

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

85

WARSZAWA - POZNAŃ 1983

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 SZEWAŃSKI (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 1983

Printed in Poland

ISBN 83-01-04191-9
ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE – ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 380+90 egz.	Oddano do składania 5 VII 1982 r.
Ark. wyd. 22. Ark. druk. 15	Podpisano do druku 4 III 1983 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 70 g	Druk ukończono w marcu 1983 r.
Nr zam. 440/179	N-5/1001.

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

JERZY KRZYŻANÓWSKI

Działalność naukowa Zakładu Dynamiki Gazów w latach 1976 - 1980

Отдел газодинамики

В 1976 - 1980 г.г. в Отделе газодинамики продолжались работы связанные с исследованиями течений характерных для проточных машин, с особым учетом многофазных течений и нестационарных явлений.

Кроме того начаты работы над систематическим развитием исследований охваченных расширяющимся сейчас названием „численная механика жидкостей” с намерением дальнейшего их развития в отдельной организационной структуре.

Проблематика работ Отдела в период охваченный отчетом характеризовалась кроме того более сильными чем ранее стремлениями связывания программ собственных исследований с нуждами народного хозяйства. Эти стремления выражались начинанием и координированием комплексных работ непосредственно затребованных промышленностью, напр. методы проектирования турбин и тепловых циклов с использованием ЭВМ, или состав работ связанных с проектом сверхзвуковой ступени аксиального компрессора.

Department of Gas Dynamics

In the years 1976 - 1980 the Department of Gas Dynamics continued investigating the flows typical of the fluid-flow machinery, and especially multiphase flows and transient phenomena.

Furthermore, a systematic research in the field covered by the widespread name of „Numerical Fluid Mechanics” has been initiated with an outlook for further development in a separate organizational structure.

The characteristic feature of the Department research problems in the period covered by this report consisted in stronger then before trends to tie closely own research programmes with the needs of national economy.

These trends were expressed in initiating and co-ordinating complex works remaining in the field of direct demand of the industry as for instance computerized methods of turbines and heat cycles design or the set of works connected with designing transonic stages of axial compressors.

1. Wstęp

Publikacje sprawozdawcze Zakładów Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, w tym Zakładu Dynamiki Gazów, mają już pewną tradycję [1 - 4]. Niniejsze sprawozdanie dotyczy 5-lecia 1976 - 80. W okresie tym Zakład realizował badania w zainicjowanych już

poprzednio dziedzinach — przepływów nieustalonych i przepływów wielofazowych. Można tu już mówić o specjalizacji Zakładu. Do tego tradycyjnego wątku badań dołączono ostatnio prace w zakresie wybranych zagadnień przepływów transsonicznych i metod numerycznej mechaniki płynów. Dużo uwagi poświęcono też, wspomaganym komputerem, metodom projektowania turbin i obiegów cieplnych. Szczegółową motywację tego programu badawczego podano poniżej.

Badania Zakładu realizowane były w omawianym pięcioleciu w ramach problemu międzyresortowego MR I.26 „Podstawy projektowania maszyn i urządzeń energetycznych”. Koordynatorem tego problemu, wchodzącego w skład Programu Badań Podstawowych PAN, był Instytut. Uruchomienie tego problemu w 1976 r. stanowiło istotny sukces

Tabela 1

Struktura programu prac badawczych realizowanych w Zakładzie Dynamiki Gazów w latach 1976 - 1980

Problem międzyresortowy MR I.26: Podstawy projektowania maszyn i urządzeń energetycznych		
Grupa tematyczna	Temat	Nazwa pracowni/zespołu realizującego temat (kierownik)
02 Przepływy gazów i par przez stopnie i maszyny	02.1 Przepływy przez palisady łopatkowe	Pracownia Dynamiki Przepływów Dwufazowych (prof. R. Puzyrewski)
	02.2 Przepływy przez osiowe stopnie i maszyny	Zespół Aerothermomechaniki Stopni i Maszyn Przepływowych (doc. J. Dudzisz, prof. J. Krzyżanowski)
	02.5 Opracowanie silnie obciążonego stopnia sprężarki osiowej	Pracownia Dynamiki Przepływów Dwufazowych (prof. R. Puzyrewski) Zespół Turbin Gazowych (dr J. Prokopowicz)
03 Generacja wzbudzeń aerodynamicznych i hałasu	03.1 Badania niestacjonarnych opływów i przepływów	Pracownia Przepływów Niestacjonarnych (doc. A. Zabicki)
	03.2 Opracowanie aparatury do pomiaru lokalnych i chwilowych parametrów przepływów niestacjonarnych	j.w.
05 Przepływy z przemianami fazowymi i reakcjami chemicznymi	05.1 Termodynamika procesów i przepływów w czynnikach wielofazowych	Pracownia Termodynamiki Przepływów Wielofazowych (doc. A. Konorski)
	05.2 Kondensacja par przy podwyższonych parametrach	Pracownia Dynamiki Przepływów Dwufazowych (prof. R. Puzyrewski)
	05.3 Procesy dezintegracji i ruchu fazy ciekłej w przepływie	Zespół Badań Erozji (prof. J. Krzyżanowski)
11 Komputerowe metody w konstrukcji i badaniach maszyn przepływowych	11.2 Określanie charakterystyk zespołów, urządzeń i maszyn energetycznych	Zespół Międzyzakładowy Komputeryzacji Projektowania Turbin i Obiegów (prof. J. Krzyżanowski)

1. W tabeli podano sformułowania i podział tematyki realizowanej w Zakładzie w ramach problemu MR I. 26 według redakcji planu 1980; redakcja ta ulegała w pięcioleciu nieznacznym zmianom.

2. Plan badań Zakładu obejmował ponadto prace finansowane ze źródeł przemysłowych, np. BKT-ZAMECH, Elbląg lub OBR NL-WSK Rzeszów (dotyczyło to również działalności badawczej kilku innych Zakładów IMP PAN). Część tych prac o charakterze poznawczym znajdowała odbicie w sformułowaniu zadań i tematów MR I.26. W ten sposób związki z przemysłem przyczyniły się do rozszerzenia programu badań poznawczych; spotkało się to z wysoką oceną Międzyresortowej Komisji Ocen Programu Badań Podstawowych. Wyniki tak finansowanych prac w formie ok. 126 opracowań Zakładu zostały przekazane sponsorom. Część z tych prac znalazła, za zgodą sponsora, wyraz w publikacjach i wystąpieniach konferencyjnych pracowników Zakładu.

w organizacji badań skupionych wokół badań podstawowych związanych z rozwojem maszyn i urządzeń energetycznych. Po raz pierwszy bowiem udało się wokół tych zagadnień skupić większość krajowych placówek badawczych z różnych resortów i stworzyć

warunki do stabilizacji tematyki i próby takiego doboru tematyki by, zachowując swój podstawowy charakter, mogła ona nawiązywać do potrzeb gospodarki o bliższym i dalszym horyzoncie wdrożenia.

Bliższą informację o strukturze badań prowadzonych przez Zakład w ramach problemu MR I.26 podano w tabeli 1.

Program prac Zakładu realizowany był w kilku pracowniach i zespołach:

Pracownia Przepływów Nieustalonych, pod kierunkiem doc. dr. A. Żabickiego, rozwijała badania w 3 grupie tematycznej MR I.26 realizując 2 tematy: 03.1 — „Badania nieustalonych opływów i przepływów” i 03.2 — „Opracowanie aparatury do pomiaru lokalnych i chwilowych parametrów w przepływach nieustalonych”.

Pracownia Dynamiki Przepływów Dwufazowych, pod kierunkiem prof. dr. hab. R. Puzyrewskiego, prowadziła badania w grupie tematycznej 05 realizując temat 05.2 — „Kondensacja par przy podwyższonych parametrach”. W drugiej części okresu sprawozdawczego zainteresowania pracowni skupiały się ponadto wokół zagadnień optymalnego kojarzenia wieńców łopatkowych stopni turbin o zwiększonym, ale uzasadnionym ekonomicznie, obciążeniu aerodynamicznym. Podjęcie tego zadania wynikało z zainteresowań elbląskiego ZAMECHu*. Tę tematykę rozwijano w pracowni realizując wybrane zadania tematu 02.1 — „Przepływy przez palisady łopatkowe” i tematu 02.2 — „Przepływy przez osiowe stopnie i maszyny” w grupie tematycznej 02 problemu MR I-26.

Pracownia Termodynamiki Przepływów Wielofazowych, pod kierunkiem doc. dr. A. Konorskiego, realizowała temat 05.1 — „Termodynamika procesów i przepływów w czynnikach wielofazowych”, zaś:

Zespół Badań Erozji, pod kierunkiem prof. dr. hab. J. Krzyżanowskiego, zajmował się tematem 05.3 — „Procesy dezintegracji i ruchu fazy ciekłej w przepływie”.

Pewną ewolucję przeżył Zespół Aerotermomechaniki Układów Łopatkowych — początkowo, pod kierunkiem doc. dr. J. Dudzisa, który zmarł przedwcześnie w grudniu 1978, zespół realizował zadania tematu 02.2 (patrz wyżej), a następnie po zmianach składu, pod kierunkiem dr. J. Prokopowicza, zajął się „Opracowaniem silnie obciążonego stopnia sprężarki osiowej” (temat 02.5, MR I.26). Takie nowe ukierunkowanie tematyki wiązało się z zacieśniającą się współpracą z OBR Napędów Lotniczych WSK Rzeszów. Połączono to ze zmianą nazwy zespołu na Zespół Badawczy Turbin Gazowych.

Nowym kierunkiem działań Zakładu były prace nad wspomaganymi komputerowo metodami projektowania turbin i obiegów cieplnych. Tę tematykę o nadzwyczajnej pilności dla krajowego przemysłu turbinowego i w ścisłej z nim współpracy realizowano w nieformalnie funkcjonującym zespole międzyzakładowym Instytutu. Pod kierunkiem prof. dr. hab. J. Krzyżanowskiego przy istotnym merytorycznym wkładzie dr. A. Gardzilewicz, dr. S. Krzeczковского i inż. E. Błażki z Zakładu oraz mgr. T. Jankowskiego z Ośrodka Obliczeniowego IMP realizowano tę tematykę w szeroko zakrojonej współpracy z innymi placówkami w temacie 11.2 — „Określanie charakterystyk zespołów, urządzeń i maszyn energetycznych” grupy tematycznej 11, MR I.26.

* Zakłady Mechaniczne im. Gen. K. Świerczewskiego ZAMECH w Elblągu.

W realizacji prac badawczych starano się stosować zasadę finansowania ich ze środków Sekretarza Naukowego PAN w tej ich części, która nosiła charakter rozpoznawczy lub podstawowy; część zaś tej tematyki, o charakterze aplikacyjnym, finansowano ze środków przemysłu. Taktyka ta, zbliżająca wyniki badawcze do potrzeb gospodarki, znajdująca odbicie i w innych działach działalności badawczej Instytutu zyskała wysokie oceny Międzyresortowej Komisji Ocen Programu Badań Podstawowych. Z zadowoleniem także należy podkreślić zacieśniające się więzi z partnerami z przemysłu. Staraliśmy się doskonalić styl naszej współpracy wspólnie precyzując i realizując wybrane zadania badawcze i wdrożeniowe. Wychodziliśmy tu ze sprawdzonej w Instytucie w aktualnych warunkach działania przemysłu maszyn i urządzeń energetycznych zasady, że skuteczność wdrożeń rezultatów badań zależy od wysiłków tak nauki, jak i przemysłu. Wspomnieć tu także należy o roli koordynatora, jaką Instytut przyjął na siebie w związku z pracami licznych placówek krajowych skupiających swoje badania wokół tematyki badawczej finansowanej przez przemysł. W związku z tym Zakład przyjął faktycznie rolę merytorycznego i formalnego organizatora badań placówek badawczych uczestniczących w opracowywaniu:

a) „Wspomaganych komputerowo metod projektowania turbin i obiegów” dla ZAMECHu (przy współpracy ITC-PW, IO-PG, ITC, ZAMECH)*,

b) „Optymalnych metod kojarzenia wieńców łopatkowych i nowych silnie obciążonych stopniach turbinowych” dla ZAMECHu (przy współpracy IMC-PCz, ITL-WAT, ITC)*,

c) „Silnie obciążonego stopnia transsonicznego sprężarki osiowej” dla WSK Rzeszów (przy współpracy ITCiSS-PP, ITL-WAT, IMP-PŁ, ZAMPAN)*.

