

Tadeusz CHMIELNIAK

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechnika Śląska, Gliwice

KIERUNKI BADAŃ W ZAKRESIE TEORII I KONSTRUKCJI CIEPLNYCH MASZYN PRZEPLYWOWYCH

Streszczenie. W artykule omówiono zasadnicze kierunki badań własnych w zakresie podstawowych problemów teorii i konstrukcji cieplnych maszyn przepływowych. Przedstawiono ogólną charakterystykę i dyskusję rezultatów badawczych uzyskanych w latach 1990–1996. Podano także opis i potencjalne możliwości zbudowanych w tym okresie instalacji badawczych.

DIRECTIONS OF SCIENTIFIC RESEARCH IN THE FIELD OF THEORY AND CONSTRUCTION OF THERMAL FLOW MACHINES

Summary. In this paper the principal directions of the investigations in the field of fundamental problems of theory and constructions of thermal flow machines were discussed. An overall characteristic and the discussion of investigation's results obtained in 1990–1996 years were given. The description and possible potentials of the test stands have been also described.

HAUPTRICHTUNGEN DER FORSCHUNG IM BEREICH DER THEORIE UND KONSTRUKTION THERMISCHEN STRÖMUNGSMASCHINEN

Zusammenfassung. In diesen Aufsatz wurden prinzipielle Richtungen der eigenen wissenschaftlichen Untersuchungen auf dem Gebiet der Grundlagen der Theorie und Konstruktion von thermischen Strömungsmaschinen besprochen. Es wurde eine allgemeine Darstellung von Forschungsergebnisse vorgertellt, die in 1990–1996 Jahren gesammelt worden sind. Die Beschreibung und eine potentielle Möglichkeiten von Prüfstände in o.g. Thematik ist gegeben.

1. Wprowadzenie

W ostatnim okresie w Zakładzie Ciepłych Maszyn Przepływowych rozwiązywano zadania dotyczące:

- analizy i syntezy przepływów dla geometrii ciepłych maszyn przepływowych,
- projektowania i konstrukcji wysokosprawnych wieńców sprężających (głównie wentylatorów),
- przepływów wieloskładnikowych i erozji pyłowej,
- sterowania procesami ciepło-przepływowymi w maszynach przepływowych,
- eksploatacji urządzeń energetycznych,
- modernizacji i rekonstrukcji turbin ciepłych, sprężarek i wentylatorów,
- nowych technologii energetycznych.

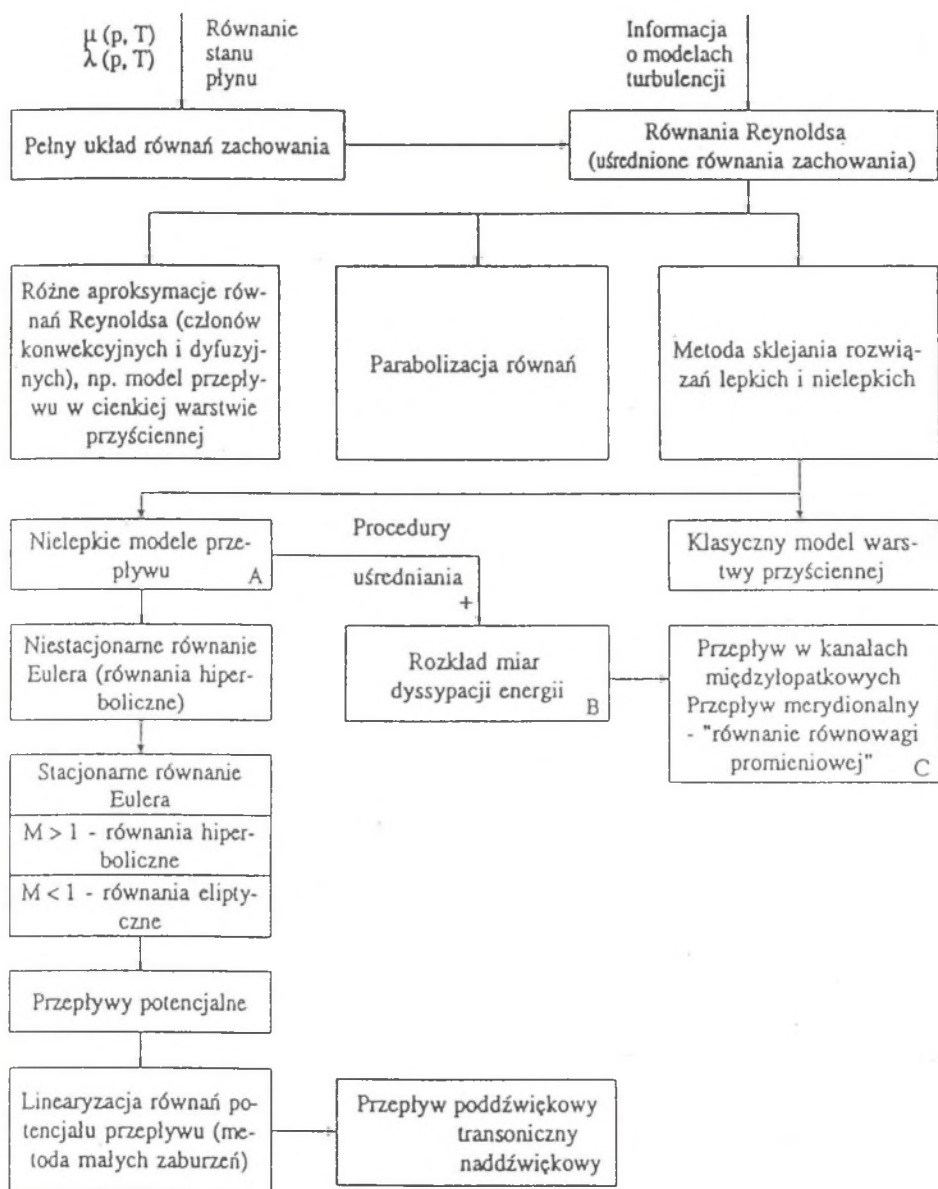
Obszary działalności pedagogicznej były następujące:

- wykłady, seminaria, ćwiczenia i laboratoria, prace konstrukcyjne z ciepłych maszyn przepływowych (turbiny ciepłe, sprężarki, wentylatory) dla studentów specjalności maszyny i urządzenia energetyczne oraz systemy ciepłe (studia dzienne i zaoczne),
- seminaria dyplomowe i prowadzenie dyplomów dla kierunku dyplomowania; ciepłe maszyny przepływowe (studia dzienne),
- wykłady z siłowni ciepłych dla studentów specjalności maszyny i urządzenia energetyczne oraz systemy ciepłe (studia dzienne),
- wykłady, ćwiczenia, laboratoria z wentylatorów dla studentów kierunku: górnictwa i inżynierii środowiska (studia dzienne i zaoczne),
- wykłady, laboratoria z wybranych zagadnień eksploatacji i diagnostyki maszyn i urządzeń energetycznych (studia podyplomowe).

W roku akademickim 1994/1995 uruchomiono nowe specjalności: maszyny przepływowe i napędy strumieniowe (budowa i eksploatacja maszyn), czyste technologie energetyczne (inżynieria środowiska). W ich ramach Zakład prowadzi wykłady i ćwiczenia z: teorii maszyn przepływowych, dynamiki gazów, nowych technologii energetycznych.

W latach 1991–1996 w Zakładzie uruchomiono wiele nowych instalacji badawczych, w tym między innymi:

- tunel parowy do badań palisad łopatkowych i innych urządzeń przepływowych,
- system pomiarowy przestrzennego turbulenta przepływu w wieńcach maszyn wirnikowych oparty na metodach termooanemometrii i anemometrii laserowej.



Rys. 1. Modelowanie przepływów w maszynach wirnikowych

Fig. 1. Modelling of flows in the rotating machines

2. Analiza i synteza przepływów dla geometrii cieplnych maszyn przepływowych

2.1. Modele przepływu

Przepływy w wirnikowych maszynach ekspansyjnych lub sprężających należą głównie do rodziny przepływów wewnętrznych.

