. 17),
4. zbiornika pomiarowego (poz. 24),
5. układu wspomaganie odsysania wody (smoczek parowy (poz. 13)).



Rys. 4. Stoisko zewnętrznego odsysania. Ważniejsze elementy omówione w tekście

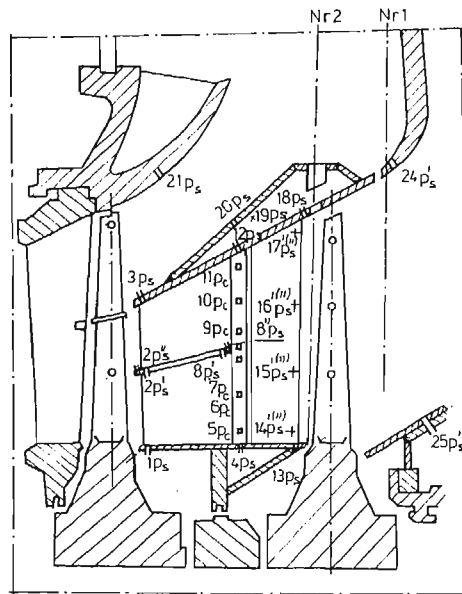
Na rurociągach odsysających zamontowane zostały okna wizerne (poz. 16) umożliwiające obserwację czynnika przepływającego w rurociągach. Tarcze powłokowe oraz stoisko do badania odsysania zostało wykonane przez ZAMECH w oparciu o koncepcję i częściowo dokumentację wykonaną w IMP PAN w oparciu o [1] [2]. Montaż został wykonany przez brygady Elektrowni pod nadzorem Instytutu.

Stoisko zapewnia możliwość pomiaru ilości odessanej wody szczelinami umieszczonymi na powierzchni łopatek kierowniczych w różnych warunkach pracy turbiny. Możliwe jest również pobranie próbek wody do analizy składu chemicznego.

#### b) Stoisko do badań przepływu fazy ciekłej i gazowej w części NP

Stoisko do badań przepływu fazy ciekłej i gazowej wykonywane było w dwóch etapach: badania przepływu pary w ostatnim stopniu cz. NP oraz badań przepływu pary w całej części NP. Do badań przepływu pary w ostatnim stopniu w tarczy kierowniczej K4P zainstalowano na stałe 35 punktów pomiarowych ciśnień statycznych i dynamicznych oraz zainstalowane zostały na stałe w korpusie turbiny dwa gniazda umożliwiające montaż sond pomiarowych (gniazdo Nr. 1,2) — patrz rys. 5.

Do pomiarów rozkładu ciśnień opracowano konstrukcję sond pomiarowych których końcówki pomiarowe pokazane są na rys. 6. W konstrukcji końcówek wzorowano się na końcówkach znanych z opisów w literaturze [3]. Zapewniają one możliwość ustalenia kierunku napływu pary (kąta  $\alpha$ ) oraz określenie wielkości ciśnienia statycznego lub dynamicznego (lub 4 ciśnień dynamicznych na różnych kierunkach merydionalnych przepływu—



Rys. 5. Schemat umieszczenia punktów pomiarowych ciśnienia statycznych i dynamicznych w obrębie tarczy K4P (na rys. nie pokazano punktów pomiarowych umieszczonych w innych przekrojach na wylocie z turbiny)

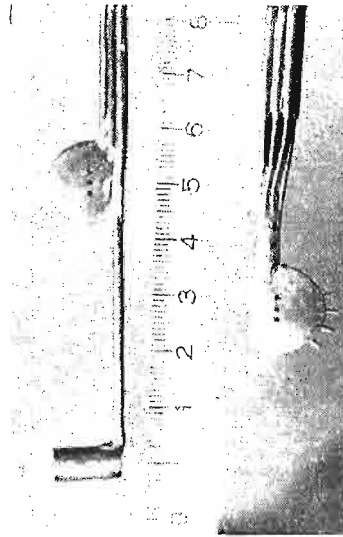
1, 2, ... 25 — Numery punktów pomiarowych;  $p_s$  — ciśnienie statyczne;  $p_c$  — ciśnienie całkowite; ' (') ciśnienia mierzone po obu stronach przepływu np. w palisadzie kierowniczej na stronie wypukłej i wklęsłej profilu

co umożliwi określenie kierunku przestrzennego wektora prędkości napływu pary, patrz rys. 6 końcówka prawa). Przeprowadzono miniaturyzację końcówek, dostosowując je do możliwości pomiarów parametrów pary w szczelinie międzywieńcowej ostatniego stopnia.