Przedstawione poniżej sprawozdanie oparto na raportach rocznych z realizacji tematów oraz na [5]. Rozpoczęto od badań przepływów nieustalonych i dynamiki przepływów dwufazowych, tradycyjnych tematów Zakładu. Badania przepływu przez palisady, stopnie i maszyny oraz opis prac nad wspomaganiem komputerowo metodami obliczeń turbin i obiegów opisano w dalszej kolejności.

2. Badania przepływów nieustalonych

We współczesnym opisie przepływu przez palisady i stopnie maszyn przepływowych tradycyjnie używa się uśrednionych (w czasie i często w kierunku obwodowym, a nawet promieniowym) parametrów termodynamicznych i kinematycznych przepływu. Co najmniej z dwu punktów widzenia opis taki jest niezadowolający:

- uniemożliwia on bliższe ujęcie szeregu zjawisk przepływowych oraz
- oddala możliwość racjonalnego określenia wzbudzeń aerodynamicznych oddziałujących na układ łopatkowy.

* ITC-PW — Instytut Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej,

IO-PG — Zakład Siłowni Ciepłych Instytutu Okrętowego Politechniki Gdańskiej,

ITC — Instytut Techniki Ciepłej, Łódź,

IMC-PCz — Instytut Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej,

ITL-WAT — Instytut Techniki Lotniczej WAT,

ITCiSS-PP — Instytut Techniki Ciepłej i Silników Spalinowych Politechniki Poznańskiej,

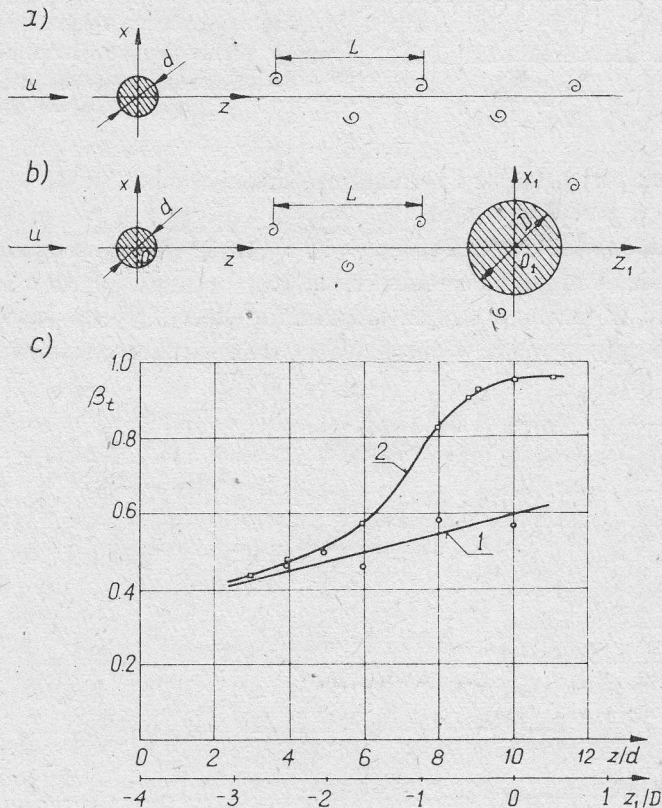
IMP-PŁ — Instytut Maszyn Przepływowych Politechniki Łódzkiej,

ZAMPAN — Zakład Doświadczalny Instytutu Maszyn Przepływowych PAN.

Nowemu opisowi niestabilnych zjawisk przepływowych sprzyja nowe spojrzenie na zmienność parametrów w czasie. Zamiast uśredniać je w czasie i wartościom średnim przypisywać określony stopień turbulencji, napotyka się ostatnio coraz częściej próby opisu przepływów niestabilnych oparte na śledzeniu zachowania się dużych, koherentnych niejednorodności wirowych. Opis przepływowych zjawisk niestabilnych w maszynie przez studium transportu wirów zdaje się rokować nadzieję łatwiejszego zrozumienia tych zjawisk i służyć modelem opisu bliższym rzeczywistości. Koncepcję takiego spojrzenia na przepływ niestabilny i „filozofię” badań Pracowni Przepływów Niestabilnych Zakładu opisano m. in. w [6].

W pracowni zajmowano się 3 kompleksami badań eksperymentalnych i teoretycznych:

- generacją niejednorodności wirowych,



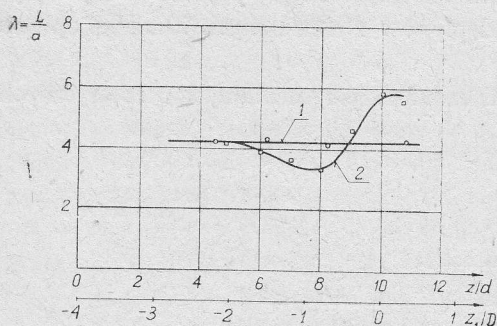
Rys. 1. Turbulizowanie się wirów w ścieżce wirowej Kármána (wg [18, 20]); a) szkic geometrii swobodnej ścieżki wirowej, b) szkic geometrii zaburzonej obecnością drugiego cylindra ścieżki wirowej, c) współczynnik β_t sturbulizowania wirów

1 — dla swobodnej ścieżki wirowej, 2 — dla zaburzonej ścieżki wirowej

$$\beta_t = 1 - \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon} \right)^2,$$

gdzie ε_2 — r.m.s. fluktuacji prędkości dla częstotliwości Strouhala, ε — r.m.s. fluktuacji prędkości (całka widma mocy)

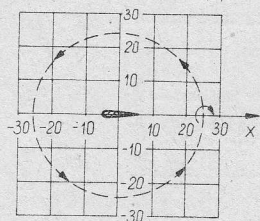
- badaniami opływu ciał przy dużych liczbach Reynoldsa i przy obecności dużych niejednorodności wirowych, oraz
- badaniami izolowanego stopnia wentylatora osiowego o nierównomiernej podziałce. Miały one na celu
- opracowanie eksperymentalnej techniki generowania stabilnych struktur wirowych w przepływie,



Rys. 2. Wzdłużna podziałka wirów w swobodnej i zaburzonej obecności drugiego cylindra ścieżce Kármána. Geometrię przepływu i oznaczenia podano na rys. 1 (wg [18, 20])

1 – dla swobodnej ścieżki wirów Kármána, 2 – dla zaburzonej ścieżki wirów Kármána

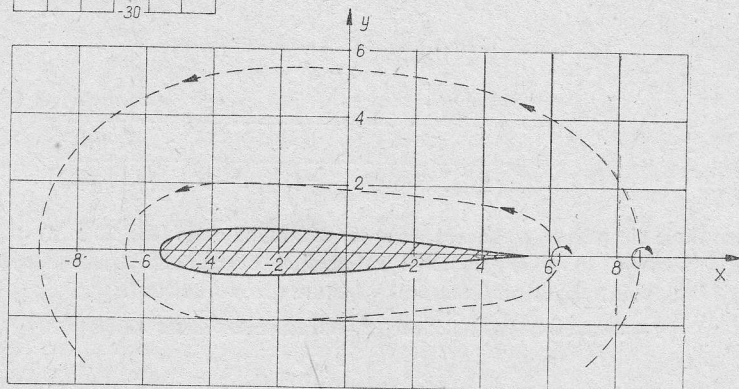
- studium eksperymentalne i teoretyczne oddziaływania różnych struktur wirowych z przeszkodami w przepływie, oraz
- opracowanie techniki badań przepływów nieustalonych w maszynach wirnikowych. W wyniku badania mogą doprowadzić do nowego opisu przepływu w stopniu maszyny. Eksperymenty w tunelu o małym stopniu turbulencji [7] zainicjowano badaniami niestacjonarnego opływu walca w obecności dużych niejednorodności wirowych na spływie [8 - 11].



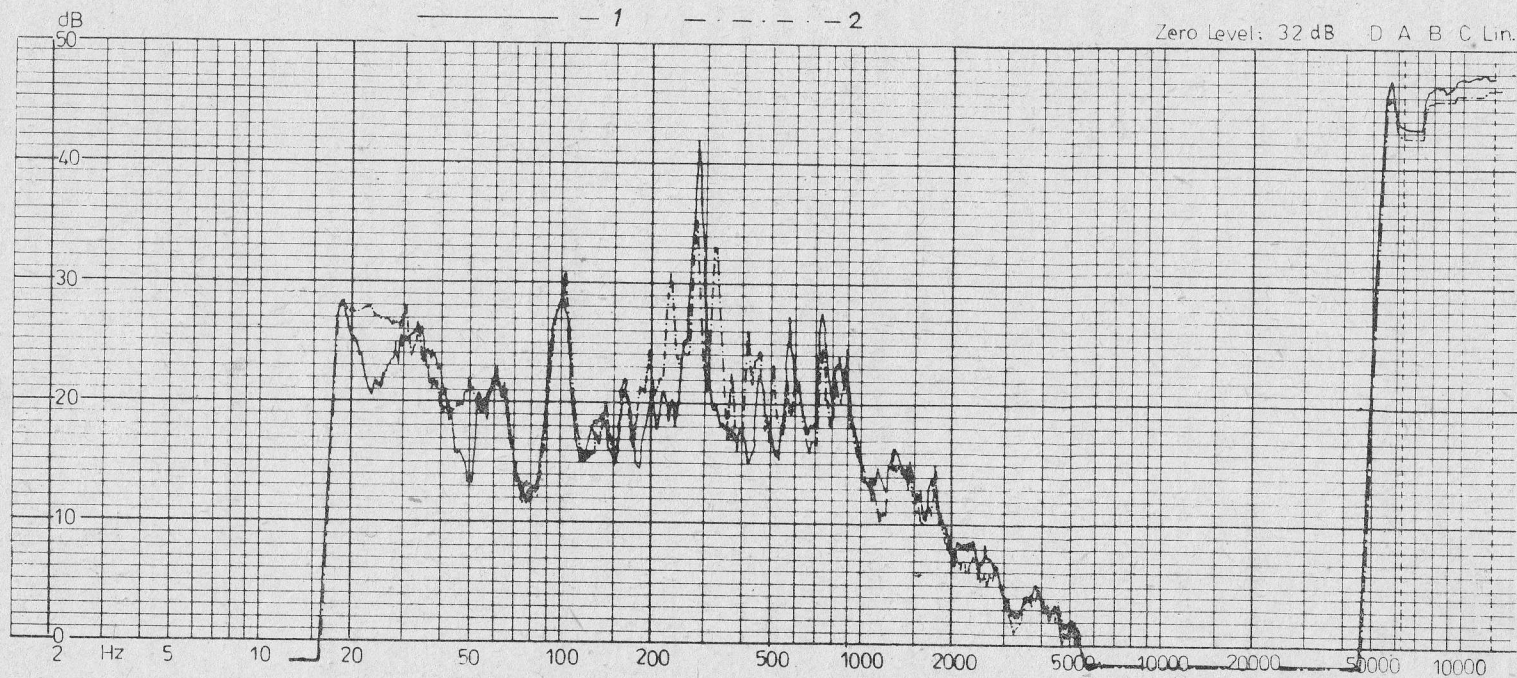
PROFIL OTRZYMANO Z ODWZOROWANIA

$$z = (\zeta - A) + \frac{(a - A)^2}{\zeta - A}$$

OKRĘGU O PROMIENIU $a = 3$ PRZESUNIĘTEGO
WZDŁUŻ OSI X O $A = 0,3$ WZGLĘDEM POCZĄTKU
UKŁADU



Rys. 3. Trzy tory pojedynczego wiru opływającego profil Żukowskiego w różnych od niego odległościach (wg [J. Świryczuk])



Rys. 4. Widmo hałasu generowanego przez wentylator WO-630 (wg [J. Welnic])

1 — z wirnikiem o równomiernej podziałce, 2 — z wirnikiem o nierównomiernej podziałce; $D_z/D_w = 1,91$, $n = 24,5$ obr/s, $z_w = 12$ łopatek, $z_k = 13$ łopatek

Nowe wyniki uzyskano m. in. przez zastosowanie techniki termoanemometrycznej i aparatury doc. Żabickiego do pomiaru nieustalonych ciśnień. Zaproponowano również nowy model teoretyczny opisu zmian cyrkulacji wokół cylindra przy przepływie z oderwaniem [12, 13].

Napotkane trudności wytwarzania stabilnych niejednorodności wirowych skłoniły do zajęcia się badaniami eksperymentalnymi generacji stabilnych torusów wirowych [14, 15]. Wskazały one celowość spojrzenia na obszar tradycyjnie nazywany turbulentną strefą mieszania jako na obszar powstawania dużych struktur wirowych.