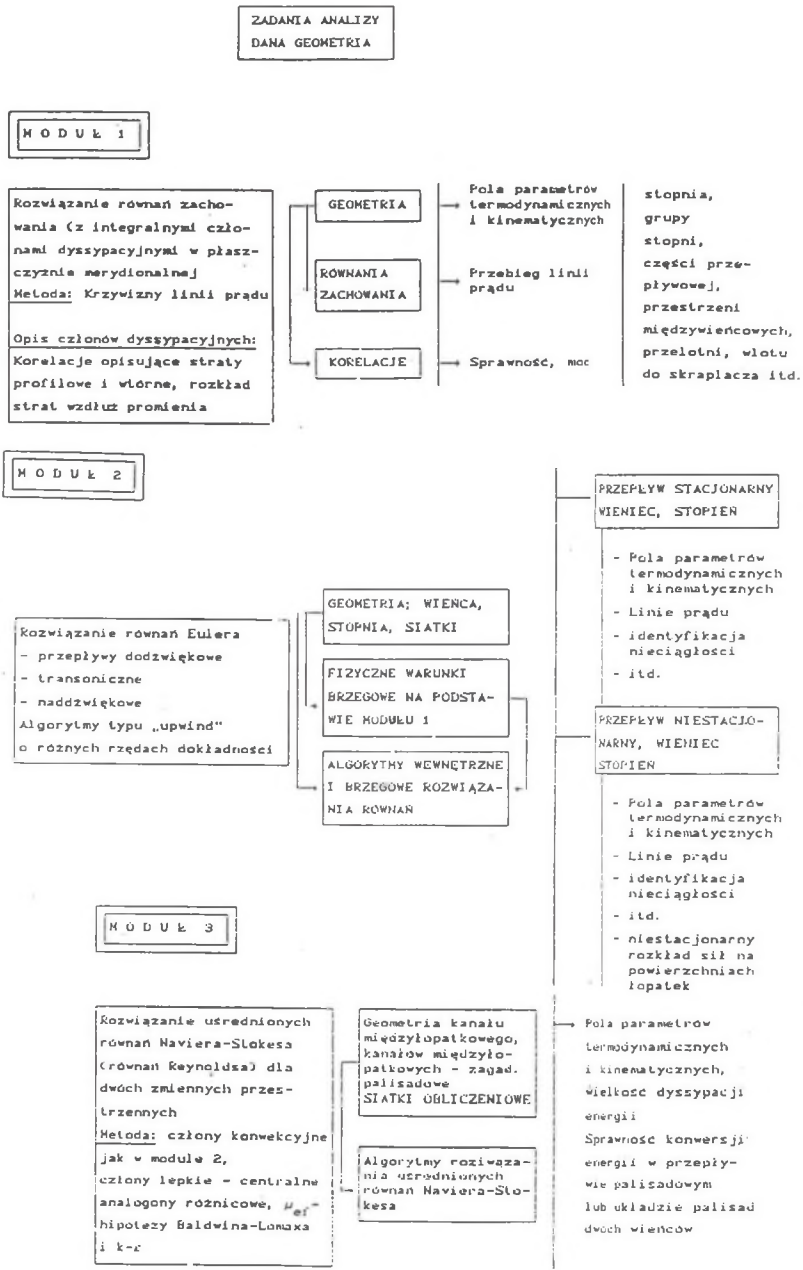
W ich modelowaniu wykorzystuje się różne stopnie uproszczeń fizycznych i matematycznych (rys. 1, [1]). W Zakładzie Ciepłych Maszyn Przepływowych (CMP) opracowano wiele algorytmów i programów obliczeniowych rozwiązania zadań brzegowych i początkowo-brzegowych sformułowanych dla uśrednionych równań Naviera–Stokesa (równań Reynoldsa), równań Eulera i równań „równowagi promieniowej”. Część z nich jest wynikiem realizacji projektów badawczych zleczanych przez KBN, część powstała jako rezultat badań własnych. Ważnym nurtem badań rozwijanych w ostatnim 5-leciu w Zakładzie Ciepłych Maszyn Przepływowych była analiza przepływów w wysoko obciążonych kanałach ciepłych maszyn wirnikowych (przepływów transonicznych). W ostatnim okresie powstały metody i programy obliczeń przepływu płaskiego, osiowosymetrycznego i przestrzennego w wieńcach i stopniach turbin ciepłych i sprężarek. Stosowano metodę elementarnych objętości z wykorzystaniem dokładnego rozwiązania zadania początkowego Riemanna. Rezultaty zawierają artykuły i opracowania [1–11]. Syntezę wyników tych badań zawiera opracowana w Zakładzie monografia: Przepływy transoniczne [1].

W badaniach zmiennego obciążenia (zwłaszcza ostatnich stopni turbin parowych) w Instytucie wykorzystywany jest model przepływu na powierzchniach S_1 i S_2 z odpowiednim uwzględnieniem strat energii mechanicznej. Opis sposobu postępowania zawierają opracowania [11–14]. Przygotowany model przepływu może służyć do dyskusji zadań cząstkowych. I tak np. w [15] przedstawiono metodykę i obliczenia rozległości strefy oderwania strumienia przy niewielkich obciążeniach stopnia.

Opracowane algorytmy i procedury cząstkowe umożliwiają obliczenia części przepływowej dla różnego zakresu uproszczeń. Stosowany modułowy układ programów ilustrują rysunki 2 i 3.

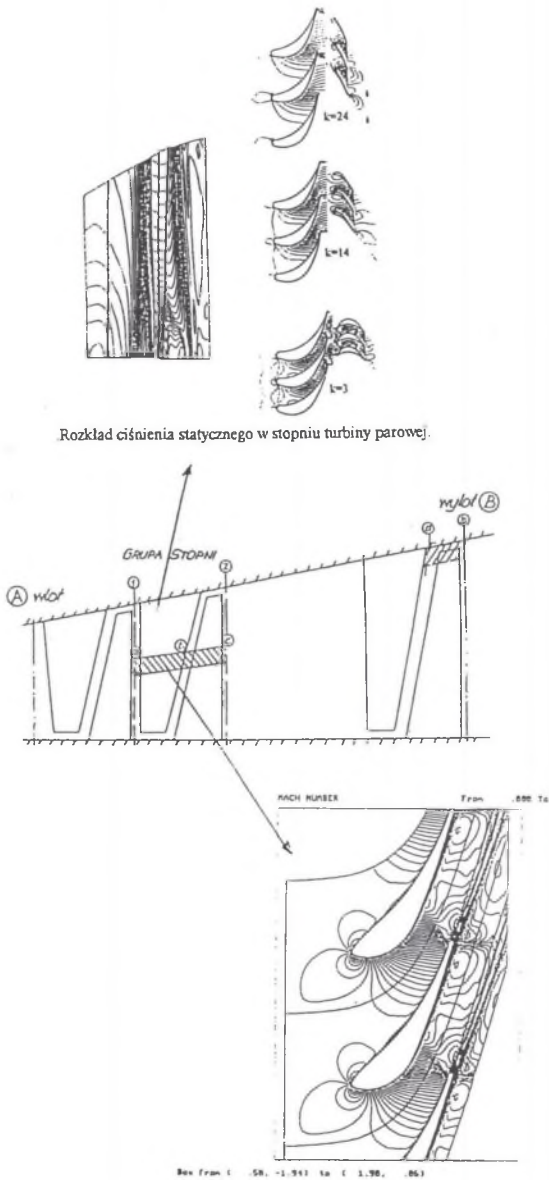
2.2. Zadania syntezy

W zadaniach syntezy (konstrukcyjnych) można także, w zależności od ogólności ich sformułowań, wykorzystywać modele ujęte w ogólną strukturę podaną na rys. 1, zwłaszcza jeżeli zadanie optymalizacyjne sformułować z wykorzystaniem odpowiednio zapisanych zadań analizy. Ogólny zarys koncepcji rozwiązania takich problemów, przyjęty w ostatnim okresie w Zakładzie CMP