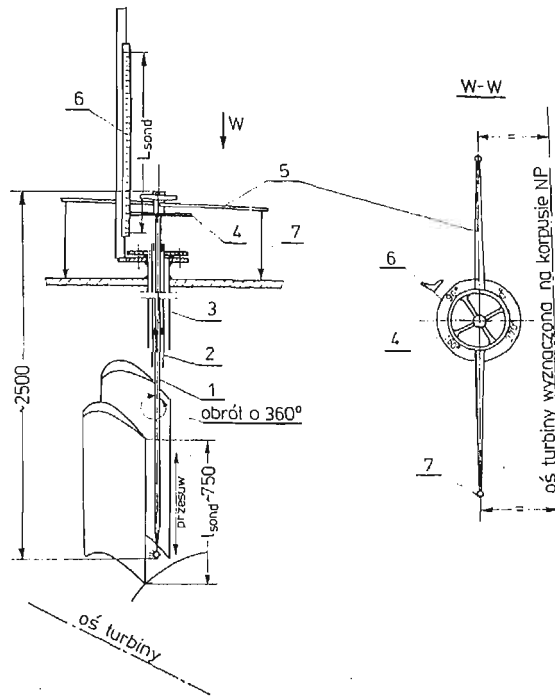
Dla uniknięcia błędów w pomiarach ciśnień w obszarze pary mokrej opracowano metodę modyfikacji powierzchni sondy i przewodów pomiarowych dla wyeliminowania wpływu korków wodnych na wielkość mierzonych ciśnień (polerowanie wewnątrz rurek oraz pokrycie powierzchni teflonem lub innymi substancjami hydrofobowymi oraz stosowanie przedmuchu sond przed każdym pomiarem) [4].

Opracowane w IMP PAN sondy można instalować w zamontowane na turbinie gniazda zarówno przy postoju turbiny jak i w czasie pracy turbiny bez zakłóceń w ich pracy. Opracowana konstrukcja sond umożliwi włożenie sondy bez uszkodzenia końcówek pomiarowych oraz ustalenie położenia końcówki pomiarowej wewnątrz turbiny w stosunku do kanału łopatkowego z dokładnością do kilku milimetrów. Dokładność taka wymagana jest w badaniach przepływu przestrzennego oraz ze względów bezpieczeństwa (możliwość kolizji z wirującymi łopatkami). Schemat ustalenia położenia końcówki pomiarowej sondy wewnątrz turbiny pokazano na rys. 7. Oprzyrządowanie pokazane na rys. 7 pozwala na określenie położenia sondy w czasie pomiarów w zakresie ustalenia:

a) kierunku na jaki ustawiona jest końcówka pomiarowa sondy  $\alpha$  (dokładność  $+ \sim \pm 0,5^\circ$ ),



Rys. 6. Końcówki pomiarowe ciśnień używane w sondach



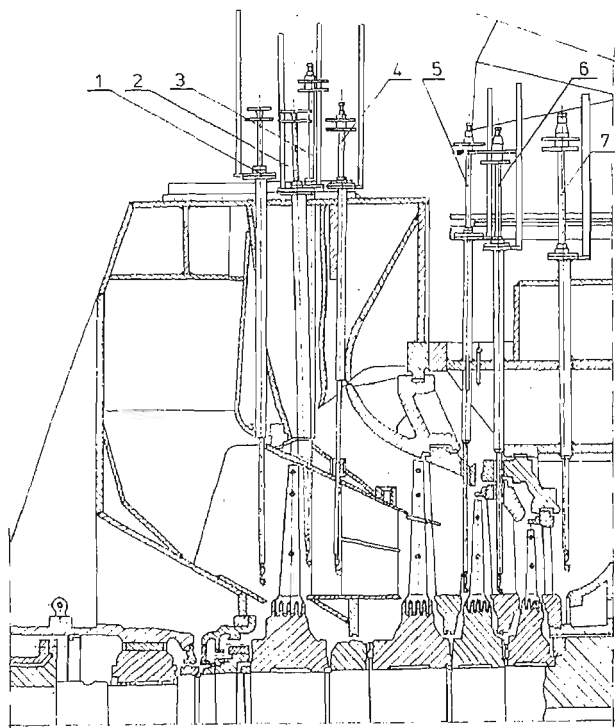
Rys. 7. Schemat ustalenia położenia końcówki pomiarowej sondy wewnątrz turbiny

1 — trzon sondy z końcówką pomiarową; 2 — Pochwa sondy wraz z łożyskami prowadzącymi zabezpieczająca sondę w czasie wkładania do turbiny przed uszkodzeniem; 3 — gniazdo prowadzące sondy wstawiane na stałe w korpus 4 — tarcza kontomierza (pomiar kąta  $\alpha$  wektora prędkości pary oraz wysokości sondowania ( $l_{\text{sond}}$ )); 5 — pręty do ustalenia kierunku końcówki pomiaru ciśnienia w stosunku do osi turbiny (osiowanie sondy przed pomiarami); 6 — listwa z podziałką do wskazań kąta obrotu sondy ( $\alpha$ ) i wysokości sondowania. Skala ustala położenie końcówki sondy w stosunku do palisady kierowniczej; 7 — piony do ustalenia odczylenia prętów ustalających położenie końcówki sondy w stosunku do osi turbiny

b) wysokość sondowania w stosunku do elementów kanału palisady kierowniczej (dokładność  $\sim \pm 2$  mm).

Położenie osi sondy ustalone jest w czasie wstawiania gniazd w korpus turbiny co wymaga kontroli wewnątrz zamkniętej turbiny (zdemontowane zbędne tarcze kierownicze i wirnik).