W naturalnej konsekwencji zajęto się następnie opływem przeszkód i ciał strumieniem z dużymi niejednorodnościami wirowymi. Dotyczyło to zarówno współdziałania torusów wirowych z przeszkodami [16], jak również ruchu pojedynczego swobodnego wiru wokół profilu, ruchu pary wirowej wokół okręgu [17] oraz ruchu ścieżki wirowej wokół cylindra [18 - 20]. Opracowano technikę wytwarzania pojedynczego wiru startowego i wykorzystano ją do badań opływu profilu pojedynczego. Zbadano też granice stosowalności modelu punktowej reprezentacji wiru i jego rozpad (rys. 1, 2, 3).

Dla numerycznej obróbki danych doświadczalnych i opisu zjawisk opracowano szereg algorytmów i programów oraz dokonano szczegółowych badań porównawczych pomiarów zmierzonych parametrów przepływów turbulentnych metodami analogowymi i numerycznymi we współpracy z Instytutem Fizyki Technicznej AN USRR w Kijowie [21, 22].

Równolegle przystąpiono do uruchomienia badań przepływów nieustalonych w izolowanym stopniu wentylatora osiowego. Zastosowano w nim dla ograniczenia efektów akustycznych palisadę wirnikową o zmiennej podziałce. Przygotowano aparaturę pneumatyczną do pomiaru niestacjonarnych ciśnień i kierunku, technikę rejestracji danych doświadczalnych i program numerycznych obliczeń przepływu przez palisady o nierównomiernej podziałce [23, 24]. Uzyskano interesujące rezultaty w dziedzinie obniżenia hałasu w wyniku zastosowania nierównomiernej podziałki (rys. 4). Badania są w toku.

Zadaniem o podstawowym znaczeniu dla badań przepływów nieustalonych jest technika pomiarowa. W [4] podano ogólną zasadę rejestracji danych na taśmie magnetofonowej i technikę ich przetwarzania w maszynie cyfrowej. Ostatnio uzyskany stan opanowania tej techniki przedstawiono w [25, 26]. Opracowano oryginalne wejścia analogowe do EMC ODRA 1206 i RIAD JS 32 [27, 28]. Liczne powstałe dla obróbki danych programy opisano w [26, 29]. Udoskonalono też system wielopunktowego pomiaru ciśnienia za pomocą przetworników indukcyjnych z komutacją po stronie ciśnienia [30 - 32] oraz nowe zmodernizowane czujniki fotooptyczne do pomiaru zmiennych ciśnień [33].

3. Badania dynamiki przepływów dwu-(wielo)fazowych

Tematyka tych badań skupia od dłuższego czasu znaczną część potencjału badawczego Zakładu. Realizowana w 3 odmiennych Pracowniach i Zespołach różni się ujęciem; motywacje i kierunki zastosowań są spójne — chodzi tu o takie zjawiska w przepływach dwu-(wielo)fazowych, których poznanie i lepszy opis ma decydujące znaczenie dla prawidłowego wymiarowania, dokładnego obliczania i prognozowania żywotności części przepływowych maszyn i urządzeń energetycznych. Prace nakierowane w zasadzie na

potrzeby energetyki, konstrukcji i eksploatacji turbin parowych mogą również znaleźć zastosowanie w innych dziedzinach, np. w inżynierii chemicznej, procesach suszenia, zraszania. Nową sferą zastosowań stają się ostatnio problemy inżynierii reaktorowej.

W Pracowni Termodynamiki Przepływów Wielofazowych prace realizowane w temacie 05.1 problemu MR I.26 koncentrowały się wokół 3 głównych problemów:

- zagadnień termodynamiki nierównowagowych przepływów par wilgotnych,
- zagadnień wymiany międzyfazowej w parach wilgotnych, oraz
- zagadnień eźektorów parowych.

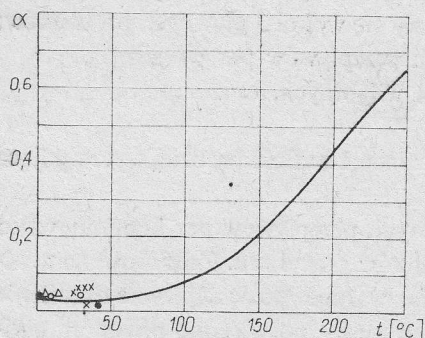
Przytoczone tu informacje oparto na [5], gdzie można też znaleźć bardziej wyczerpujące ujęcie sprawozdania.

Wśród zagadnień termodynamiki nierównowagowych przepływów par kontynuowano badania poświęcone powstawaniu krytycznych warunków przepływu. Zdefiniowano zróżnicowane pojęcia maksymalnej przelotności gazów oraz warunki pozwalające na określenie krytycznych przekrojów kanałów [34 - 38]. Szczególną uwagę poświęcono metodom obliczeniowym. Dla nierównowagowego przepływu o dużej szybkości ekspansji udało się na drodze teoretycznej potwierdzić, znaną z badań eksperymentalnych, konieczność poprawki współczynników przelotności kanałów rzędu 2 - 4% w stosunku do analogicznego procesu równowagowego [34, 39, 37, 40]. Zajmowano się też związkami między krytycznymi prędkościami przepływu a prędkością rozprzestrzeniania się słabych zaburzeń [34 - 36] oraz szczegółowym przeglądem strat termodynamicznych spowodowanych istnieniem procesów wymiany międzyfazowej i strat relaksacji [34, 38].

Wśród zagadnień wymiany międzyfazowej w parach wilgotnych rozwijano nadal metody obliczeniowe wymiany ciepła i masy z kroplami fazy ciekłej. Procesy te mają istotny wpływ na specyficzne cechy przepływu nierównowagowego par wilgotnych, nie są jednak ciągle jeszcze dostatecznie zbadane. Krople i ich otoczenie traktowane były jako układy termodynamiczne poddane wymuszeniom zewnętrznym o skończonej prędkości. W rozważaniach uwzględniono m. in. równoczesne występowanie różnych mechanizmów wymiany, niestacjonarności pól temperatur w poszczególnych fazach czynnika, sprzężenie między różnymi rodzajami wymiany i inne. Modele opracowywano z uwzględnieniem występowania bardzo szybkich przemian kondensacji lub odparowania kropeł [41 - 46]. Zajęto się też adaptacją opracowanych modeli wymiany międzyfazowej na przypadek kondensacji błonowej. Wskazano na konieczność wprowadzenia korekt do klasycznego modelu Nusselta wynikających, przy krańcowych szybkościach kondensacji, z efektów nierównowagowych w środowisku parowym nad cienką warstwą cieczy, zawierającym drobne krople [47, 48].

Istotne znaczenie dla tych zjawisk mają problemy kinetyki przemian fazowych na powierzchni rozdziału. Wpływ ten na ogół uwzględnia się za pomocą tzw. współczynników kondensacji i akomodacji. Przez odpowiedni dobór tych współczynników można z powodzeniem symulować numerycznie każdy proces szybkiej przemiany fazowej. Ale znajomość tych współczynników nie jest wystarczająca, błędy w ich ocenie są główną przyczyną niedokładności obliczeń. Przegląd wyników prac doświadczalnych i warunków wykonywania tych doświadczeń pozwolił określić ich wpływ na występujące tu rozbieżności w wartościach tych współczynników [49]. Opierając się na przybliżonym rozwiązaniu równań Boltzmanna dla obszaru nad powierzchnią rozdziału przedstawiono metodę wyz-

naczania wypadkowych strumieni wymiany i występujących sprzężeń [50, 51, 46], natomiast opierając się na modelu struktury molekularnej powierzchni cieczy opracowano zupełnie nową metodę obliczania współczynników kondensacji [46, 50, 52] (rys. 5).



Rys. 5. Zależność współczynnika kondensacji wody od temperatury. Linia ciągła — wyniki własnego modelu obliczeniowego. Punkty — z eksperymentów innych autorów wykonanych na płaskim zwierciadle wody (wg [51])

Prace pracowni skupiające się wokół zagadnień eżektorów parowych sprowadziły się do opracowania wspomaganej komputerowo metody projektowania (wymiarowania) takich urządzeń. Oparto się tu na modelu równowagowego przepływu wielofazowego i wieloskładnikowego (woda — powietrze) [53]. Opracowano efektywne algorytmy i programy; doprowadzono do wykorzystania ich w praktyce Biura Konstrukcyjnego Turbin ZAMECHu. Otwarty pozostaje problem opracowania zasad obliczania urządzeń eżektorowych przy zadanej geometrii (w zmiennych warunkach) pilnie oczekiwany przez BKT ZAMECH. W toku są dalsze prace doskonalące i weryfikujące modele obliczeniowe [54, 55].

Wśród innych prac pracowni warto wskazać na badania nieliniowych procesów przewodzenia ciepła związanych z szybkimi procesami przemian termodynamicznych [56, 57] oraz na prace związane z prognozami rozwoju tematyki badawczej termodynamiki par w zagadnieniach cieplnoprzepływowych turbin i urządzeń kondensacyjnych [58].

W Pracowni Dynamiki Przepływów Dwufazowych prace realizowane w temacie 05.2 problemu MR I.26 koncentrowały się wokół 3 głównych problemów:

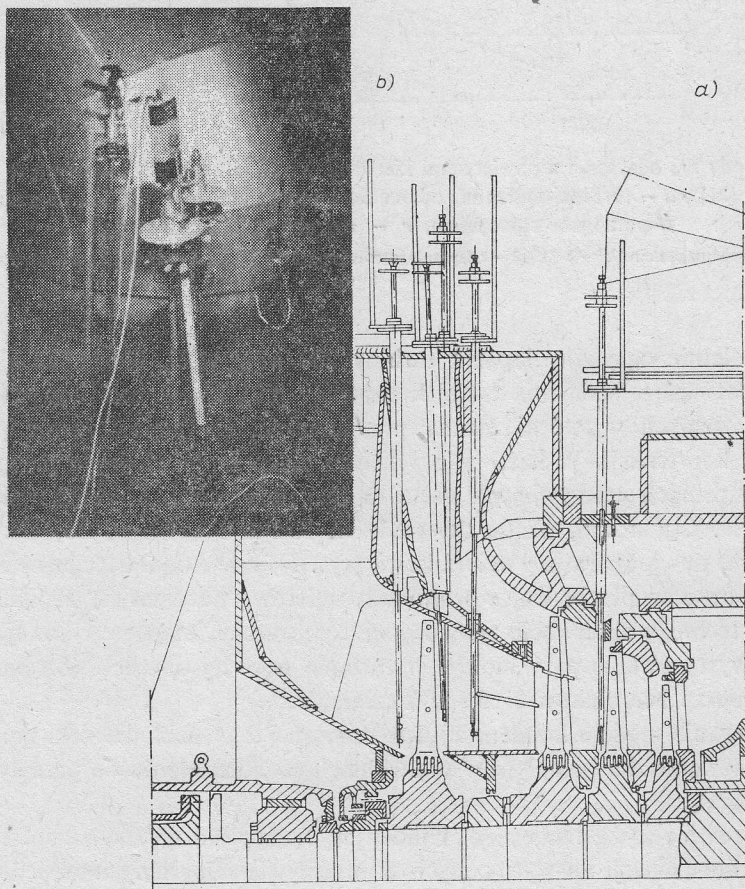
- rozbudowy i weryfikacji modeli kondensacji pary w przepływach,
- wybranych problemów metrologii przepływu czynników dwufazowych oraz
- badań przepływu pary mokrej w realnych turbinach.

W tym świetle nazwa tematu 05.2 „Badanie przepływu pary w podwyższonych parametrach” miała raczej symboliczne znaczenie. Istotnie, w drugiej części okresu sprawozdawczego pojawiły się nowe zainteresowania pracowni.