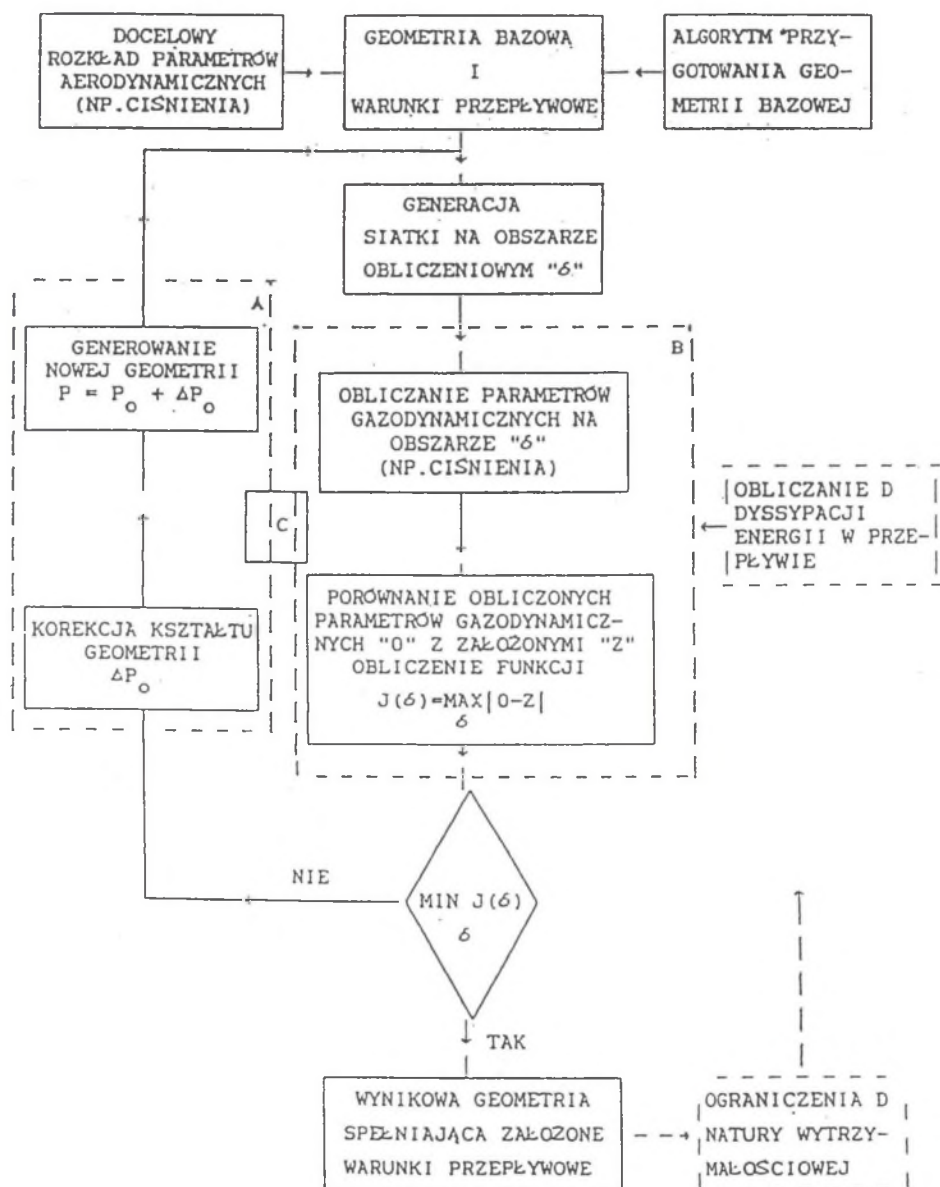
Rys. 2. Modułowy algorytm obliczenia optymalizacji aerodynamicznej stopni turbin ciepłych

Fig. 2. Modular algorithm for an aerodynamic optimization of thermal turbine stage



Rys. 3. Przykładowa kompozycja modułów. Przykłady liczby Macha dla rozwiązania przepływu lepkiego dla $Ma_{2is} = 1,19$

Fig. 3. Modular structure of numerical computations. The example of the calculation results



Rys. 4. Schemat rozwiązania zadania syntezy

Fig. 4. Solving scheme of synthesis problem

dla stopni turbinowych, przedstawiono na rys. 4 [1]. Istotą postępowania jest wielokrotne wykorzystanie rozwiązania zadania analizy w toku znajdowania optymalnych geometrii. Wybrane rezultaty zawierają opracowania [11, 16].

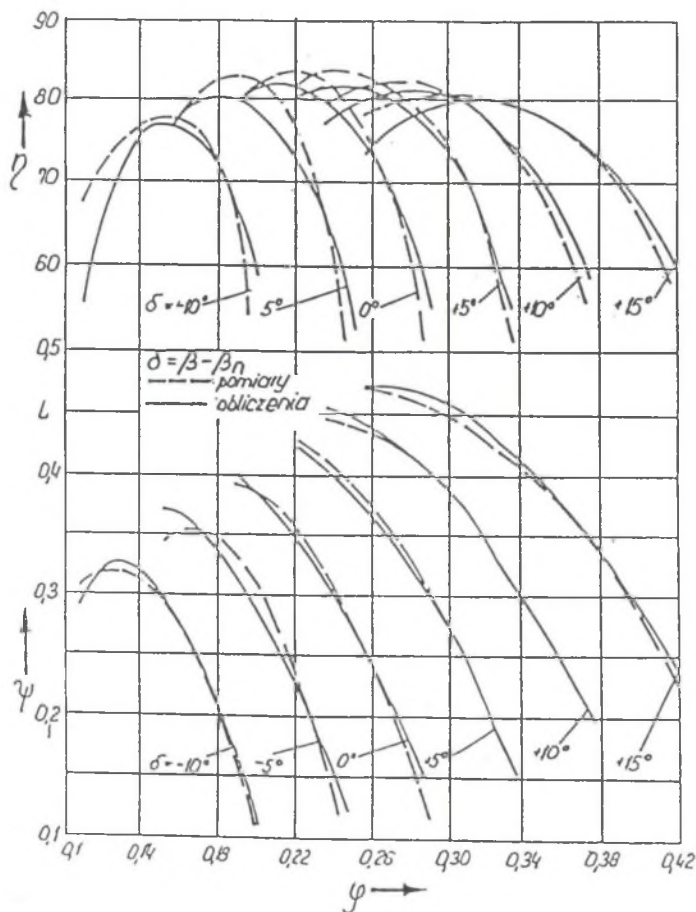
3. Projektowanie, konstrukcja i modernizacja ciepłych maszyn przepływowych

Ważną dziedziną aktywności Zakładu CMP jest działalność projektowo-konstrukcyjna (zob. także opracowania przeglądowe: [17–20]). Jest ona ukierunkowana głównie na opracowanie nowych konstrukcji maszyn przepływowych (głównie wentylatorów), modernizację wybranych węzłów konstrukcyjnych lub całych maszyn (wentylatorów i turbin parowych) oraz przygotowanie algorytmów i programów wspomagających proces projektowania i konstruowania. Powstają one jako synteza wyników wielu prac eksperymentalnych uzyskanych w laboratoriach Zakładu, prac teoretycznych i studialnych [21–27]. Opracowano wiele nowych konstrukcji wentylatorów oraz metodykę modelowania charakterystyk. Przykładowo na rys. 5 zilustrowano porównanie charakterystyk obliczeniowych i pomierzonych wentylatora osiowego przy zmianie kąta ustawienia łopatek wirnika.

W ostatnim okresie wyłonił się dodatkowy nurt badań projektowo-konstrukcyjnych. Dotyczył wysokosprawnych mokrych odpylaczy wirowych. Główne idee i wyniki działalności w tym zakresie zawarto w opracowaniach [28–30].

4. Nowe technologie energetyczne

W rozpatrywanym okresie w Zakładzie Ciepłych Maszyn Przepływowych podjęto badania nad nowymi technologiami energetycznymi określanymi jako czyste technologie „energetyczne”, główną uwagę skupiając nad technologiami utylizującymi węgiel. W początkowej fazie tych badań uwagę skupiono na optymalizacji struktur układów gazowo-parowych zintegrowanych z atmosferycznym częściowym zgazowaniem węgla (technologia Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze) [31–35], później także na analizie różnych układów gazowo-parowych [36, 37]. Na rys. 6 pokazano schemat optymalizowanego układu gazowo-parowego sprzężonego z częściowym zgazowaniem węgla. Podjęto także prace nad optymalizacją zamkniętych układów silników gazowych pracujących według zamkniętego obiegu Breytona [33] oraz nad modelowaniem dwupaliwowych układów kombinowanych (równoległych i szeregowych) [54].