Do badań przepływu pary w całej części NP zainstalowano w turbinie 7 gniazd sond pomiarowych, których umiejscowienie w turbinie pokazane jest na rys. 8. Do chwili



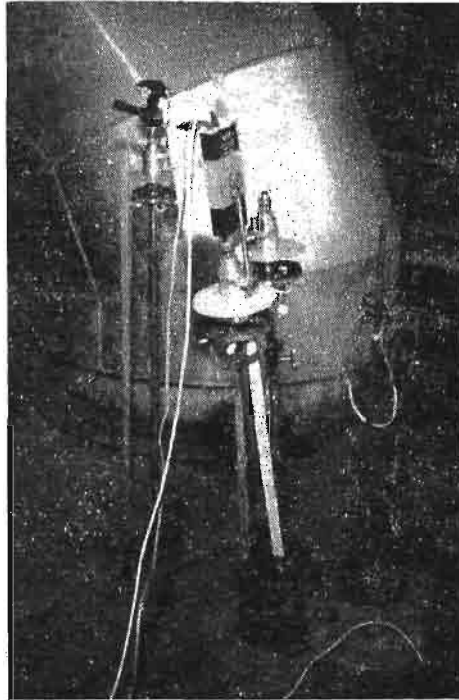
Rys. 8. Rozmieszczenie w turbinie sond pomiarowych (na części przepływowej prawego wylotu, patrz rys. 2)

obecnej wykorzystywane było sześć gniazd (jedno (7) zainstalowano w ostatnim remoncie turbiny), z tego gniazda (1) i (2) w badaniach przepływu przestrzennego w ostatnim stopniu, natomiast gniazda (3÷6) w badaniach wizualizacyjnych przepływu pary mokrej w turbinie.

Badania wizualizacyjne prowadzono opracowanymi we własnym zakresie sondami wziernikami. Badania te miały na celu lokalizację strefy kondensacji pary wodnej w turbinie oraz obserwację dużych kropeł i filmów wodnych, zjawisk związanych z separacją wody itp. Na rys. 9. pokazane są zamontowane 3 sondy wzierniki w turbinie. Sondy te wyposażone są w: przystawkę do mikrofotografii, kamerę tv, lunetkę obserwacyjną.

Układ optyczny sondy zapewnia obserwację przepływu w zakresie od  $0 \div \infty$  (w praktyce z uwagi na oświetlenie do  $\sim 250$  mm), przy czym pole obserwacji ma wymiary w pobliżu



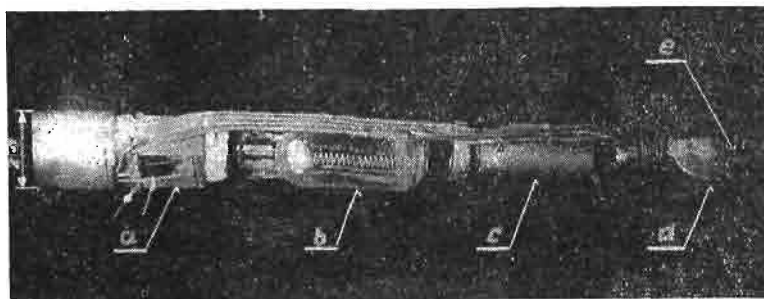


Rys. 9. Widok na górną część korpusu cz. NP od strony generatora z zamontowanymi 3 sondami wznikiem oraz sondą-oświetlaczem. Sondy wyposażone są w: przystawkę do mikrofotografii, kamerę tv, lunetkę obserwacyjną

pryzmatu sondy ( $16 \times 16 \text{ mm}^2$ ) i ( $40 \times 40 \text{ mm}^2$ ) w odległości  $\sim 200 \text{ mm}$  od powierzchni pryzmatu. Każda sonda ma własne oświetlenie żarówką halogenową. W czasie pomiarów wykonywane były zdjęcia fotograficzne oraz nagrywano obserwowane obrazy na taśmę magnetowidową. Na rys. 10 pokazana jest końcówka uniwersalnej sondy pomiarowej opracowana ostatnio do badań przepływu pary wilgotnej. Sonda ta wyposażona jest w: układ optyczny do obserwacji przepływu fazy ciekłej, sondę migawkową do określenia wielkości kropeł ( $d_k > 10 \mu\text{m}$ ) oraz wielkości grubokropelkowego zawilgocenia pary, końcówkę do określenia rozkładu ciśnień statycznych i dynamicznych oraz kierunku wektora prędkości (przestrzennego), wymienną z sondą migawkową przystawkę separatora do wyłapywania kropeł wody i określenia ich składu chemicznego (do poboru próbek wody) oraz termopary do określenia temperatury czynnika. Sonda przystosowana jest do zamontowania innych przystawek specjalnych, które zapewnią badania innych wielkości związanych z przepływem pary wilgotnej. Sondy tego typu zapewnią możliwość kompleksowych badań przepływu pary wilgotnej w cz. NP.