Przed 1975 r. w pracach Puzyrewskiego wskazano na pewne osobliwości ekspansji pary przy podwyższonych ciśnieniach. Wiązały się one z charakterystycznymi zmianami ciepła właściwego i utajonego ciepła parowania cieczy przy ciśnieniach 3 - 4 MPa. Badania w opisywanym okresie prowadzono w kierunku opracowania nowych algorytmów obliczania parametrów przy ekspansji w dyszy de Laval'a z uwzględnieniem osobliwości w najwęższym przekroju dyszy i właściwości pary jako gazu rzeczywistego [59, 60]. Zajęto się również przypadkiem kondensacji w przepływie poddźwiękowym. Proces nukleacji fazy ciekłej w takim przepływie, odstępstwa od stanów równowagowych i głębokość ewentualnych przechłódzeń, budzą z punktu widzenia techniki turbinowej zainteresowanie. Istotnie, bowiem w wielu rozwiązaniach konstrukcyjnych, a w szczególności w dużym obszarze

obciążeń nienominalnych układu łopatkowego; należy oczekiwać występowania przemian fazowych w warunkach poddźwiękowych, przy powolnej ekspansji. Zadanie opracowano częściowo. Zakładano bowiem określony stan pary mokrej na początku kondensacji przypisując fazie ciekłej określony wielkością kropeł stopień dyspersji [61, 62]. Badano wpływ wielkości tych kropeł, wartości ciśnień początkowych i szybkości ekspansji na przebieg procesu. Przeprowadzono obliczenia porównawcze wykorzystując model wzrostu kropeł Konorskiego. Wartościowe badania, pośrednio związane z tematem, poświęcono przepływowi pary mokrej w warstwie przysiennej [63, 64].

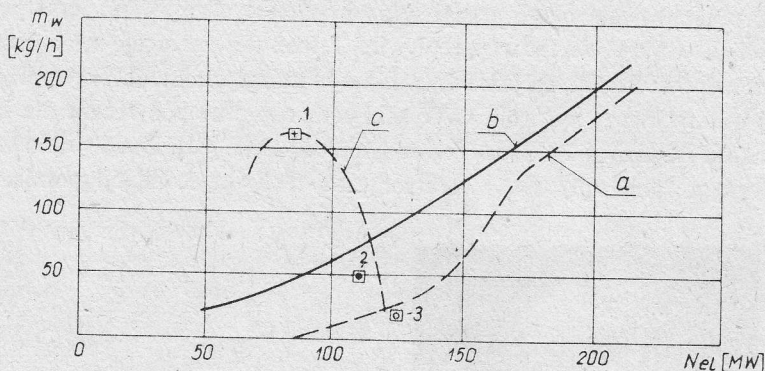
Spośród problemów metrologii przepływów dwufazowych wybrano tematykę pomiaru grubości cienkich warstw cieczy w przepływie. Temat ten zasługuje na zainteresowanie ze względu na niepowodzenia, na jakie natrafiono w ubiegłych latach przy próbie pomiaru (diagnostyki) warstw cieczy w turbinie. Wyniki będą zapewne pożyteczne dla innych prac Zakładu Dynamiki Gazów i Zakładu Termodynamiki IMP [65]. Zbudowano stoisko doświadczalne, opracowano optyczną i elektroniczną technikę korelacji pomiaru grubości



Rys. 6. Pomiary i wizualizacja przepływu pary mokrej w części NP turbiny 13 K 215 w elektrowni Kozienice (wg [71]); a) rozmieszczenie sond i wzierników w ostatnim stopniu i przed stopniem Baumana turbiny, b) sonda i wziernik z kamerą telewizyjną na korpusie części NP turbiny

warstwy, uzyskano interesujące wyniki dla różnych konfiguracji. Praca jest w toku [66, 67].

Istotne znaczenie dla uszlachetnienia wiedzy o przepływie pary z kondensacją może mieć program prac związanych z badaniem tych zjawisk w turbinach rzeczywistych. Impulsem do uruchomienia tych badań była potrzeba zbadania skuteczności działania tarcz powłokowych z odsysaniem wody z powierzchni łopatek kierowniczych. Konstrukcję taką, opartą na patencie Szewalskiego wylansowano w pierwszej połowie lat siedemdzie-



Rys. 7. Ilość wody m_w odsysanej z powierzchni kierownicy o łopatkach powłokowych w funkcji mocy turbiny N_{el} (wg [71]); *a* – turbina nagrzana, odsysanie samoczynne, *b* – turbina nagrzana, odsysanie wspomagane smoczkiem, *c* – rozruch ze stanu zimnego

1 – odsysanie ze wspomaganie ($2^{10} - 2^{30}$ h), 2 – odsysanie samoczynne ($3^{10} - 3^{31}$ h), 3 – odsysanie z częściowym wspomaganie ($4^{20} - 4^{31}$ h)

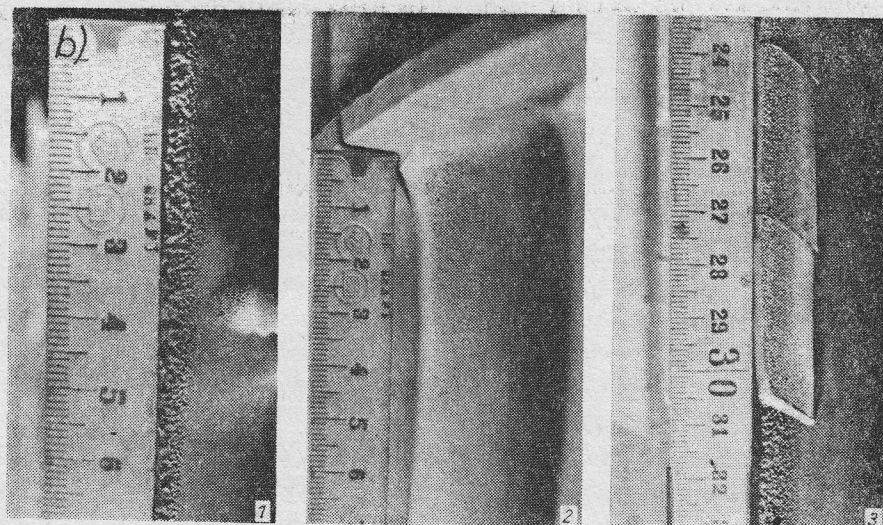
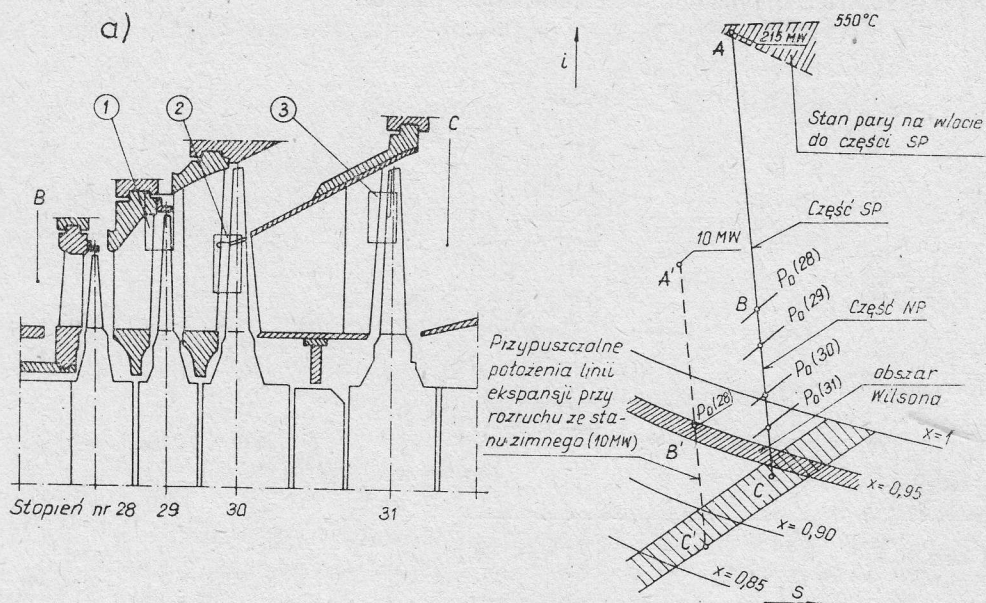
siątych. Wieloletnie oględziny łopatek turbiny 200 MW w el. Kozienice nie wykazały wprowadzie skutecznego działania takiej kierownicy [69], ale wobec licznych notatek literaturowych różnych wytwórni można przypuszczać, że niepowodzenie polegało na niedojrzałości konstrukcji. W każdym przypadku polepszanie wiedzy o przepływie dwufazowym w turbinach rzeczywistych może tu być pożyteczne. Marcinkowski podjął te trudne badania. Opracował, na tle doświadczeń Krzyżanowskiego, Świącha i Weigle'a z lat ubiegłych, nową aparaturę wziernikową (rys. 6), udoskonalił technikę i lokalizację pomiaru parametrów przepływu, wprowadził częściową automatyzację zapisów tych pomiarów oraz technikę obserwacji telewizyjnej i rejestracji magnetowidowej. Stwierdził obiektywnie występowanie pary mokrej w turbinie powyżej obszaru Wilsona. W swych badaniach zmierza Marcinkowski do wykazania, że:

- zastosowanie modelu kondensacji spontanicznej z przechłodzeniem pary ma ograniczone zastosowanie dla przepływów w turbinach (w odróżnieniu do przepływów w dyszach de Laval),

- występowanie „przedwczesnej” kondensacji przypisać można m. in. efektom heterogenicznej kondensacji na wytrąconych w przepływie mineralnych zanieczyszczeniach pary,

- większe zaś niż dotychczas znaczenie przypisywać należy w procesie erozji układów łopatkowych skutkom częściowych obciążeń (rys. 7).

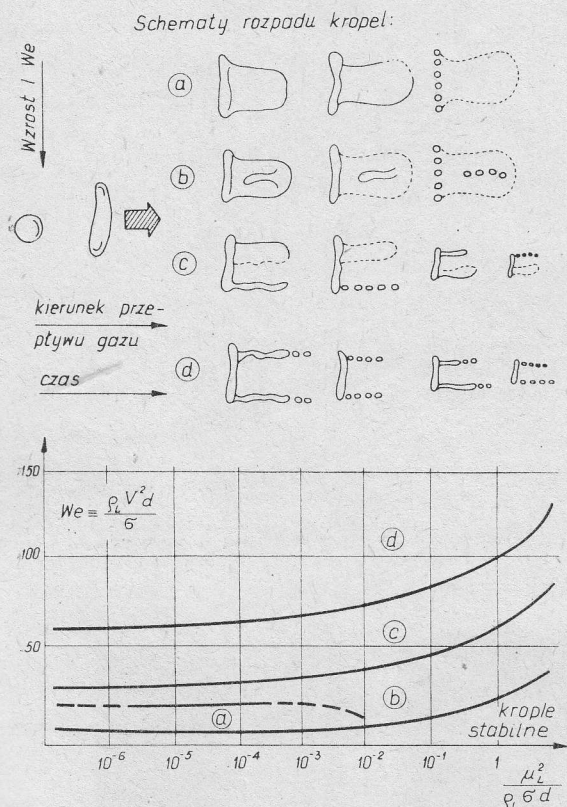
Liczne dyskusje na ten temat i dawniejsze wyniki obserwacji erozji Krzyżanowskiego i Weigle'a (rys. 8) doprowadziły do wniosku patentowego [68]. Niektóre wyniki prac Marcinkowskiego przedstawiono w [70, 71]. Opracowano oryginalną metodę rejestracji efektów erozji [72]. Liczne dyskusje Marcinkowskiego z kolegami z Zespołu Badań Eroзии wzbogacają wzajemnie programy badań [91] i wiedzę w dziedzinie erozji turbin.



Rys. 8. Erozja łopatek wirnikowych 3 ostatnich stopni turbiny 200 MW (b) oraz linii ekspansji pary w tych stopniach dla pełnego obciążenia; podano również przypuszczalne położenie linii ekspansji dla wybranych warunków rozruchu turbiny ze stanu zimnego; zaznaczono położenie obszaru Wilsona (a) (wg [91, 92])

W Zespole Badania Erozji prace realizowane w temacie 05.3 problemu MR I.26 koncentrowały się wokół 2 głównych problemów:

- zbadania rozpadu kropeł w przepływie i struktury trumienia kropeł w śladach aerodynamicznych oraz
- zbadania skutków oddziaływania erozji na ubytek materiału (erodowanych łopatek) i na właściwości aerodynamiczne zerodowanych palisad.