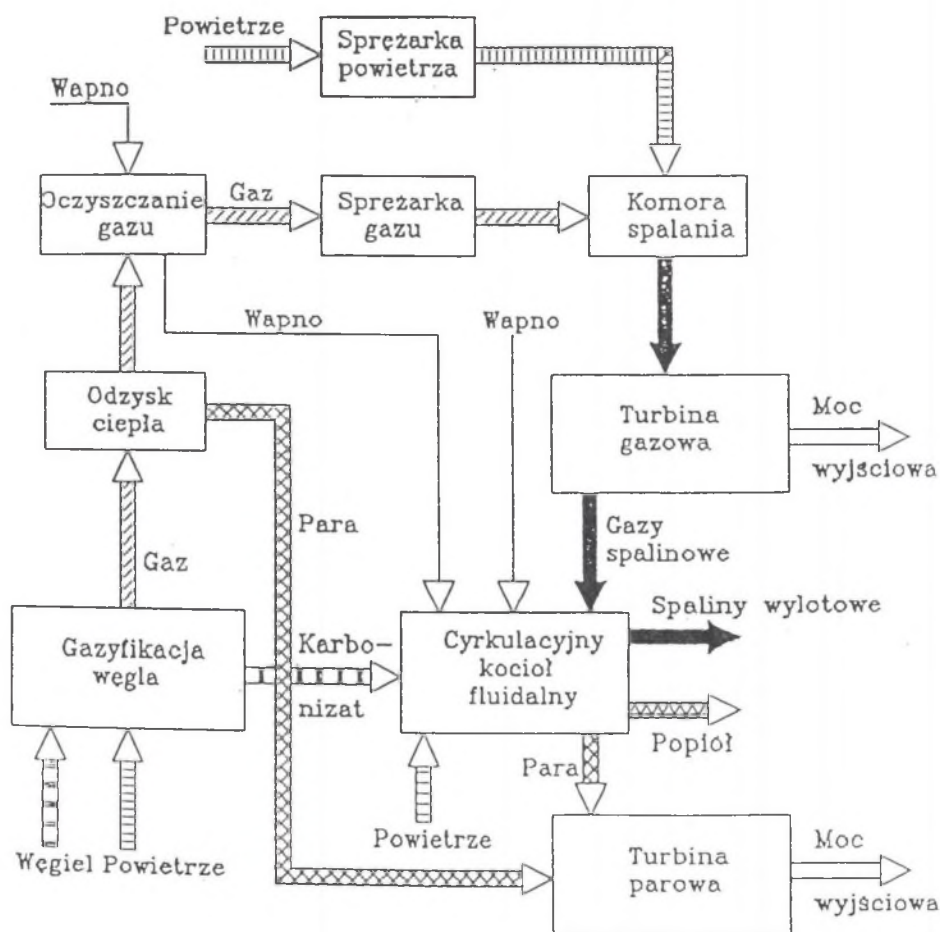


Rys. 5. Porównanie charakterystyk obliczeniowych i pomierzonych wentylatora osiowego przy zmianie kąta ustawienia łopatek wirnika

Fig. 5. A comparison of computed and measured characteristics for axial fan with rotor vanes angle set-up

5. Diagnostyka termiczna

Systemy monitoringu termicznego powinny spełniać dwie podstawowe funkcje: diagnostyczną (najlepiej on line) i symulacyjną. Wyniki obu tych funkcji zazwyczaj sprzężone z odpowiednimi ekonomicznymi miarami efektywności, stanowią kryteria kontrolne eksploatacji i służą personelowi elektrowni do



Rys. 6. Układ parowo-gazowy zintegrowany z instalacją pirolizy węgla (technologia IChW). Schemat blokowy

Fig. 6. Combined steam-gas power unit integrated with the coal pyrolysis installation

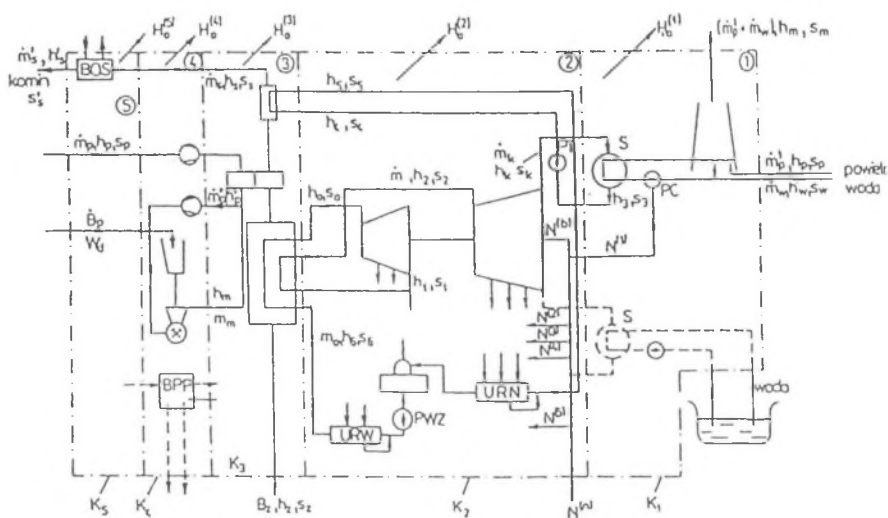
podejmowania różnych decyzji racjonalizujących pracę bloków. Mogą być one również podstawą do określenia strategii remontowych czy modernizacyjnych.

Aby obie te funkcje mogły być spełnione w strukturze układu monitorowania, należy rozbudować bloki modelowania odpowiednich węzłów instalacji. Dopiero informacje uzyskane z systemów pomiarowych i dane dostarczone

z rozwiązania modeli matematycznych całej instalacji lub poszczególnych jej elementów umożliwiającą właściwą kontrolę i bieżącą ocenę oraz prognozę stanów eksploatacyjnych.

Przedmiotem analizy mogą być także odrębne węzły w poszczególnych modułach technologicznych (np.: skraplacz, układ regeneracji, kocioł parowy itd.).

Rys. 7 ilustruje przykładowy podział siłowni na moduły, dla których formujemy odpowiednie modele obliczeniowe i miary efektywności kontrolowane podczas eksploatacji [55–57].



Rys. 7. Podział na moduły technologiczne siłowni kondensacyjnej. BOS – blok oczyszczania spalin, BPP – blok przygotowania paliwa, URW, URN – układ regeneracji wysoko- i niskoprężnej, S – skraplacz, PC – pompa cyrkulacyjna, Ki – osłony bilansowe

Fig. 7. Thermal power station divided into modules BOS – Stack gas processing system; BPP – Fuel processing module; URW, URN – Regenerative feed heating; S – Condenser; PC – Circulating pump; Ki – Balance Furfales

6. Badania cieplne i wytrzymałościowe maszyn przepływowych

Pierwsze prace dotyczące tej tematyki Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych podjął na zlecenie Zakładów Mechanicznych „ZAMECH” w Elblągu na początku lat siedemdziesiątych. Dotyczyły one wówczas wyznaczania pól temperatur i naprężeń w kadłubach turbin parowych. Później rozszerzono

zarówno przedmiot badań (na sprężarki, pompy, wentylatory), jak i zakres badań.

Obecnie są one ściśle związane z następującymi zagadnieniami:

- metody obliczeń termowyrztrzymałościowych maszyn przepływowych (głównie turbin ciepłych, sprężarek i wentylatorów),
- kontrola i optymalizacja obciążeń ciepłych turbin parowych, optymalnego sterowania niestacjonarnymi procesami ciepłymi w turbinach (rozruch, odstawienie i stygnięcie),
- trwałość zmęczeniowa i pełzaniowa głównych elementów parowych (głównie kadłubów i wirników),
- adaptacja kodów obliczeniowych charakterystyk wytrzymałości statycznej i dynamicznej w algorytmach optymalizacji konstrukcji.

Zadania są rozwiązywane wspólnie z Zakładem Podstaw Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Energetycznych [17, 20, 38–43]. Częściową syntezę badań zawierają monografie [44, 45] opracowane przez pracowników obu Zakładów.

7. Nowe metody i instalacje badawcze

W latach 1991–1996 opracowano i uruchomiono dwie złożone instalacje badawcze:

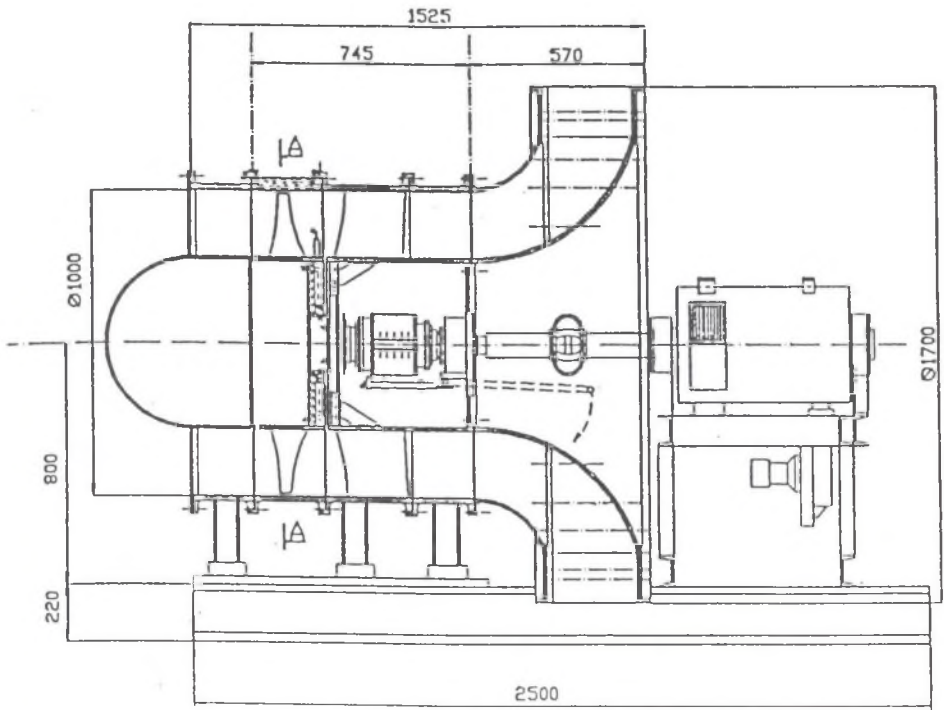
- a) stanowisko do próbkowania trójwymiarowego turbulentnego pola prędkości w osiowym stopniu sprężającym [46–48],
- b) tunel parowy do pomiarów przepływów palisadowych [11, 49, 50].