**c) Automatyczna rejestracja wytypowanych parametrów pary i podstawowych parametrów ruchowych turbiny**

W celu określenia warunków pracy turbiny i parametrów pary w ostatnich stopniach turbiny w czasie badań automatycznie rejestrowane są wytypowane parametry pary



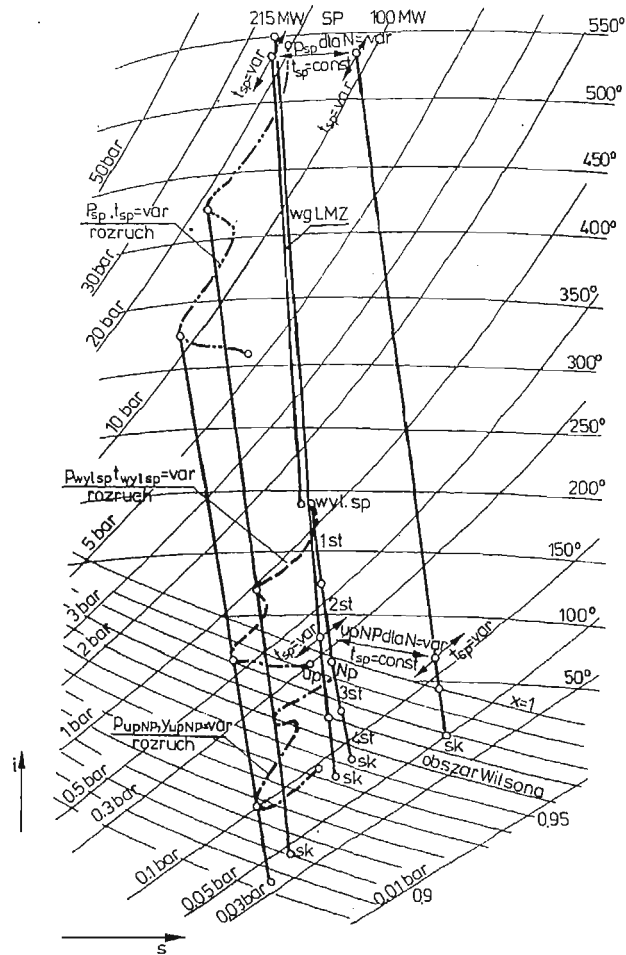
Rys. 10. Końcówka pomiarowa uniwersalnej sondy pomiarowej do badań przepływu pary wilgotnej *a* — pryzmat układu optycznego sondy (strzałkami oznaczono wycieraczkę oraz pręciak wskaźnikowy  $\varnothing 0,6$  odległy od pryzmatu  $\sigma \sim 5$  mm), *b* — żarówka halogenowa HFAA 225V, 1000W, *c* — sonda migawkowa do wyłapywania kropeł wody na płytce pokrytą miękkim podkładem (pomiar wielkości dużych kropeł  $d > 10 \mu\text{m}$ , określenie zawilgocenia grubokropłowego pary) *d* — końcówka sondy do pomiarów ciśnień statycznych oraz kierunku napływu pary ( $\alpha$ ), 4 ciśnień dynamicznych i kierunku wznosu wektora prędkości, *e* — termopary do pomiaru temperatury pary

pozwalające na określenie linii ekspansji pary w turbinie w dowolnych warunkach ruchowych oraz moc turbiny ( $N$ ) ilość pary ( $G_p$ ) ilość kondensatu ( $G_k$ ). Schemat cieplny bloku z zaznaczeniem mierzonych parametrów podany został na rys. 2. Dla zwiększenia pewności i dokładności pomiarów w części NP ciśnienie i temperatura pary w upuście były okresowo mierzone manometrem rtęciowym oraz termometrem. W czasie ostatniego remontu turbiny zainstalowano dodatkowe gniazdo sondy (7) do ustalenia parametrów pary na wlocie do cz. NP. (dotychczasowe wyposażenie bloku nie posiadało punktów pomiarowych w cz. NP w obszarze pary przegrzanej pozwalających na sprawdzenie położenia linii ekspansji w pierwszych stopniach cz. NP, zamontowane punkty pomiarowe w ostatnim stopniu leżą w obszarze pary wilgotnej). W związku z dużymi różnicami parametrów pary w okresie rozruchu turbiny w stosunku do normalnych warunków ruchowych dokonano analizy dotychczasowych mierników ruchowych zainstalowanych na bloku, część mierników wymieniono na mano-wakumetry, zmieniono zakresy pomiarowe i klasę przyrządów, zastosowano przekaźniki elektryczne do automatycznego zapisu wskazań. Użyte przyrządy przecechowano.

### 3. Przykłady uzyskanych wyników badań

#### a) Przebiegi linii ekspansji pary wodnej w cz. SP-NP

Na rys. 11 pokazane są linie ekspansji pary w cz. SP-NP w różnych warunkach ruchowych turbiny. Z wykresu widać, że w okresie rozruchowym turbiny ze stanu zimnego pokazanych liniami ( $p, t = \text{var}$ ) silnym zmianom ulegają ciśnienia i temperatury pary powodując silne zmiany zawilgocenia końcowego pary ( $y$ ). Przy pokazanych na wykresie zmianach parametrów pary w początkowym okresie rozruchu możliwe było powstanie zawilgocenia pary już na wlocie do cz. NP ( $p_{\text{wyl. SP}}, t_{\text{wyl. SP}}$ ). W okresie pracy turbiny w zmienionych obciążeniach w zakresie 100 ÷ 215 MW temperatury pary w cz. SP-NP były prawie stałe, przy zmiennym w pewnym zakresie ciśnieniu pary (zależnym od mocy turbiny). W tym okresie mierzone parametry pary przegrzanej w cz. SP-NP występowały do 3-go