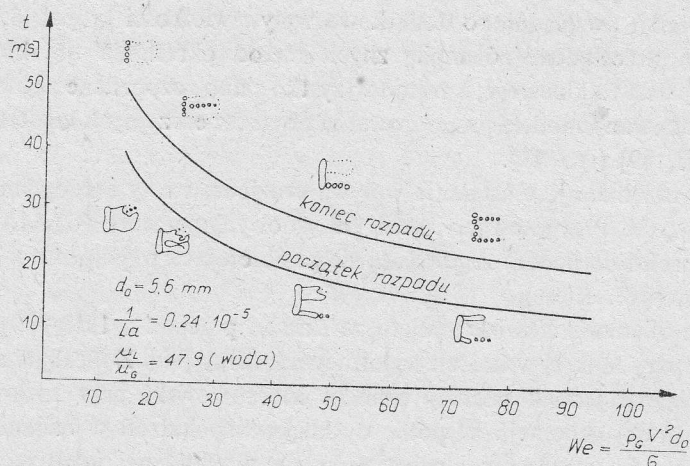


Rys. 9. Mechanizm rozpadu kropeł w funkcji liczby Webera i Laplace'a (wg [78])

W istocie oba problemy były ściśle związane: pierwszy bowiem determinuje ruch kropeł w szczelinie międzywieńcowej stopnia turbinowego i jest podstawą do doskonalenia metody IMP PAN prognozowania erozji łopatek turbinowych, rozwijanej w drugim problemie. Starsze badania IMP PAN wskazały na nikły wpływ zniszczeń erozyjnych na dynamiczną charakterystykę łopatek i ich wytrzymałość kinetostatyczną. Podjęto więc badania nad wpływem erozji na charakterystykę aerodynamiczną palisady. Otwarty pozostaje wpływ korozji-erozji na przebieg zniszczeń łopatek [73].

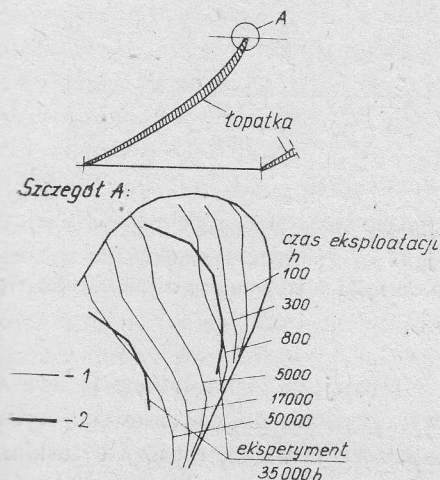
Opisano i uogólniono warunki i typy rozpadu indywidualnych kropeł w przepływie [74, 75] (rys. 9). Określono wpływ liczby Webera, liczby Laplace'a i stosunku lepkości μ_{ciecz}/μ_{gaz} na czas rozpadu kropli. Zbadano eksperymentalnie strukturę strumienia kropeł w śladzie aerodynamicznym w przepływie pary mokrej za płaską płytką; dla warunków zbliżonych do przepływów pary w ostatnich stopniach turbin ustalono zależność krytycznej liczby Webera rozpadu kropeł od liczby Macha [76 - 78] (rys. 10). Wyniki wspólnych

prac z University of Michigan i University of Delaware, także w zakresie badań stabilności filmu [79] podsumowano w [80]. Okazało się, że budowa stoiska doświadczalnego w Michigan (USA) i wspólne badania z partnerem z Delaware (USA) dały pożyteczne rezultaty.



Rys. 10. Mechanizm i czas rozpadu kropli w funkcji liczby Webera (przepływ: woda/para mokra, liczba Laplace'a = const, początkowa wielkość kropli d_0 stała) (wg [78])

Eksperymenty Krzeczowskiego tak w zakresie badań struktury strumienia kropli w śladzie aerodynamicznym, jak i wnioski na temat maksymalnej stabilnej wielkości kropli w śladzie [81], stanowią wartościowy materiał do weryfikacji nowych modeli teoretycznych ruchu kropli w szczelinie międzywieńcowej stopnia. Zainicjowano te prace na nowo we współpracy z BBC-Baden (1975). Zajęto się tam szacowaniem prawdopodobieństwa koagulacji kropli pierwotnych mgły parowej z kroplami wtórnymi w śladzie aerodynamicznym (Weigle). Prace te rozwinęto i opracowano wspomniany, nowy dwuwymiarowy model ruchu kropli w szczelinie [82, 83]. Teoretycznie uzasadniono co najmniej bimodalną strukturę strumienia kropli w śladzie.



Rys. 11. Zestawienie prognozy erozji łopatki z wynikami rejestracji stanu zniszczenia 2 łopatek wirnikowych ostatniego stopnia turbiny 200 MW (wg [Z. Szprengiel])

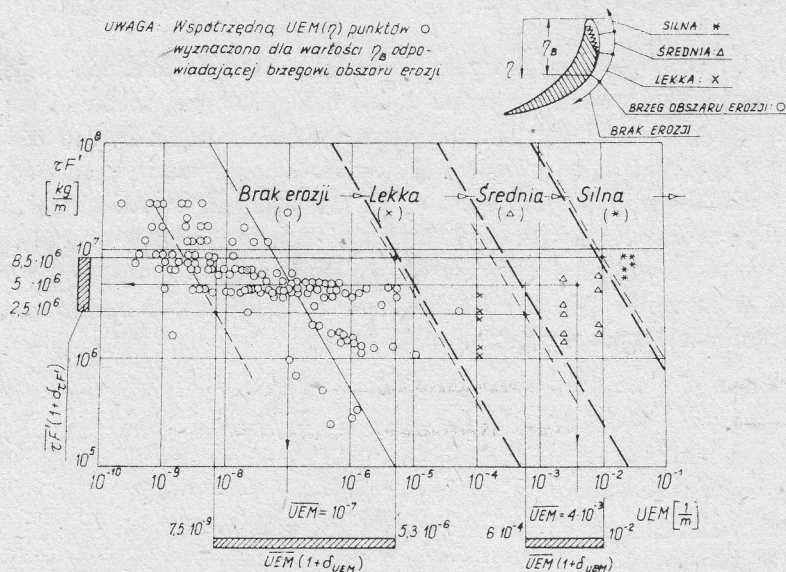
1 – prognoza dla wzrastającego czasu erozji, 2 – pomiar rzeczywistego stanu erozji dla 2 łopatek tego samego wieńca

Badania nad ruchem kropeł w śladzie aerodynamicznym wykorzystano do opracowania nowych modeli erozji łopatek. W [84] oparto się na koncepcji 2-wymiarowego strumienia kropeł. Prace te są w toku.

Znaczny wysiłek poświęcono dalszemu doskonaleniu kryterium zagrożenia erozją. W nowej jego wersji uwzględniono dodatkowo wpływ wielkości kropeł [85]. Pracowano nad krytycznym przeglądem półempirycznych metod określania ubytków erozyjnych w czasie [86, 87]. Jest to kluczowe, a mimo wszystko słabo rozpoznane zagadnienie. Opracowano i zweryfikowano modele prognozowania ubytków erozyjnych łopatek turbinowych w czasie [85, 88, 89] (rys. 11).

Otwartym problemem jest ustalenie wpływu erozji na straty aerodynamiczne w palisadach wirnikowych. Przygotowano tunel palisadowy, aparaturę (CAMAC) i palisady zerodowanych profili do badań. Zapowiada się tu obiecująca współpraca z TU Hannover (prof. Bammert, prof. Riess).

Dla lepszego zbadania zjawisk podjęto, w ślad za pracami z 1969/70, próbę wizualizacji przepływu pary mokrej w króćcu wylotowym turbiny [90]. Z niezbyt zadowalających rezultatów wyciągnął jednak później wnioski Marcinkowski przy budowie aparatury wizualizacyjnej nowej generacji. Wspólne dyskusje, współudział w badaniach w Kozienicach, eksploatacja algorytmów i programów do przybliżonej lokalizacji kondensacji



Rys. 12. Wpływ błęd w określaniu: ilości wody uczestniczącej w erozji jednostek łopatki w jednostce czasu (δ_F), oraz wartości parametrów zagrożenia erozją (δ_{UEM}) (odchyłki technologiczne wykonania łopatek, błędy w ocenie struktury strumienia kropeł) na odchyłki w stopniu zagrożenia łopatek erozją (wg [91])

w przepływie (Wajnikonis, Krzyżanowski), nowe informacje na temat ilości wody uczestniczącej w procesie erozji łopatek (patrz rys. 7), wykorzystanie dotychczasowego dorobku w zakresie metod prognozowania erozji, skutecznie rozwija wiedzę o erozji w turbinach.

Pozwoliło to również na nowo zinterpretować dotychczasowe wyniki [91] (rys. 12). Nowe spojrzenie na problemy przepływu pary mokrej w turbinach podsumowano także m. in. w [89, 92, 113].

4. Wybrane zagadnienia aerodynamiki maszyn przepływowych

W opisywanym okresie, wraz z rozszerzającym się zainteresowaniem przemysłu maszynowego rozwojem maszyn przepływowych (turbin — ZAMECH, sprężarek, turbin gazowych — WSK Rzeszów), rozszerzył się krąg prac Zakładu na nowe zadania. Wśród nich wyróżnić należy:

- wybrane zagadnienia przepływu transsonicznego przez palisady i stopnie,
- problemy optymalizacji stopni turbinowych,
- badania przepływu (pary mokrej) przez rzeczywiste maszyny.

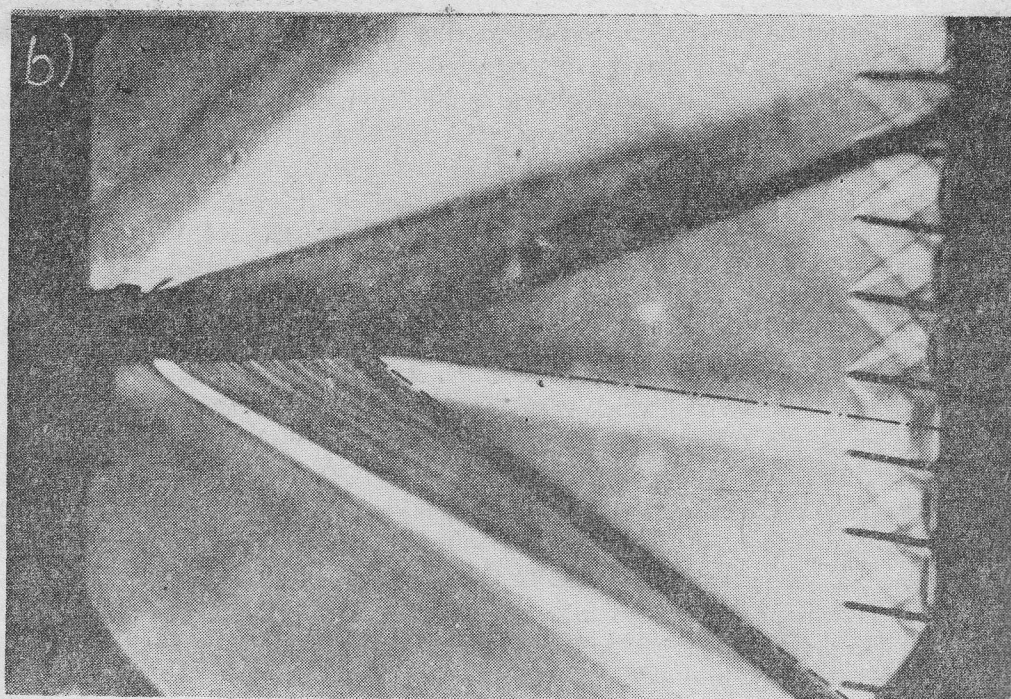
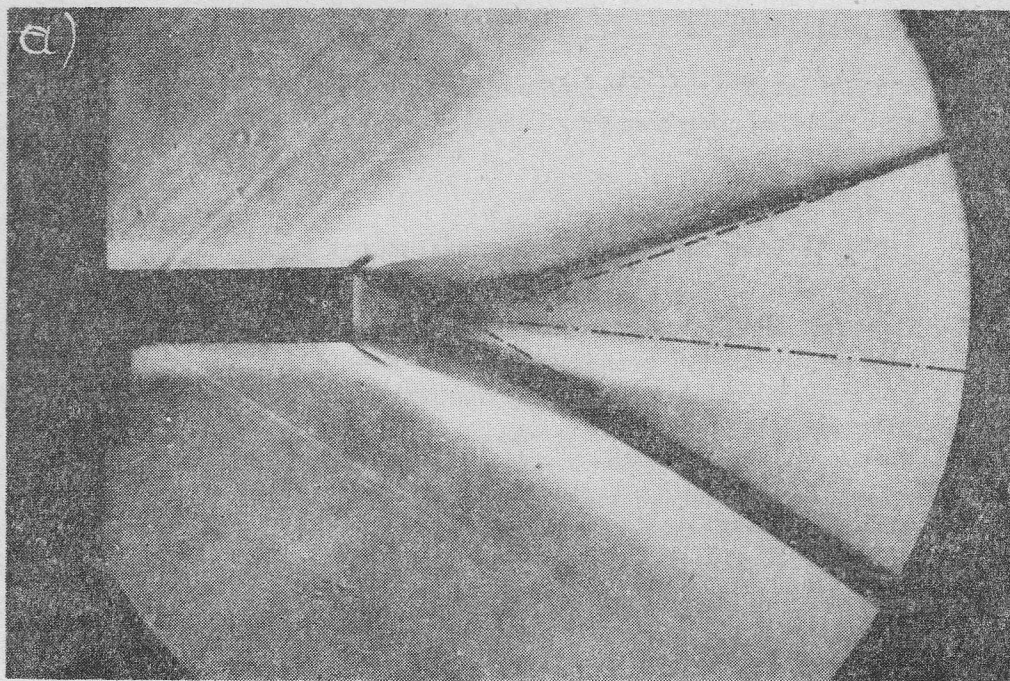
Doskonalenie przepływu przez ostatnie stopnie turbin parowych dużej mocy skłania do zwrócenia uwagi na przepływy transsoniczne przez palisady słabo i silnie odchylających profili. Wiedza w kraju na temat takich przepływów jest stosunkowo słabo rozwinięta.