Stanowisko do próbkowania trójwymiarowego, turbulentnego pola prędkości w osiowym stopniu sprężającym

Doskonalenie algorytmów zarówno analizy, jak i procedur projektowych maszyn wirnikowych wymaga głębszego wnikania w strukturę trójwymiarowego przepływu turbulentnego.

Pomimo tego, że w ostatnich latach daje się zauważyć ogromny postęp w doskonaleniu metod analizy przepływu, w dalszym ciągu napotyka się trudności w modelowaniu zjawisk związanych z turbulencją przepływu głównie z uwagi na brak wystarczającej liczby danych pomiarowych. Biorąc to pod uwagę, w ZCMP Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych opracowano urządzenie umożliwiające pomiar trójwymiarowego nieustalonego pola przepływu w wybranych przekrojach kontrolnych osiowego stopnia sprężającego (rys. 8.1).

Podstawowymi elementami urządzenia jest blok pomiarowy, blok synchronizacji oraz blok przetwarzania danych pomiarowych (rys. 8.2). Urządzenie umożliwia próbkowanie pola prędkości w wybranych przekrojach pomiaro-



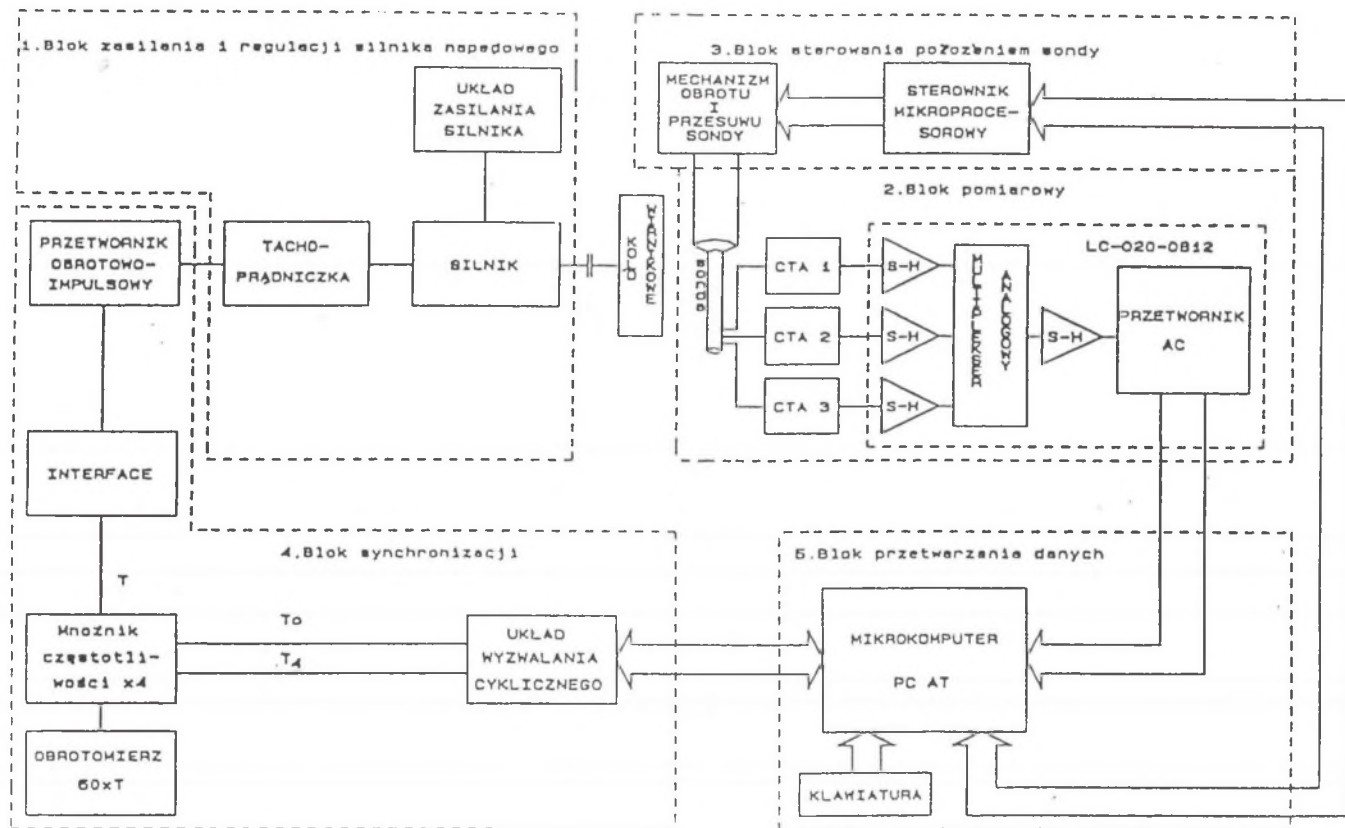
Rys. 8.1. Ogólny schemat wentylatora badawczego

Fig. 8.1. Overall scheme of the test fan

wych stopnia, w sekwencjach liczących 100 punktów rozmieszczonych wzdłuż obwodu koła wirnikowego obejmującego dowolną, wybraną liczbę kanałów międzyłopatkowych i zbieranych co jeden obrót maksymalnie do 3000 obr/min. Na rysunkach 8.3 i 8.4 przedstawione zostały wybrane wyniki badań wielkości charakterystycznych turbulencji w modelowym, osiowym stopniu sprężającym. Na rysunku 8.3 przedstawiono rozkłady trzech składowych intensywności turbulencji wzdłuż wysokości łopatki w przekroju wylotowym koła wirnikowego. Szczególnie interesujących informacji dostarcza obraz przepływów wtórnych, generowanych w kanale międzyłopatkowym (rysunek 8.4). Wyraźnie uwidocznione są obszary zaburzeń w rejonie szczeliny nadłopatkowej, piasty oraz na krawędzi spływu z łopatek koła wirnikowego.

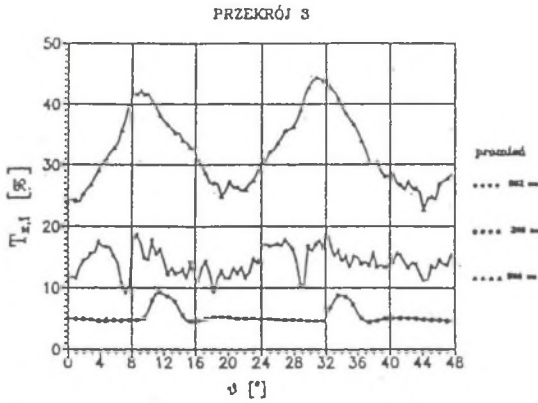
Tunel parowy

Instalacja tunelu parowego do badań przepływów przez palisady profili łopatkowych została zaprojektowana do prowadzenia badań w warunkach

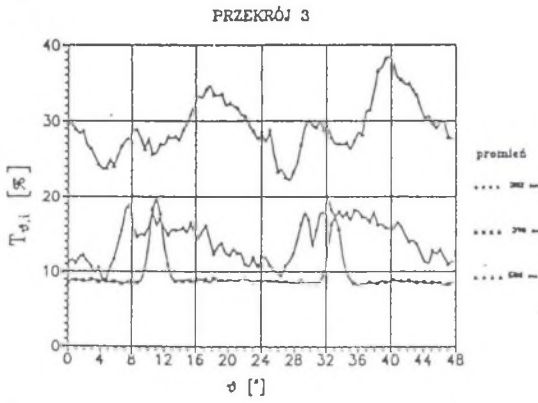


Rys. 8.2. Schemat pomiarowy

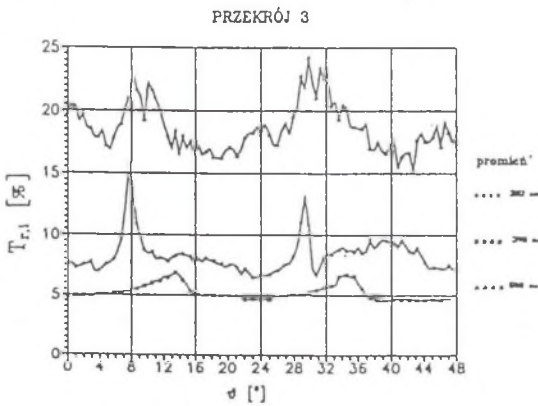
Fig. 8.2. Schem of measurement



a)