Rys. 11. Wykres is z liniami ekspansji pary w cz. SP i NP badanej turbiny

Linia wg LMZ — zmiany parametrów w cz. SP, NP wg obliczeń LMZ (zaznaczono parametry w poszczególnych stopniach cz. NP),

$P_{SP}$  dla  $N = var$  — zmiany ciśnienia pary na wlocie do cz. SP spowodowane zmianami mocy turbiny

$t_{SP} = var$  zmiany temperatury przegrzewu pary na wlocie do cz. SP spowodowane zmianą ilości lub kaloryczności spalonego w kotle węgla

$P_{SP}, t_{SP} = var$  zmiany parametrów pary w okresie rozruchu turbiny ze stanu zimnego na wlocie do cz. SP

$P_{wylSP}, t_{wylSP} = var$  zmiany parametrów pary w okresie rozruchu turbiny ze stanu zimnego na wylocie z cz. SP

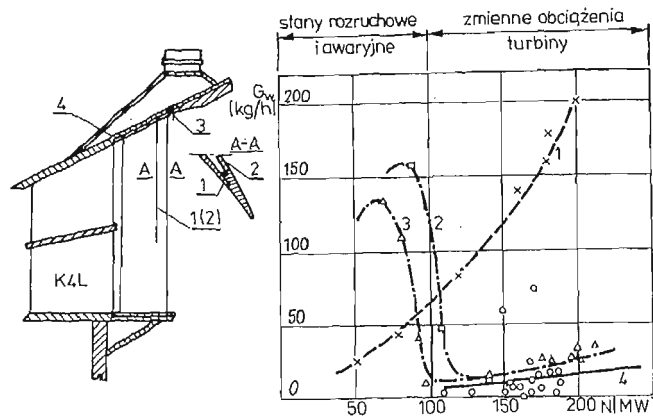
$P_{upNP}, t_{upNP} = var$  zmiana ciśnienia i zawilgocenia pary w upuście cz. NP (wlot do 3-go stopnia) w okresie rozruchu turbiny ze stanu zimnego

SP ciśnienie w skraplaczu — zawilgocenie końcowe pary wg wykresu

stopnia cz. NP przy  $N \sim 215$  MW i do 4-go stopnia cz. NP przez  $N \sim 100$  MW. Wykres podaje tendencję zmian parametrów pary zależnie od zmian mocy turbiny  $N = var$  lub temperatury przegrzewu pary  $t_{SP} = var$ .

### b) Ilości odsysanej wody w różnych warunkach ruchowych turbiny

Na rys. 12 pokazane są wyniki pomiarów ilości odsysanej wody w różnych warunkach ruchowych turbiny (patrz rys. 11) przy różnej ilości szczelin odsysających użytych w bada-



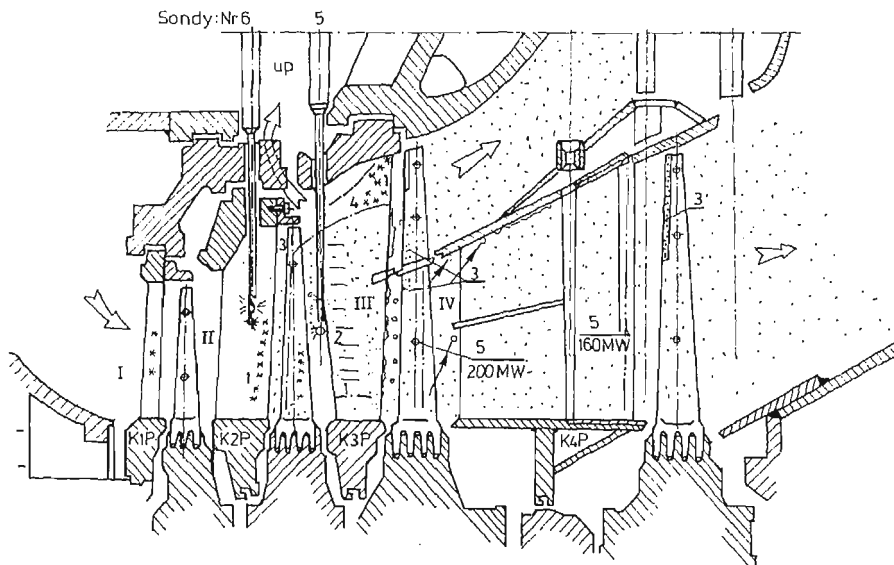
Rys. 12. Ilości odsysanej wody w różnych warunkach pracy turbiny oraz położenie szczelin odsysających

krzywa 1 — x — x — badania w 1977 odsysanie ze wspomaganiami szczelinami (1), (2), (3), (4) przy zanizonej  $t_{SP}$  do  $\sim 500^{\circ}\text{C}$

krzywa 2 — · — · — □ — □ — badania w 1980 r odsysanie szczelinami (1), (2) w okresie rozruchu turbin

krzywa 3 — — △ — — △ — — badania w 1981 r odsysania szczelinami (1), (2) w okresie rozruchowym i zmiennych obciążeniach turbin  $P_{WP}$ ,  $t_{WP}$  nominalne

krzywa — o — o — o — — badania w zmiennych obciążeniach turbiny (przy  $t_{SP} = 540 \div 500^{\circ}\text{C}$ ),