Dla pozyskania jakościowych informacji przeprowadzono w pracowni prof. Puzyrewskiego badania serii palisad mało odchylających, transsonicznych, wierzchołkowych profili wirnikowych na stanowisku analogii hydrodynamicznej [93]. Silne efekty kapilarne i falowe na powierzchni płytkiej warstwy wody skłoniły do zajęcia się bliżej określeniem analogii między skośną falą dyspergowaną na płytkiej wodzie a falą uderzającą w gazie. Badania opływu klina potwierdziły opinię o jakościowym charakterze badań przepływu transsonicznego przez palisady za pomocą analogii hydrodynamicznej. Okazało się, że przy liczbach Froude'a (Ma) $\cong 1$ rozbieżności są tu znaczne. Niezłe zgodności otrzymuje się dopiero przy liczbach Froude'a $\cong 2$, nieinteresujących z punktu widzenia przepływów palisadowych. Wnioski zebrano w pracy doktorskiej [94, 96].

Również w wannie analogowej rozpoczęto badania nad kształtowaniem krawędzi spływu zmierzającym do osłabienia efektów falowych. Problem opływu krawędzi spływu przepływem transsonicznym jest obszernie reprezentowany w literaturze. Badania prowadzone są najczęściej w tunelu aerodynamicznym. Badania serii 5 różnych konfiguracji geometrycznych w tunelu naddźwiękowym WAT oraz obliczenia teoretyczne zdają się wskazywać na pewne możliwości ograniczenia efektów falowych za krawędzią spływu [97, 98] (rys. 13).

Zwiększenie obciążenia aerodynamicznego stopni wyostrza problem stosownego doboru profili kierowniczych i wirnikowych stopnia turbinowego i sposobu ich ustawienia w palisadach. Zainteresowanie ZAMECHu takimi stopniami zachęciły do badań optymalnego kojarzenia profili w stopniu. W opisywanym okresie jako funkcję celu optymalizacji przyjęto prostą zależność typu Banki. Proceder optymalizacji oparto na metodach programowania nieliniowego [99, 100]. Praca jest w toku.

W zespole doc. J. Dądzisza podjęto po raz pierwszy w kraju badania przepływu przez rzeczywiste maszyny. Chodziło tu o część niskoprężną turbin 200 MW w siłowni Turów i Kozienice. Były co najmniej 2 powody podjęcia tych badań:



Rys. 13. Wpływ kształtu krawędzi spływu na intensywność zjawisk falowych za krawędzią (wg [98]);
a) krawędź prostościęta — duże intensywne fale uderzeniowe, b) krawędź zaokrąglona — rozmyte efekty
falowe, dobra zgodność eksperymentu z wynikami obliczeń opartymi na modelu płynu idealnego

— zebranie materiału eksperymentalnego do weryfikacji metod obliczania przepływu przez stopnie turbinowe o zadanej geometrii,

— zebranie materiału doświadczalnego dla lepszej interpretacji ruchu pary mokrej i mechanizmów erozji w rzeczywistych maszynach.

Oba zagadnienia budziły żywe zainteresowanie ZAMECHu. Wyniki trudnych badań opisano łącznie w 10 opracowaniach wewnętrznych Instytutu. Fragment ich podsumowano w [101]. Niestety badania dotąd nie spełniły oczekiwanych nadziei. Nie udało się uzyskać ich zadowalającej wiarygodności. W szczególności niezgodność bilansu przepływu pary przez zewnętrzny strumień stopnia Baumana i przekroje kontrolne ostatniego stopnia (w szczelinie międzywieńcowej i za stopniem) z pomiarem kondensatu była główną przyczyną braku zaufania do uzyskanych wyników. Sugerowano by w dalszych badaniach zająć się układem łopatkowym bez stopnia Baumana, dokładniej wycechowaną aparaturą do pomiaru ciśnień i automatyczną rejestracją pomiaru. W toku udoskonalania aparatury opracowano technikę teflonowania wnętrza przewodów impulsowych sond dla uniknięcia zalewania wodą [102].

Początkowo w zespole doc. J. Dudzisa a następnie w zespole dr J. Prokopowicza podjęto w 1976 r. szeroko zakrojone badania nad opracowaniem i wdrożeniem do praktyki przemysłu lotniczego nowoczesnych metod obliczania silników turbospalinowych oraz opracowaniem silnie obciążonego stopnia transsonicznej sprężarki osiowej. Realizację tego trudnego zadania prowadzono ze środków Sekretarza Naukowego PAN (MR I.26) i na podstawie wieloletniej umowy o współpracy z OBR Napędów Lotniczych WSK Rzeszów. W zadaniu tym uczestniczyły zresztą oprócz Zakładu Dynamiki Gazów również Zakład Dynamiki Maszyn oraz Instytut Silników Spalinowych i Teorii Maszyn Ciepłych Politechniki Poznańskiej (osobne zadanie dotyczące rozwoju promieniowych stopni sprężających opracowywano w Instytucie Maszyn Przepływowych Politechniki Łódzkiej).

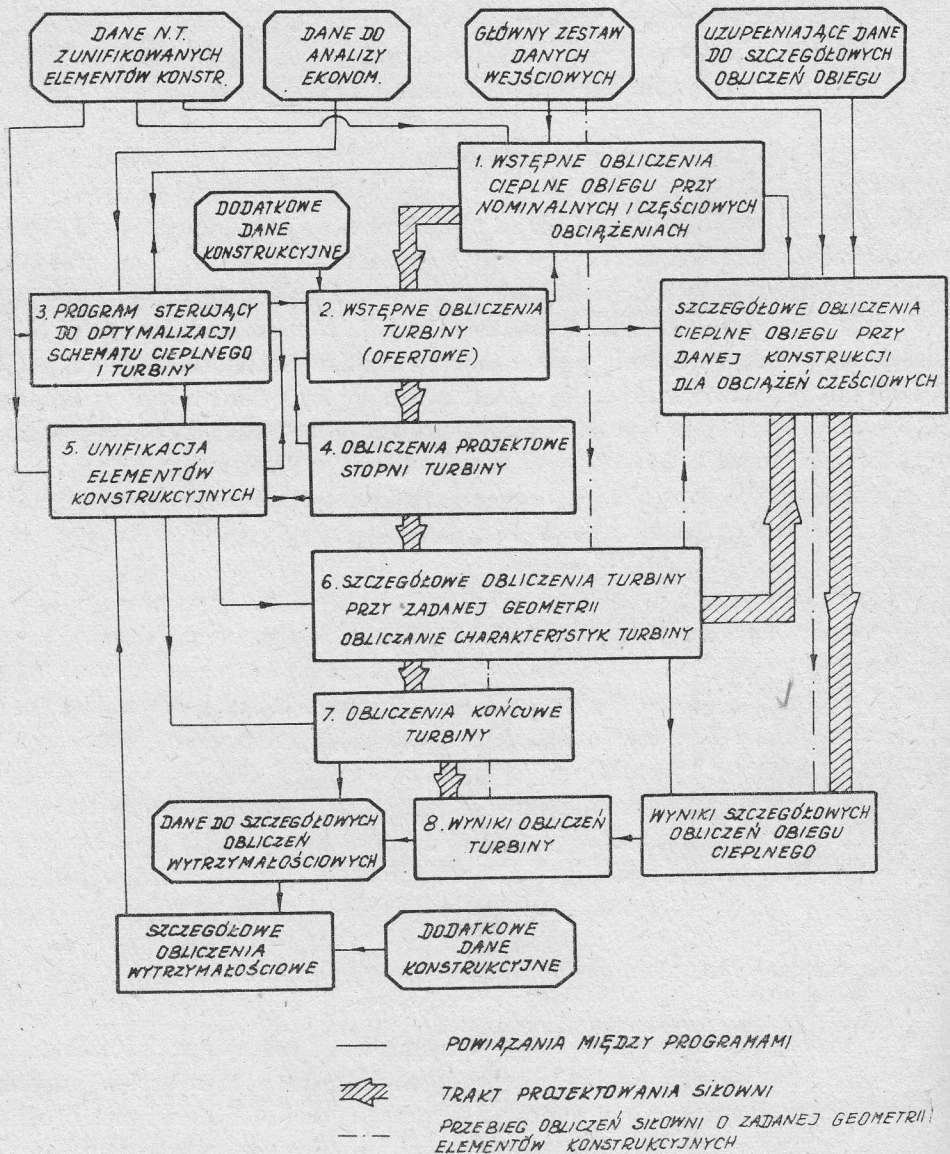
W opisywanym okresie przekazano WSK pakiet około 11 algorytmów i programów obliczeń przepływu przez palisady łopatkowe, stopnie turbinowe i grupy stopni oraz właściwości fizycznych powietrza i spalin. W 1977 r. podjęto prace nad skonstruowaniem i zbadaniem silnie obciążonego stopnia sprężarki transsonicznej. Zadanie, obejmujące obliczenie, projekt stopnia i konstrukcję stoiska badawczego, opracowywano wspólnie z ISS i TMC-PP. Szczegółowy opis zakresu prac przedstawiono w [103, 104]. Ostatnio rozwijają się metody numerycznej mechaniki płynów w zastosowaniu do przepływów transsonicznych. Chodzi tu o adaptację metody kroku czasowego do obliczania przepływów przez palisady łopatkowe. Fragment dorobku z dawniejszych lat przedstawiono w [105 - 107].

5. Wspomagane komputerowo metody projektowania turbin i obiegów ciepłych

Rozwój przemysłu turbinowego i jego osiągnięcia eksportowe w zakresie maszyn konstrukcji krajowej zwróciły ok. 1975 r. uwagę na konieczność opracowania szybszych i trafniejszych metod projektowania turbin. W szczególności dokładność metod obliczeniowych nie jest zadowalająca. Pouczające zestawienie obliczeń i wyniki pomiarów dla kilku turbin opracował po raz pierwszy inż. E. Błażko. Skromnie przedstawia się również

zasób danych doświadczalnych. Na tle tych potrzeb, w ścisłym porozumieniu z BKT ZAMECH opracowano koncepcję komputeryzacji obliczania turbin i obiegów cieplnych. Przedstawiono ją m. in. w [108 - 110], rys. 14. Szeroko zakrojone zadanie obejmuje oprócz

- projektowania nowej maszyny i obiegu cieplnego, oraz
- obliczania ich przy zadanej geometrii („zmiennie warunki ruchu”), także liczne zadania towarzyszące, jak:
- optymalizację konstrukcji stopni pojedynczych i grup stopni (ew. oparte na wspom-



Rys. 14. Schemat blokowy programów projektowania turbin i obiegów cieplnych (wg [108 - 110])

nianych wyżej zasadach optymalnego kojarzenia wieńców łopatkowych metodą programowania nieliniowego),

- optymalizację schematów cieplnych obiegów energetycznych,
- zasady i wyniki unifikacji zasadniczych węzłów konstrukcyjnych turbin i układów łopatkowych (katalog charakterystyk stopni zunifikowanych),
- szybka kontrola wytrzymałościowa i dynamiczna najważniejszych węzłów konstrukcyjnych.