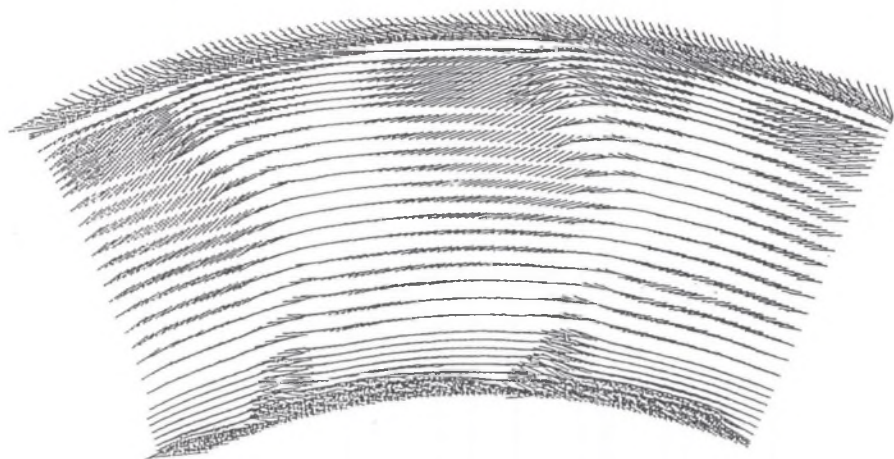


b)



Rys. 8.3. Rozkład stopnia burzliwości

Fig. 8.3. Distribution of a turbulent grade



Rys. 8.4. Pomiar przepływów wtórnych

Fig. 8.4. Measuring of secondary flows

odpowiadających rzeczywistym przepływowi pary przez ostatnie stopnie turbin kondensacyjnych. Stąd przyjęto następujący zakres zmiany parametrów pary przed palisadą:

ciśnienie	$p_1 = 0,001-0,2 \text{ MPa}$,
temperatura	$t_1 = 65-150^\circ\text{C}$,
strumień pary	$m = 0,1-2,1 \text{ Kg/s}$.

Założono przy tym możliwość zmian ciśnienia za palisadą w zakresie $p_2 = 0,006-0,15 \text{ MPa}$, co przy polu powierzchni przekroju komory wlotowej $F = 0,01 \text{ m}^2$ gwarantuje zakres zmian liczby Macha na wlocie $Ma_1 = 0,3-1,0$. Maksymalna prędkość dopływu pary rurociągu o średnicy 400 mm nie przekroczy przy tym 50 ms.

Wprowadzona regulacja temperatury wlotowej t_1 w zależności od ciśnienia p_1 zapewnia niewielkie przegrzanie pary rzędu 20°C , co w pierwszym etapie użytkowania instalacji nie powoduje potrzeby pomiaru stopnia suchości x_1 pary na wlocie i pozwala skoncentrować się na pomiarach suchości x_2 pary na wlocie. Po zweryfikowaniu, w takich warunkach, własnej konstrukcji kolarymetru do pomiaru x_2 metodą CKTI oraz pomyslnych próbach zastosowania innych metod pomiaru wilgotności pary, przewiduje się możliwość rozszerzenia badań na zakres zasilania tunelu parą wilgotną. Przeprowadzona analiza wskazuje, że w pierwszym przypadku w początkowym okresie będzie możliwe uzyskiwanie za palisadą pary o stopniu suchości $x_2 \leq 90\%$.

Konstrukcję i wykonanie instalacji oparto na wykorzystaniu w jak największym stopniu instalacji parowych hali maszyn Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, po uprzednim przeglądzie

i pracach remontowych. W ostatecznej wersji uwzględniając warunki lokalizacji tunelu, wykorzystano w całości kocioł VELOX wraz z urządzeniami pomocniczymi (pompa obiegowa i sprężarka gazu komunalnego, stacja redukcyjna) oraz znaczną część rurociągów parowych wraz z armaturą. Kocioł VELOX charakteryzuje się dobrą manewrowością, zapewniając stabilne parametry pary przegrzanej o wartościach nominalnych ciśnienia p do 1,0 MPa i temperatury t do 250°C. W celu otrzymania próżni za tunelem zastosowano układ skraplacza z wykorzystaniem strumienicy wodnej, zarówno ze względu na prostą instalację i obsługę, jak i ze względów ekonomicznych.

Zainstalowaną aparaturę kontrolno-pomiarową podzielono na dwie klasy:

- o dokładności wystarczającej na potrzeby techniczne,
- precyzyjną niezbędną dla programu badań naukowych.

Aparatura pierwszej klasy została użyta do kontroli i regulacji pracy instalacji parowej. Tam, gdzie było to możliwe, ograniczono ze względów ekonomicznych instalowanie układów automatycznej regulacji, pozostając przy sterowaniu ręcznym. Przewidziano jednak możliwość rozszerzenia zakresu automatycznej regulacji w późniejszym okresie i stworzono odpowiednie warunki do zrealizowania tych zamierzeń. Natomiast znaczną uwagę poświęcono aparaturze pomiarowej dla programu badań naukowych, w szczególności automatyzacji zbierania i przetwarzania danych oraz sterowania sondami pomiarowymi. Schemat instalacji tunelu parowego pokazuje rys. 9.

Wymagane parametry pary zasilającej tunel uzyskuje się w stacji redukcyjno-schładzającej 5. Składa się ona z zaworu regulacyjnego, redukującego ciśnienie, i umieszczonej za nim komory chłodzącej, do której wtryskuje się skropliny z rurociągu tłoczego pompy wody zasilającej kocioł. Regulacja ilości wtryskiwanej wody odbywa się ręcznie sterowanym zaworem regulacyjnym (docelowo przewiduje się automatykę i sterowanie). W celu uelastycznienia układu i kompensacji wydłużeń cieplnych zainstalowano kompensator soczewkowy na rurociągu zasilającym tunel. Przewidziano także odwodnienie rurociągu (odwadniacz pływakowy 13) niezbędne w przypadku przepływu pary wilgotnej.

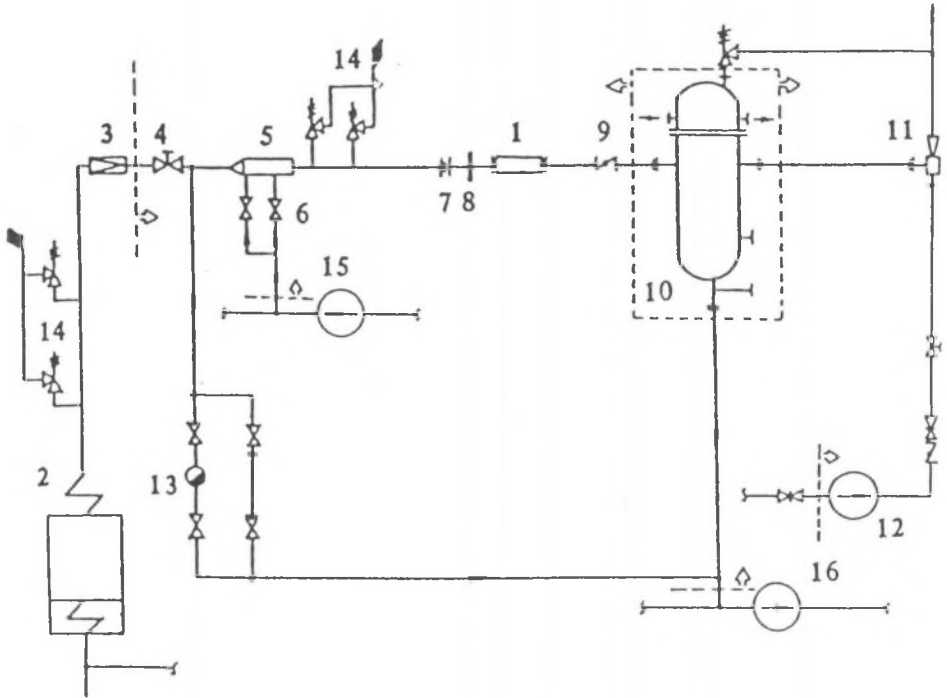
Układ próżniowy wytwarza wymagane w instalacji podciśnienie. Składa się z następujących elementów:

- skraplacza pary odprowadzanej ze stanowiska,
- układu chłodzenia skraplacza,
- układu próżniowego utrzymującego wymagane ciśnienie,
- układu odprowadzenia skroplin.

Konstrukcja tunelu oraz instalowana aparatura pomiarowa, regulacyjna i sterująca umożliwiają bezpośredni pomiar:

- ciśnienia p_1 , temperatury t_1 oraz strumienia pary m zasilającej palisadę profili,
- temperatury t_2 (ciśnienia p_2) oraz stopnia suchości x_2 pary za palisadą,

- rozkładu (wzdłuż podziałki) prędkości przy (wartość i kierunek) przed i za kanałem międzyłopatkowym palisady profilu,
- rozkładu ciśnień statycznych wokół profilu, oraz
- wizualizację pola przepływu w kanale między profilami łopatkowymi metodą „cieniową”.