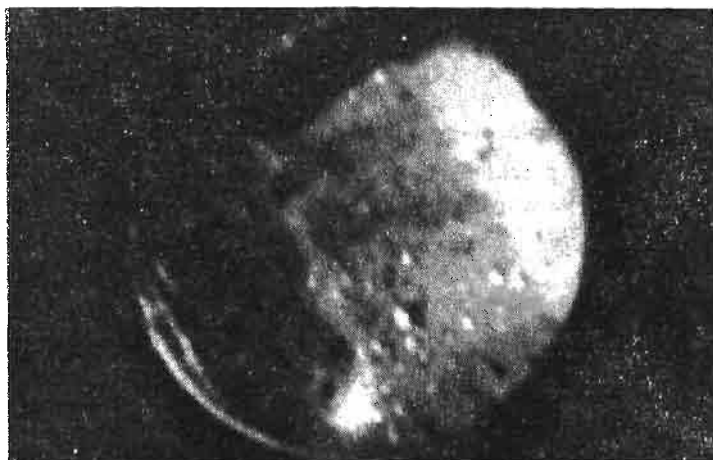
Rys. 13. Położenie obszaru kondensacji pary wodnej w turbinie oraz schemat rozmieszczenia sond w turbinie w czasie badań.

1. miejsca występowania uwodnionych soli na powierzchni układu przepływowego; 2. ślady strug wodnych na powierzchni łopatek — wynite osady w kształcie strug; 3. — erozja łopatek wirnikowych; 4. obszar początku kondensacji pary wodnej wg obserwacji sondami w turbinie dla mocy  $N = 215 \div 100 \text{ MW}$ ; 5. obliczone położenie początku kondensacji pary wodnej wg [4] I ÷ IV stopnie turbinowe; K1P, K2P, K3P, K4P tarcze kierownicze stopni 1, 2, 3, 4 w prawym wylocie cz. NP (patrz rys. 2)

niach. Maksymalne ilości odsysanej wody mierzono przy czynnej szczelinie odsysającej (4) patrz rys. 12 oraz w okresie rozruchowym turbiny, przewyższały ono około dziesięciokrotnie ilości wody odsysanej szczelinami z powierzchni łopatek kierowniczych ostatniego stopnia w warunkach normalnej pracy turbiny.

c) **Wyniki badań wizualizacyjnych przepływu fazy ciekłej**

W wyniku badań wizualizacyjnych ustalono położenie obszaru kondensacji pary wodnej w cz. NP turbiny, patrz rys. 13. Przy pracy turbiny dla  $N = 100 \div 215$  MW kondensacja pary wodnej zachodzi przed wlotem do 3-go stopnia cz. NP, przypuszczalnie w wirniku 2-go stopnia cz. NP, przy czym w wierzchołkowej partii przepływu w 3-cim



Rys. 14. Zdjęcie zamglenia pary oraz kropeł wody utworzonych lub osiadłych na powierzchni pryzmatu sondy na wlocie do 3-go stopnia cz. NP (gniazdo Nr 5 ma rys. 5)



Rys. 15. Zdjęcie mikroskopowe kropeł wylapywanych sondą migawkową (patrz rys. 8) na płytce pokrytą kauczukiem silikonowym. Krople zostały wylapane w rejonie początku kondensacji pary patrz. położenie sondy rys. 13

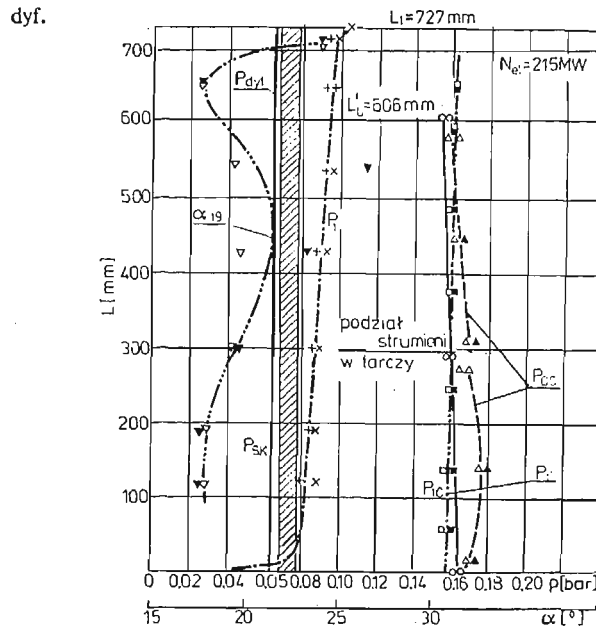
stopniu zasilającym upust cz. NP nie zaobserwowano fazy ciekłej. Na rysunku pokazano również obliczeniowe położenie strefy kondensacji wg [5] [6] dla mocy 200 MW i 160 MW (5). Badania potwierdziły położenie strefy kondensacji pary w turbinie w rejonie wydzielania z pary soli przewidywane uprzednio w [7] i stanowią przykład konieczności weryfikacji teorii „in refum nature”.