Prace są w toku — część programów obliczeniowych opracowano, aktualnie ma miejsce wdrażanie ich do praktyki BKT ZAMECH. Znaczący udział ma tu grupa placówek uczestniczących w tej pracy: Instytut Okrętowy Politechniki Gdańskiej, Instytut Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej, Instytut Techniki Ciepłej w Łodzi, Instytut Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej i BKT ZAMECH. W Instytucie Maszyn Przepływowych PAN, jak już wspomniano, temat realizowany jest w nieformalnym zespole międzyzakładowym utworzonym z kolegów Zakładu Dynamiki Gazów i Ośrodka Obliczeniowego IMP.

Tabela 2

Zestawienie ważniejszych kompleksów prac Zakładu wykonywanych na zlecenie przemysłu w latach 1976-1980

Lp.	Temat	Odbiorca
1	Doskonalenie techniki pomiarów przepływu pary w stopniach turbinowych w warunkach naturalnych (doc. J. Dudzisz)	ZAMECH
2	Prace rozwojowe nad typoszeregiem nowych stopni dla części niskoprężnej turbin kondensacyjnych i ciepłowniczych (prof. J. Krzyżanowski)	ZAMECH
3	Opracowanie algorytmów i programów wspomagane komputerem projektowania turbin i obiegów cieplnych (praca zespołowa z udziałem placówek szkolnictwa wyższego i przemysłu) (prof. J. Krzyżanowski)	ZAMECH
4	Opracowanie nowych, wysokosprawnych stopni akcyjnych na duże spadki entalpii (praca zespołowa j.w.) (prof. R. Puzyrewski)	ZAMECH
5	Badania skuteczności działania łopatek powłokowych z odysaniem fazy ciekłej z przepływu pary mokrej (prof. R. Puzyrewski)	ZAMECH
6	Opracowanie algorytmu i programu projektowania eżektorów parowo-powietrznych (doc. A. Konorski)	ZAMECH
7	Opracowanie pakietu i programów projektowania turbin gazowych (dr J. Prokopowicz)	WSK-Rzeszów
8	Opracowanie projektu silnie obciążonego stopnia sprężarki osiowej (praca zespołowa z udziałem placówek szkolnictwa wyższego) (dr J. Prokopowicz)	WSK-Rzeszów
9	Prace rozwojowe nad opracowaniem indukcyjnych czujników ciśnienia (wspólnie z ZAMPAN) (doc. A. Żabicki)	Kilka laboratoriów badawczych
10	Różne ekspertyzy	Energetyka Zawodowa

Trwają prace nad doskonaleniem tych programów i łączeniem ich w samoorganizujący się system obliczeniowy. Znacznie skromniej rysuje się gromadzenie materiału doświadczalnego, który mógłby stanowić podstawę weryfikacji metod obliczeniowych. Widać jednak wyraźnie program działania.

6. Inne prace zakładu

W poprzednich rozdziałach, przedstawiając program i realizację prac Zakładu, wskazywano na powiązania podejmowanych tematów z potrzebami gospodarki narodowej. W opisywanym okresie związki te podkreślano silniej niż poprzednio. Kładziono nacisk na szerokie powiązanie tematów badań podstawowych, finansowanych przez Sekretarza Naukowego PAN w ramach problemu międzyresortowego MR I.26 z obszarem ich wykorzystania w tematyce interesującej przemysł. Wskazywano na to w rozdziale 1. Współpracę z przemysłem oparto po raz pierwszy na dwu dużych, wieloletnich umowach o współpracy Instytutu. Umowa ramowa o współpracy z elbląskim ZAMECHEm opiewała na kwotę ok. 50 mln. zł, zaś umowa z OBK NL-WSK Rzeszów na kwotę ok. 10 mln zł. Najważniejsze zadania, rozwijane harmonijnie z programem badań podstawowych, omówiono wyżej. W tabeli 2 zestawiono najważniejsze tematy tej współpracy.

7. Ważniejsze informacje organizacyjne

Przedstawiony tu kompleks prac Zakład realizował zespołem pracowników scharakteryzowanym w tabeli 3. W okresie 1975 - 80 3 pracowników uzyskało doktoraty. Mocno zaawansowanych jest kilka dalszych przewodów. Profesorowie i docenci Zakładu prowadzą

Tabela 3

Struktura zatrudnienia w Zakładzie Dynamiki Gazów w latach 1976 - 1980

Kadra Zakładu	1976	1977	1978	1979	1980
Profesorowie	2	2	2	2	2
Docenci	3	3	3	2	2
Adiunkci	4	4	4	5	6
St. asystenci	5	7	5	8	9
Asystenci	6	8	6	4	1
Stażyści	—	—	—	—	—
Prac inż. tech. (w tym laboranci)	14 (7)	8 (5)	10 (4)	9 (3)	10 (3)
Łącznie	34	32	30	30	30
w tym:					
ze st. dr	7	7	7	7	9
ze st. dr hab	2	2	2	2	2
z wyższym wyksz.	18	19	17	19	17

1. Stan zatrudnienia (podawany na 31.12) jest ilościowo stabilny z pewną tendencją zniżkową na początku pięcioletki.
2. Stopniowo wzrasta liczba zatrudnionych ze stopniem doktora (adiunkci).
3. Wzrasta też niestety liczba st. asystentów kosztem asystentów; jest to dość typowy objaw „starzenia” się stabilnej załogi.

4. Spadła niekorzystnie liczba laborantów; jest to jednym z symptomów przesuwania się Zakładu ku tematyce teoretycznej. Przy znacznym rozwinięciu się Ośrodka Obliczeniowego Instytutu i znanych w kraju narastających trudnościach w realizacji badań eksperymentalnych jest to tendencja dość powszechna w kraju, choć w dziedzinie nauk technicznych wyraźnie niekorzystna. W zakresie dyscypliny mechanika płynów wpływa ona poważnie na rozwój nowej jej dziedziny: numerycznej mechaniki płynów.

5. W listopadzie 1980 z Zakładu wyłoniono zespół, który przeszedł do utworzonej z pomocą Sekretarza Naukowego PAN Samodzielnej Pracowni Numerycznej Mechaniki Płynów pod kierunkiem prof. dr inż. W. Prosnaka, czł. koresp. PAN.

kilka doktoratów pracowników obcych Instytucji. Środowisko IMP zyskuje pozycję organizatora nauki w swej specjalności.

Strukturę organizacyjną Zakładu ilustruje tabela 4. Nazwy zespołów i pracowni podano już w rozdziale 1; liczebność Pracowni i Zespołów podano według stanu na grudzień kolejnych lat.

Tabela 4

Struktura organizacyjna Zakładu Dynamiki Gazów w latach 1976 - 1980

Lp.	Nazwa Zespołu lub Pracowni (kierownik)	Liczebność				
		1976	1977	1978	1979	1980
1	Pracownia Przepływów Nieustalonych (doc. A. Żabicki)	9	7,3 ¹	7	7	7
2	Pracownia Przepływów Dwufazowych (prof. R. Puzyrewski)	11	8,2	9	8,5	8,5
3	Pracownia Termodynamiki Przepływów Dwufazowych (doc. A. Konorski)	4	2,3	3	4	3
4	Zespół Badań Erozji (prof. J. Krzyżanowski)	3	3,2	5 ³	8,5 ^{2,3}	8,5 ^{2,3}
5	Pracownia Aerotermomechaniki Stopni i Maszyn Przepływowych (doc. J. Dudzisz do 1979)	7	7,6	6 ²	—	—
	Zespół Turbin Gazowych (dr J. Prokopowicz od 1979)	—	—	—	2 + zespół ZAMPAN	3 + zespół ZAMPAN
Łącznie		34	32	30	30	30

1. W tabeli podawano ułamkowe obsady pracowni uwzględniając fakt realizacji zadań przez niektórych pracowników w więcej niż jednej pracowni czy zespole.

2. W związku ze śmiercią doc. Dudzisz w 1979 r. nastąpiła reorganizacja pracowni Aerotermomechaniki; położono większy akcent na badania przepływów transsonicznych (dr Prokopowicz), część zespołu kontynuowała badania przepływu pary mokrej w rzeczywistych maszynach w składzie Zespołu Badań Erozji (prof. J. Krzyżanowski).

3. Wspomniana w tekście działalność zespołu międzyzakładowego w zakresie komputeryzacji projektowania turbin realizowana była Zespołem międzypracownianym Zakładu i Zespołem Ośrodka Obliczeniowego IMP (prof. J. Krzyżanowski). W tabeli uwidoczniono jedynie osoby ze składu Zakładu.

Warto wskazać na aktywny udział pracowników Zakładu w konferencjach krajowych i zagranicznych. Zestawiono je niżej, odwołując się do wykazu publikacji dla wskazania autorów referatów.

1. II Krajowa Konferencja Mechaniki Cieczy i Gazów. Jastrzębia Góra 1976 [8, 15, 41, 82, 85, 93].

2. IV Konferencja Miernictwa Dynamicznego. Inst. Lot. Warszawa 1976 [27, 31].

3. II Letnia Szkoła Termoanemometrii. Praha 1976 [30].

4. Sympozjum wymiany masy i ciepła, Komitet Termodynamiki i Spalania PAN, Jabłonna 1976 [47, 56].
 5. ASME Poliphase — Flow Symposium. Miami, USA 1976 [79].
 6. IX Kraftwerktechnisches Kolloquium, TU Dresden, Drezno, NRD 1977 [101].
 7. Sympozjum n.t. sprężarek przepływowych, SYMKOM—77. IMP — Politechnika Łódzka, Łódź 1977 [29].
 8. Steam Condensation in Flow, Euromech 88. Karlsruhe, RFN 1977 [42, 59, 64].
 9. Thermodynamics Group and Fluid Flow Convention, IME. Durham, England 1977.
 10. Advances in Two Phase Flow — Conference. Istanbul, Turcja 1977 [35].
 11. VDI Konferenz: Thermische Strömungsmaschinen. Düsseldorf 1977 [88].
 12. III Krajowa Konferencja Mechaniki Cieczy i Gazów. Częstochowa 1978 [9, 25, 75, 96, 97, 99].
 13. ASME — Gas Turbine Conference. New Orleans, USA 1976 [90].
 14. X Zjazd Termodynamiki. Wrocław 1978 [50].
 15. CHiSA Conference. Praha 1978 [43].
 16. II-nd Symposium on Shear Flow. London 1979 [11].
 17. XI Międzynarodowa Konferencja Mechaniki Płynów. Białejów 1979 [16].
 18. VII Krajowa Konferencja Metrologii i Budowy Aparatury. Warszawa 1979 [32, 66].
 19. Parni Turbiny Velkych Vykonů, Škoda. Plzeň, Czechosłowacja, 1979 [36, 61, 69, 108].
 20. V-th Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact, (ELSI V). Cambridge, England, 1979 [87].
 21. ASME — Winter Annual Meeting. Atlanta, USA, 1979 [J. Krzyżanowski, Prepared Discussion Statement on Desay-Paper].
 22. V Wiss. Konferenz Ing. Hochschule. Zittau, 1979 [92].
 23. Konferencja: Metody komputerowe w mechanice. Koszalin, 1979 [109, 110].
 24. IV Krajowa Konferencja Mechaniki Cieczy i Gazów. Burzenin, 1980 [13, 17, 18, 83, 98, 113].
 25. Konferencja „Problemy rozwoju i projektowania maszyn i urządzeń energetycznych”, (MR I.26 — Podsumowanie wyników). IMP PAN, Gdańsk, 1980 [6, 26, 71, 91, 95, 104].
 26. Sympozjum Przemian Energii 1980 (SPE — 80). IMP — Politechnika Łódzka, Łódź, 1980 [103].
 27. III-rd Symposium on Shear Flow. USA, 1980 [19].
 28. Symposium on Two-Phase Flow. CENG — Grenoble, Grenoble Francja, 1980 [60, 67, 111, 112].
- Na tle kontaktów konferencyjnych i umów o współpracy kształtuje się współpraca Zakładu z zagranicą; tradycyjnych partnerów wymieniono w [2, 4]. Nadal owocujące wspólnymi pracami są kontakty z:
1. Instytutem Technicznej Fizyki Ciepła UAN w Kijowie, ZSRR — w zakresie przepływów nieustalonych.
 2. University of Delaware, USA — w zakresie badań przepływów dwufazowych.
 3. University of Michigan, USA — w zakresie j.w.
 4. Universität Karlsruhe, RFN — w zakresie problemów kondensacji w przepływie.
 5. CENG Grenoble, Francja — w zakresie problemów przepływów dwufazowych.

8. Uwagi końcowe

Podsumowując opis prac i dorobku Zakładu w latach 1975 - 1980 można zaryzykować kilka ogólnych stwierdzeń.