Rys. 9. Schemat instalacji tunelu parowego: 1) tunel parowy do badań palisadowych, 2) kocioł VELOX, 3) stacja redukcyjna za kotłem, 4) zawór zaporowy, 5) stacja redukcyjno-schładzająca, 6) zawór regulujący dopływ skroplin do schładzacza, 7) zwężka pomiarowa, 8) kompensator soczewkowy, 9) przepustnica regulacyjna, 10) skraplacz, 11) strumienica wodna, 12) pompa wody roboczej dla strumienicy, 13) odwadniacz pływakowy, 14) zawory bezpieczeństwa, 15) pompa zasilająca, 16) pompa kondensatu

Fig. 9. Scheme of steam tunnel: 1) tunnel for the blade cascade investigations, 2) Velox boiler, 3) spill-over valve after the boiler, 4) stop valve, 5) spill-over valve, 6) attemperator's condensate control valve, 7) measuring orifice, 8) lens pipe joint compensator, 9) control damper, 10) condenser, 11) water injector, 12) working water injector's pump, 13) floatcondensate trap, 14) safety valves, 15) feed pump, 16) condensate pump

Docelowo przewiduje się określenie integralnych charakterystyk profili przez pomiar składowych wypadkowej siły i momentu działającego na profil, wdrożenie optycznej metody pomiaru lokalnego stopnia suchości pary w kanale oraz przed i za palisadą.

Prezycyjny pomiar strumienia pary realizowany jest za pomocą kryzy z pomiarem „vena contracta” spadku ciśnienia. Dobrane przetworniki umożliwiają pomiar (z uwzględnieniem wpływu gęstości i liczby Reynoldsa) z dokładnością większą niż 1%.

8. Patenty i wzory użytkowe oraz inna działalność

Pracownicy Zakładu współuczestniczyli w opracowaniu następujących patentów i wzorów użytkowych:

1. Sposób wymuszonego chłodzenia turbin parowych dużej mocy zwłaszcza typu akcyjnego z kadłubem dwupowłokowym. Świadcstwo autorskie 252558. Prawo ochronne nr 148237 (1990).
2. Sposób odsiarczania i końcowego odpylania spalin kotłowych oraz urządzenie do odsiarczania i końcowego odpylania spalin kotłowych, nr 159567, Świadcstwo autorskie 288253 (1993).
3. Sposób i układy elektryczne do wykrywania nieszczelności rur powierzchni grzewczych kotłów parowych, zwłaszcza mających tendencję do określonego występowania dominujących składowych widma tła akustycznego w zakresie częstotliwości poniżej 300 Hz, nr 161799, Świadcstwo autorskie 295247 (1994).
4. Parowy podgrzewacz powietrza kotłów energetycznych, nr 41985, Świadcstwo autorskie 66022 (1987).
5. Wymiennik ciepła, nr 495722, Świadcstwo autorskie 88232 (1992).
6. Parowy podgrzewacz powietrza kotłów energetycznych, nr 49387, Świadcstwo autorskie 87671 (1992).

Cztery zgłoszenia patentowe są w toku.

W latach 1990–1996 opracowano wspólnie z różnymi zespołami badawczymi Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych około 40 raportów wewnętrznych stanowiących sprawozdanie z badań własnych i zleczonych przez instytucje badawcze i przemysłowe. Przygotowano także kilka skryptów [np. 51, 52] dla specjalności prowadzonych przez Zakład.

Literatura

1. Chmielniak T.J.: Przepływy transoniczne. Ossolineum, Wrocław 1994.
2. Chmielniak T., Wróblewski W.: Numerical Solution of 2-D Transonic Flow through an Axial Turbine Stage. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., seria Energetyka z. 112, Gliwice 1991.
3. Chmielniak T., Misiewicz A., Wróblewski W.: Numeryczna analiza transonicznego opływu profilów strugą o zmiennej grubości. Prace IMP PAN, z. 93, s. 15–26, 1992.
4. Górski J., Chmielniak T.: Compressibility effects in the steady real gas flows. 2. ISAIF (International Symposium on Exp. and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows). Proc. of the Cong. Vol. 1, s. 249–255. Prague 1993.
5. Górski J., Chmielniak T.: Prediction of real gas effects via generalized compressibility potentials. ENSEC'93 (Energy Systems and Ecology), Proc. of the Int. Conf. Vol. 1, s. 191–198, Cracow 1993.
6. Chmielniak T.: Zagadnienia początkowo-brzegowe przepływów transonicznych w maszynach wirnikowych. Przepływowe maszyny wirnikowe. Zbiór prac VII Konferencji Naukowo-Technicznej (red. E. Ocoźo, J. Sieniawski) t. 1, Rzeszów 1993, s. 9–18.
7. Chmielniak T., Wróblewski W.: Numeryczne rozwiązania równań Eulera dla geometrii maszyn przepływowych. przepływowe maszyny wirnikowe. Zbiór Prac VII Konferencji Naukowo-Technicznej (red. E. Ocoźo, J. Sieniawski) t. 1, Rzeszów 1993, s. 29–34.
8. Wróblewski W., Górski J.: Zastosowanie równań Poissona do generacji siatek dwuwymiarowych. Rap. wewn. Inst. Maszyn i Urządzeń Energetycznych Pol. Śl., Gliwice 1992.
9. Wróblewski W.: Numeryczne obliczenia przepływu lepkiego w kanałach maszyn przepływowych. Raport wewn. B-63/5.1.93 Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Pol. Śl., Gliwice 1993.
10. Wróblewski W.: Berechnung der transonischen Strömung in Trubomaschinen mit Hilfe des expliziten Godunov-Verfahrens. Arbeitsbericht, Aachen.
11. Chmielniak T. i inni: Zagadnienia początkowo-brzegowe wewnętrznych przepływów transonicznych płynów nielepkich i lepkich dla geometrii maszyn przepływowych. Raport końcowy z realizacji projektu 3 1120 9101, Gliwice 1994.
12. Chmielniak T., Łukowicz H.: Numerical calculation of turbine stage for off-design Conditions. ZN Pol. Łódź CMP, z. 103, s. 143–165, Łódź 1992.
13. Chmielniak T., Łukowicz H.: Die Verlustverteilung in der Dampfturbinenstufe. Materiały Seminarium Maszyny przepływowe, Stuttgart 1993.
14. Chmielniak T., Łukowicz H.: Rozkłady wielkości dyssypacji energii w stopniu turbinowym z łopatkami zwijającymi. Zbiór prac VII Konferencji

- Naukowo–Technicznej: Przepływowe maszyny wirnikowe, Rzeszów 1993, s. 123–129.
15. Chmielniak T., Łukowicz H.: Ocena rozległości oderwania strumienia przy małych obciążeniach stopnia turbinowego. *Prace IMP PAN*, z. 92, 1990, s. 113–124.
 16. Chmielniak T., Łukowicz H., Wróblewski W.: Modelowanie przepływu w procesie projektowania wieńców łopatkowych maszyn wirnikowych. *Zeszyty Naukowe Pol. Śl., seria mechanika*, z. 103, Gliwice 1990, w. 51–54.
 17. Chmielniak T., Kosman G.: Badania przepływowe i wytrzymałościowe cieplnych maszyn przepływowych. przegląd tematyki i wybrane wyniki badań. *Zeszyty Pol. Pozn., seria Maszyny Robocze*, Poznań 1990.
 18. Chmielniak T.: Przedsięwzięcia technologiczne służące doskonaleniu procesów i urządzeń cieplnych siłowni parowych. *Zeszyty Naukowe WSI, seria Elektryka*, z. 34, Opole 1992, s. 15–24.
 19. Chmielniak T., Otte J.: Wentylatory – rozwój badań i konstrukcji. *ZN Pol. Śl., seria Energetyka*, z. 118, Gliwice 1993, s. 345–370.
 20. Chmielniak T., Kosman G., Otte J., Rusin A.: Zagadnienia modernizacji turbin i wentylatorów energetycznych. *Zeszyty Naukowe WSI, seria Elektryka*, z. 38, Opole 1994, s. 43–57.
 21. Grajek K., Otte J.J.: Komputerowa analiza wytrzymałości wirników wentylatorów – System WIRMES. Zbiór prac konferencji: „Komputerowo wspomagane konstruowanie i badanie maszyn wirnikowych – CAD Rotor’89, Kielce, październik 1989, s. 51–59.
 22. Otte J.J.: Koncepcja, konstrukcja i pole pracy nowego typoszeregu przemysłowych wentylatorów promieniowych. Zbiór prac VI Konferencji Kottłowej, Szczyrk 1990. *Zeszyty Naukowe Pol. Śl. nr 1101, seria Energetyka*, z. 113, Gliwice 1990, s. 545–555.
 23. Otte J.J., Rduch J.: Komputerowa analiza cech konstrukcyjnych wałów i łożysk wentylatorów. Zbiór prac VIII Konferencji „Metody i środki projektowania wspomaganego komputerowo”, Warszawa 1991.
 24. Otte J.J.: Wentylatory dla energetyki – problemy badawcze i projektowe. Zbiór prac Konferencji: „Problemy badawcze energetyki cieplnej”, Warszawa 1993, s. 271–276.
 25. Otte J.J., Dziuba J.: Badania przepływowe wentylatorów przeznaczonych do pracy przy czynniku wysokozapylnym. Zbiór prac IV Konferencji Naukowo–Technicznej „Wentylatory Przemysłowe”, Jaszowiec, 1993, *Zeszyty Naukowe Pol. Śl. nr 1221, seria Energetyka*, z. 118, Gliwice 1993, s. 151–162.
 26. Chmielniak T.: Wybrane zagadnienia optymalizacyjne stopni turbiniowych. *Zeszyty Naukowe Pol. Gdań., seria Budownictwo Okrętowe, LIV*, Gdańsk 1990, s. 33–43.