Przykładowe wyniki obserwacji pokazane są na fotografii rys. 14, gdzie pokazano obserwowany obszar pary wilgotnej na wlocie do 3-go stopnia poniżej średnicy podziałowej stopnia (patrz. położenie sondy (5) na rys. 13).

Na zdjęciu widoczne jest zamglenie pryzmatu oraz krople osiadłe na powierzchni pryzmatu (największa kropla ma  $\sim \varnothing 1$  mm). Podobnej wielkości krople zmierzono w tej strefie sondą migawkową. Pokazane na rys. 15 zdjęcie mikroskopowe płytki pokrytej miękkim podkładem (polastosilem M56) z widocznymi licznymi kroplami wody złapanymi w turbinie (położenie sondy Nr 5 jak na rys. 13).

#### d. Przykładowe wyniki pomiarów rozkładu ciśnień w ostatnim stopniu cz. NP

Na rys. 16 pokazane są przykładowe wyniki pomiarów [8] wykonanych przy obciążeniu turbiny  $N = 215$  MW w ostatnim stopniu cz. NP turbiny na tarczy K4P (patrz schemat rys. 5).



Rys. 16. Rozkłady ciśnień oraz kąta wypływu z palisady kierowniczej tarczy K4P, dla  $N = 215$  MW

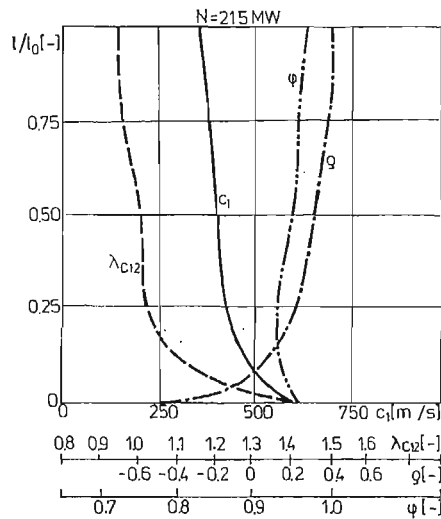
- $\frac{\circ}{\circ}$  — ciśnienie statyczne na wlocie do palisady kierowniczej —  $p_0$
- $\frac{\Delta}{\Delta}$  — ciśnienie dynamiczne na wlocie do palisady kierowniczej —  $p_{0c}$
- $\frac{\pm}{x}$  — ciśnienie statyczne na wylocie z palisady kierowniczej (zmierzone sondą oraz punkty stałe na średnicach zewn. i wewnętrznych przepływu) —  $p_1$
- $\frac{\square}{\square}$  — ciśnienie dynamiczne na wylocie z palisady kierowniczej (zmierzone sondą) —  $p_{1c}$
- — — — — obszar ciśnień statycznych mierzonych w dyfuzorze wylotowym za tarczą K4P —  $p_{dyf}$
- — — — — ciśnienie w skraplaczu —  $p_{sk}$
- $\nabla$  — — — — — kąta wypływu pary w płaszczyźnie poziomej —  $\alpha_{19}$

Podane są mierzone rozkłady ciśnień w punktach stałych:

- ciśnienie statycznych na wlocie do palisady kierowniczej ( $P_0$ )
- dynamiczne „ „ ( $P_{0c}$ )
- ciśnienie w dyfuzorze wylotowym za stopniem ( $P_{dyt}$ )
- ciśnienie w skraplaczu ( $P_{sk}$ )

Podane są również rozkłady ciśnień w szczelinie międzywieńcowej zmierzone sondą Nr. 2:

- ciśnienia statycznego ( $P_1$ )
- ciśnienia dynamicznego ( $P_{1c}$ )
- kąta wektora prędkości w płaszczyźnie poziomej ( $\alpha_{1\vartheta}$ )



Rys. 17. Obliczone dla podanego na rys. 16 przykładu rozkłady:

- $c_1$  — prędkość pary na wylocie z palisady kierowniczej;
- $\lambda_{c12}$  — liczby Laval'a na wylocie z kierownicy;
- $\varphi$  — współczynnik strat przepływu w palisadzie kierowniczej;
- $\rho$  — reakcyjności stopnia

Na rys. 17 pokazane są przykładowe wyniki obliczeń prędkości pary ( $c_1$ ) liczby Laval'a na wylocie z kierownicy ( $\lambda_{c12}$ ) reakcyjności stopnia ( $\rho$ ), współczynnika strat przepływowych ( $\varphi$ ) dla pokazanych na rys. 16 warunków.