27. Chmielniak T., Łukowicz H.: Parametryczna optymalizacja stopni turbinowych w ujęciu jednowymiarowym. Zagadnienia maszyn przepływowych. Wyd. Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk, 1993, s. 147–161.
28. Chmielniak T., Otte J.J., Frydel W., Roj L.: Instalacja badawcza urządzeń odpylających. *Maszyny Górnicze* (10), 3/37, lipiec 1992.
29. Chmielniak T., Otte J.J., Frydel W.: Badania odpylaczy wirowych. Zbiór prac VII Konferencji Naukowo-Technicznej „Przepływowe maszyny wirnikowe”, Rzeszów 1993, t. 2, s. 105–110.
30. Chmielniak T., Frydel W.: Lutnia wirowa z wentylatorem w wentylacji kombinowanej. *Przegląd Górniczy* 4, 1994, s. 29–31.
31. Zieliński H., Kaczmarzyk G., Ściążko M., Rychły J., Chmielniak T.: Celan Energy production by use od smokeles fuel manufacturing and ICGCC systems. Fifth Seminar on Emission Control Technology for Stationary Sources. Nuremberg, Germany, 10-14 June 1990, s. 1–14.
32. Kaczmarzyk G., Zieliński H., Ściążko M., Chmielniak T.: Coal pyrolysis in economical use of coal. Proc. of VII th International Pittsburgh Coal Conf. 10-14, 09.1990, s. 123–132.
33. Kaczmarzyk G., Zieliński H., Chmielniak T., Ściążko M.: Racjonalizacja użytkowania węgla w zintegrowanych układach produkcji energii, Koks-Smoła-Gaz, 1, 1991.
34. Chmielniak T., Kotowicz J., Kaczmarzyk G., Ściążko M.: A thermodynamic analysis of combined cycle integrated with low pressure coal pyrolysis. First International Conf. on Combustion Technologies for Clean Environment, Portugal, 3–6 Sept., 1991, vol. II, 25.2, s. 9–15.
35. Chmielniak T i inni: Układ parowo-gazowy zintegrowany z częściowym zgazowaniem węgla. *Gospodarka paliwami i energią*, 10, 1994.
36. Chmielniak T.: Obiegi termodynamiczne turbin ciepłych. Ossolineum, Wrocław, Warszawa 1988.
37. Chmielniak T., Kotowicz J.: Wpływ wybranych parametrów termodynamicznych na sprawność układu gazowo-parowego. *Koks-Smoła-Gaz*, 12, 1990.
38. Chmielniak T., Kosman G., Rusin A.: The acample of supervision on analysis of steam turbine operating conditions with life time considered. VDI Bericht no 868, Strömungsmaschinen, VDI Berlag 1991, s. 175–185.
39. Kosman G., Chmielniak T., Rusin A.: Computer aided life time evaluation and its application to turbines design and their operation. ASME Paper 93-GT-277.
40. Kosman G., Łukowicz H., Rusin A.: Computer-aided evaluation of the durability of turbine elements. VDI Berichte 868, Aachen 1991.

41. Kosman G., Łukowicz H., Rusin A.: Modelowanie procesu rozprężania pary i nagrzewania elementów jako fragment oceny trwałości turbin. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., seria Mechanika, z. 103, Gliwice 1991.
42. Łukowicz H., Wróblewski W.: Warunki wymiany ciepła w stopniu komorowym przy różnych stanach obciążenia. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., seria Energetyka, z. 117, Gliwice, s. 63–93.
43. Chmielniak T.: Wymiana ciepła w cieplnych maszynach przepływowych. Zeszyty Naukowe Pol. Świętokrz., seria Mechanika, s. 53, s. 25–50, Kielce 1994.
44. Chmielniak T., Kosman G.: Obciążenia cieplne turbin parowych. WNT, Warszawa 1990.
45. Chmielniak T., Kosman G., Rusin A.: Pełzanie elementów turbin cieplnych. WNT, Warszawa 1990.
46. Witkowski A., Chmielniak T., Stozik M., Mirski M.: Stanowisko do badań trójwymiarowego nieustalonego przepływu w osiowym stopniu sprężającym. Przepływowe maszyny wirnikowe. Zbiór Prac VII Konf. Naukowo-Technicznej (red.: E. Ocoś, J. Sieniawski) t. 2, Rzeszów 1993, s. 119–122.
47. Witkowski A.S., Chmielniak T.J., Stozik M.D., Mirski M.: Facility for Turbulent and Unsteadiness Measurements Behind an Axial Compressor Rotor by Means of Periodic Multisampling with Triple Split Fiber Probes. ESDA Proceedings of the 1994 Engineering Systems Design and Analysis Conf. PD-Vol 64-8.2, 519–526.
48. Witkowski A.S., Chmielniak T.J., Stozik M.D., Mirski M.: Badania struktury przepływu trójwymiarowego turbulenta w przestrzeni międzywieńcowej osiowego stopnia sprężającego. XI Krajowa Konferencja Mechaniki Płynów, Warszawa, 17-21.X.1994, II.A, s. 55–60.
49. Chmielniak T.J., Łukowicz H., Werbowski T., Gielata E.: Instalacja tunelu parowego do badań silnie obciążonych palisad łopatkowych. Materiały VII Konferencji: Przepływowe maszyny wirnikowe (red. E. Ocoś, J. Sieniawski), Rzeszów 1993, s. 119–122.
50. Chmielniak T.J., Łukowicz H., Werbowski T.: Tunel parowy do badań przepływu przez proste palisady łopatkowe. XI Krajowa Konferencja Mechaniki Płynów, Warszawa, 17-21.X.1994, II.A, s. 44–48.
51. Chmielniak T.: Turbiny cieplne. Podstawy teoretyczne. Skrypt Politechniki Śląskiej, Gliwice 1993, s. 427.
52. Witkowski A.: Sprężarki wirnikowe. Skrypt Pol. Śl., 1757, Gliwice 1993, s. 190.
53. Chmielniak T.J., Chmielniak T.M.: Optymalizacja mocy silnika pracującego w zamkniętym obiegu Braytona. XVI Zjazd Termodynamików. Materiały konferencyjne. t. 1, s. 197, Kołobrzeg 1996.
54. Chmielniak T.J.: Węglowo-gazowe układy kombinowane generacji energii elektrycznej i ciepła. Prace Naukowe GIGu, nr 12, Katowice 1996.

55. Chmielniak T.J.: Miary oceny efektywności termodynamicznej siłowni ciepłych. II Konferencja nt.: Problemy badawcze energetyki cieplnej, Pol. Warszawska, Prace Naukowe Konferencji z. 6, 1995.
56. Chmielniak T.J.: Metoda entropowa analizy układów siłowni ciepłych. Compover'95, Vol 1, (The First International Scientific Symposjum), Gdańsk 1995.
57. Chmielniak T.J.: Wybrane zagadnienia monitoringu termicznego siłowni kondensacyjnej. ZN WSI w Opolu, s. Elektryka, z. 43, s. 53.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Gerard Kosman

Wpłynęło do Redakcji: 10. 10. 1996 r.

Abstract

In this paper the principal directions of the investigations in the field of fundamental problems of theory and constructions of thermal flow machines were discussed. An overall characteristic and the discussion of investigation's results obtained in 1990–1996 years were given e.g. The flow analysis and synthesis for thermal flow machines. Designig, constructions and retrofit of thermal flow machines New energetic technologies. Thermal diagnostic. Thermal and stength investigations of flow machines. New methods and installations for investigations. The description and passible potentials of the test stands have been also described.