#### Literatura

1. PUZYREWSKI R., *Założenia do projektu stoiska do badań efektywności odsysania wody z kierownicy ostatniego stopnia turbiny TK 200*. Opracowanie IMP PAN Um. 28/69 — III/1, 1969 r.
2. PUZYREWSKI R., MARCINKOWSKI S., *Projektowanie i wymiarów szczelin odsysających na powłokowych łopatkach kierowniczych w turbinie PWK-200*. Opracowanie IMP PAN ER-67-3/11, 1969 r.
3. ЛАГУН В. П., СИМОЮ Л. Л., *Комбинированный зонд схема и методика измерения параметров потока в ступенях низкого давления паровых турбин*. Теплоэнергетика Нр. 6, 1966 г.

4. MARCINKOWSKI, *Metoda zapobiegania błędom pomiaru ciśnien spowodowanym występowaniem korków cieczy w trakcie pomiarowym.* Wniosek racjonalizatorski Nr. 75/2/77.
5. DUDZISZ J., KRZYŻANOWSKI J., KRUPA A., MARCINKOWSKI St., WEIGLE B., *Untersuchung des Teillastverhaltens einer Dampfturbine großer Leistung.* Energietechnik H 4, 1978.
6. KRZYŻANOWSKI J., *Wajukonis K Comments on Steam Condensation in Turbines.* Particulate Laden Flows in Turbomachinery ASME 1982 AJAA ASME Joint Fluids, Plasma Thermophysics and Heat Transfer Conference St. Louis Missouri June 1982.
7. MARCINKOWSKI S., *Obserwacje przepływu pary mokrej w ostatnim stopniu turbiny 13K215 z tarczami powłokowymi.* Prace IMP z 82, 1982 (Oprac. IMP PAN nr 53/79 1979 r.).
8. DUDZISZ J., MARCINKOWSKI S., *Wyniki pomiarów ciśnien w ostatnim stopniu turbiny 13K-215 w warunkach naturalnych (Elektr. Kozienice).* Oprac. IMP PAN Nr. 25/76, 1976.

## Р е з ю м е

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ТЕЧЕНИЯ ПАРА В ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЯХ КОНДЕНСАЦИОННЫХ  
ТУРБИН

В работе представлены схемы систем измерений установленных на турбине 13K215 в Электростанции Козенице для исследования течения влажного пара в последних ступенях турбины.

Представлены описания:

Установки для исследования эффективности отсоса воды из полых направляющих диафрагм последней ступени.

Экспериментальные направляющие диафрагмы имеют отсасывающие зазоры на поверхности. Одна из двух диафрагм подсоединена к наружной установке позволяющей измерить количество отсасываемой воды.

- Установка для исследования течения жидкой и газовой фаз в цилиндре НД. Эта установка состоит из оборудованной для измерений направляющей диафрагмы (35 точек измерений статического и полного давлений) а также замонтированных в корпусе турбины семь гнезд зондов, обеспечивающих возможность вставления и измерения, наблюдения либо исследования течения влажного пара в целом цилиндре НД.

Описаны зонды использованные для исследования течения пара: зонды для измерения распределений давлений, зонды для наблюдений (фотографирование, магнетотелевизионная запись), универсальный зонд (распределение давлений, наблюдение и тд., измерения размеров капель и определение их химического состава, измерения температур).

- Аппаратуры автоматического регистрирования параметров пара и эксплуатационных параметров турбины, дающих возможность проведения анализов линии экспансии в турбине.

Приведены примерные результаты измерений:

- линии экспансии пара в разных условиях эксплуатации турбины;
- количества отсасываемой воды с полых направляющей диафрагмы последней ступени;
- результаты наблюдательных исследований, в том: определение зоны конденсации пара в турбине, фотографирование капель в зоне начала конденсации, а также выхватываемых в этой зоне с помощью зонда с затвором;
- результаты исследования течения пара в последней ступени турбины.

## S u m m a r y

INSTRUMENTATION AND METHODS OF INVESTIGATION OF STEAM FLOW THROUGH  
THE LOST STAGES OF L P TURBINES

The schemes of measurement systems have been presented on 13 K 215 turbine performed at the power plant Kozienice for the investigations of the wet-steam flow through the last turbine stages. By means of the stands and probes mounted on the turbine the following investigations have been performed:



— Effectiveness of water extraction from hollow stator blades of the last stage. The experimental blades have suction slots enabling to extract water just flowing on the blade surface. One of the two last stage stator diaphragms in the double exhaust LP turbine was connected with a tank to measure the amount of extracted water.

— The last stage diaphragm with 35 measuring points of static and total pressure and with 7 movable probes enables to measure and observe the wet steam flow in the whole LP turbine.

The probes are of several types, namely: probes for measuring pressure distribution, periscope probes for observations (photograph and TV recording), universal probes (pressure and temperature distribution measurements, observations, droplet size measurements and their chemical composition).

— Automatic recording of some selected steam parameters and turbine operation conditions enabling to analyse the expansion line in the turbine.

Some experimental results have been presented:

— the steam expansion line for different turbine operation conditions;

— the amount of water removed from the hollow stator blade of the last stage;

— observation results (localization of the condensation zone, photographs of the drops in this zone and captured on sampling slides with an appropriate probe equipment);

— steam flow investigations in the last stage.

*Praca została złożona w Redakcji dnia 18 kwietnia 1985 roku*

---