Tematyka badań podstawowych Zakładu znajduje motywację w rozpoznanych lub oczekiwanych potrzebach gospodarki. Zasady organizacji badań skupionych wokół problemu międzyresortowego MR I.26 i wieloletnich umów ramowych z ZAMECHEm i WSK Rzeszów pozwoliły, po raz pierwszy w kraju, zebrać wokół zagadnień gazodynamiki maszyn przepływowych harmonijną współpracę szeregu placówek. Niemalą rolę spełniły tu też zacieśniające się więzi między placówkami zainicjowane krajowymi konferencjami mechaniki cieczy i gazów. Ważną rolę spełnia tu Sekcja Mechaniki Cieczy i Gazów Komitetu Mechaniki PAN.

Istotną pomocą w realizacji szeregu tematów była współpraca z Zakładem Doświadczalnym ZAMPAN Instytutu (w szczególności w zakresie konstrukcji stanowisk i budowy aparatury). Pożyteczne też były kontakty z zespołami ekspertów SIMP — prowadziły one do lepszego wykorzystania kadry inżynierskiej skupionej wokół SIMP tak w kole IMP PAN, jak i w ZAMECHu i siłowni Kozienice.

Charakteryzując ogólny kierunek prac badawczych Zakładu trzeba stwierdzić pewną tendencję chętnego podejmowania prac teoretycznych w miejsce eksperymentalnych. Kilka tu jest przyczyn:

- rosnące trudności w realizacji współczesnego eksperymentu,
- znaczne postępy w numerycznej mechanice płynów na świecie, która może podejmować się dzisiaj zadań niedostępnych dotychczas;
- dobre wyposażenie Ośrodka Obliczeniowego Instytutu.

Objaw ten niekoniecznie należy oceniać negatywnie. Wzrost poziomu wiedzy teoretycznej czy zainteresowań teoretycznych młodej kadry należy powitać z zadowoleniem. Znaczna nadzieja dla całego środowiska gdańskiego wiąże się tu z uruchomieniem i rozwojem Pracowni Numerycznej Mechaniki Płynów zorganizowanej w listopadzie 1980 r. w IMP PAN. Kieruje nią prof. W. Prosnak, członek PAN.

Udało się także utrzymać względnie rozszerzyć pewne gałęzie badań eksperymentalnych:

- prowadzi się unikalne prace eksperymentalne w dziedzinie przepływów nieustalonych i badań koherentnych struktur wirowych,
- powrócono do realizowania badań palisadowych i stopni w turbinie modelowej.

Te stare tradycje eksperymentalne odżywają w Zakładzie w nowej szacie z zastosowaniem automatyzacji badań (CAMAC) i użyciem EMC do opracowania wyników badań.

W nadchodzącym pięcioleciu zamierza się kontynuować prace badawcze Zakładu reprezentowane w tym sprawozdaniu. Skuteczną formą organizacyjną będzie tu zapewne program rządowy PR8: Kompleksowy rozwój energetyki.

Wykaz publikacji i opracowań

UWAGA: podany poniżej wykaz obejmuje publikacje pracowników Zakładu, a także ich wystąpienia referatowe na krajowych i zagranicznych konferencjach (dane o streszczeniach lub pełnych tekstach konferencyjnych) oraz niektóre ważniejsze opracowania wewnętrzne. Wykaz obejmuje 113 pozycji.

Poza tymi publikacjami pracownicy Zakładu opracowali około 84 powielanych opracowań wewnętrznych. Część z nich była lub będzie wykorzystana do opracowań zbiorczych, prac doktorskich itp.

Ponadto przygotowano ok. 126 powielanych opracowań zewnętrznych wykonanych na zamówienie zleceńodawców — sponsorów prac. Część z tych prac, za zgodą sponsora znalazła odbicie w publikacjach pierwszej grupy 113 pozycji.

Łączny dorobek zakładu obejmuje 325 pozycji publikowanych w różnej formie.

- [1] J. Krzyżanowski, *Przegląd działalności Zakładu Gazodynamiki*. Prace IMP, z. 32, 1966.
- [2] J. Krzyżanowski, R. Kozubowski, *Zakład Dynamiki Gazów*. [W:] *Działalność naukowa Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w latach 1966 - 1969*, PWN, Warszawa—Poznań 1970.
- [3] J. Krzyżanowski, *Zakład Dynamiki Gazów*. [W:] *Działalność naukowa Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w latach 1970 - 1972*. PWN, Warszawa—Poznań 1974.
- [4] J. Krzyżanowski, *Zakład Dynamiki Gazów*, [W:] *Działalność naukowa Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w latach 1973 - 1975*. PWN, Warszawa—Poznań 1978.
- [5] A. Konorski, *Prace z dziedziny termodynamiki procesów i przepływów czynników dwufazowych w latach 1976 - 1980*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr rej. 8/81, Gdańsk 1981.
- [6] A. Żabicki, *Współczesne tendencje w badaniach przepływów nieustalonych w maszynach wirnikowych*. Materiały Konferencji „Problemy rozwoju i projektowania maszyn energetycznych”, Zesz. Nauk. IMP, nr 114/1022/81.
- [7] J. Świryczuk, *Tunel prostosłowy o niskim poziomie turbulencji*, oprac. wewn. IMP PAN, nr rej. 208/76. Gdańsk 1976.
- [8] Z. Wierciński, *Eksperymentalne określenie wędrowania punktu spiętrzenia i oderwania strumienia przy opływie walca*. Ref. na II Kraj. Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, Jastrzębia Góra 1976.
- [9] Z. Wierciński, *Pomiary rozkładów ciśnień i autokorelacja ciśnień na powierzchni cylindra ($Re = 2 \cdot 5 \cdot 10^4$) z zastosowaniem cyfrowej obróbki danych*. Ref. na III Kraj. Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, Częstochowa 1978.
- [10] Z. Wierciński, *Eksperymentalne wyznaczanie korelacji wzajemnej ciśnień na powierzchni cylindra*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 95/971/80.
- [11] Z. Wierciński, *Flow past a circular cylinder with circulation variations*. Mat. II Conf. on Shear Flows, London 1979.
- [12] Z. Wierciński, *Niestacjonarny opływ cylindra płynem idealnym*. Praca doktorska, IMP PAN, oprac. wewn. nr rej. 85/79.
- [13] Z. Wierciński, *Wzajemne korelacje ciśnień i prędkości przy oderwanym opływie cylindra*. Mat. IV Kraj. Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, Burzenin 1980.
- [14] A. Żabicki, *Początkowe stadia utraty stabilności kołowsymetrycznego strumienia wypływającego do nieruchomego ośrodka*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr rej. 209/76.
- [15] A. Żabicki, *Początkowe fazy wypływu strumienia do nieruchomego ośrodka*. Ref. na II Kraj. Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, Jastrzębia Góra 1976.
- [16] J. Świryczuk, *Ruch torusów wirowych w pobliżu przeszkód osiowo-symetrycznych*. Ref. III Kraj. Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, Burzenin, 1978; także: Poster Session XI Int. Conf. Advances in Fluid Mechanics, Białejów 1979 + film 10 min.
- [17] J. Świryczuk, *Ruch pary wirowej wokół okręgu*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr rej. 133/79; także: IV Kraj. Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, Burzenin 1980.
- [18] G. Rygiel, Z. Wierciński, *Odształcenie ścieżki wirowej Karmana w pobliżu cylindra*. Ref. IV Kraj. Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, Burzenin 1980; także: oprac. wewn. IMP PAN, nr rej. 284/79.
- [19] Z. Wierciński, *Distorsion of the Vortex Street by a Cylindrical Obstacle*. Mat. III Symp. on Shear Flows, London 1980.
- [20] G. Rygiel, Z. Wierciński, *Badanie opływu walca strumieniem ze ścieżką Karmana*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr rej. 275/80.
- [21] Z. Kućmierz, G. Rygiel, Z. Wierciński, *Opracowanie wyników pomiarów prędkości w przepływie przy pomocy metod numerycznych*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr rej. 266/80.

- [22] E. P. Dyban, E. J. Epik, A. I. Mazur, Z. Wierciński, A. Żabicki, *Issledowanije struktury potoka s obrabotkoj informacij analogowymi i cifrowymi metodami*. Naucznyj otczet ITTF AN USSR, Gdańsk – Kijów 1980.
- [23] J. Wełnic, *Rozwiązywanie równań całkowych typu splotu metodą wyznaczania odwrotności jądra*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr rej. 275/80.
- [24] J. Wełnic, *Wstępne badania eksperymentalne nad wpływem nierównomiernej podziałki palisady wirnikowej na charakterystyki aerodynamiczne i akustyczne wentylatora osiowego WO630*, Zesz. Nauk. Politechniki Gdańskiej.
- [25] A. Żabicki, *Prace w dziedzinie przepływów nieustalonych w IMP PAN*. Ref. III Kraj. Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, Częstochowa 1978.
- [26] Z. Wierciński, *Współczesne metody obróbki sygnałów pomiarowych w badaniach przepływów nieustalonych*. Materiały Konferencji „Problemy rozwoju i projektowania maszyn energetycznych”, Zesz. Nauk. IMP PAN nr 114/1022/81.
- [27] L. Bitel, *Szerokopasmowe wejście analogowe do EMC ODRA 1204*. Materiały IV Konf. Miernictwa Dynamicznego, Warszawa 1976.
- [28] A. Żabicki, *Koncepcja szerokopasmowego wejścia analogowego do EMC JS 32 – założenia projektowe*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr rej. 270/80.
- [29] Z. Wierciński, *Cyfrowa obróbka pomiarów w przepływach nieustalonych*. Materiały Konferencji „Symkom”, Łódź 1977.
- [30] Z. Wierciński, *Izmieritielnaja systema dla issledowanija niestacionarnych dwiżenij żydkosti osuszczewlajemaja IMP PAN*. Ref. II letniej szkoły termooanemometrii, Praha, CSRS, 1976.
- [31] J. Kiełbiński, *Wielopunktowy pomiar ciśnienia z komutacją po stronie ciśnienia*. Materiały IV Konf. Miernictwa Dynamicznego Inst. Lot., Warszawa 1976.
- [32] J. Kiełbiński, *Zastosowanie indukcyjnych przetworników ciśnienia do sygnalizacji i sterowania*. Ref. VII Kraj. Konf. Metrologii i Budowy Aparatury, Warszawa 1979.
- [33] Z. Kućmierz, *Zmodernizowany układ elektroniczny fotoelektrycznych czujników ciśnienia*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr rej. 272/80.
- [34] A. Konorski, *Thermodynamics of Rapid Non-Equilibrium Expansion of Two-Phase Media*. Prace IMP, z. 70 - 72, 1976.
- [35] A. Konorski, *Non-Equilibrium Effects in Rapidly Expanding Two-Phase Media (in Two-Phase Flows and Heat Transfer*, wyd. S. Kakac, T. N. Veziroglu), Hemisphere Publ., Vol. III, New York 1977.
- [36] A. Konorski, *Critical Flow Conditions and Choking Flow Rates of Wet Steam Flows*. Mat. VII Konf. Parní Turbiny Velkých Vykonů, Plzeň 1979.
- [37] A. Konorski, *Kritische Strömungszustände und maximale Durchsatzmenge von Nassdampfströmungen*. VDI-Berichte, Nr 361, Düsseldorf 1980.
- [38] A. Konorski, *A kondenzacios turbinakbam fellepo ketvazitsu dramlas termodinamikai (Termodynamiczne zagadnienia pary wilgotnej w turbinach parowych)*. Wyd. VII Országos Erőmuvi Szimp., zom 2, Budapest 1980.
- [39] A. Konorski, S. Nahlik, *Metoda obliczeń i algorytmy programu obliczania parametrów krytycznych i granicznej przelotności w przepływach par wilgotnych*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 9/878/77.
- [40] A. Konorski, S. Nahlik, *Flow Choking and Maximal Flow Rate Calculation of Non-Equilibrium Wet-Steam Expansion*. Prace IMP, z. 77, 1980.
- [41] A. Konorski, *Procesy szybkiego odparowania i kondensacji na powierzchni kropel (streszcz.)* Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 163/874/1976 (II Kraj. Konf. Mech. Cieczy i Gazów).
- [42] A. Konorski, *Rapid Condensation and Evaporation Processes of Liquid Droplets.*, (streszcz.) Oprac. wewn. IMP PAN, nr rej. 43/77, Konf. Euromech 88, Karlsruhe 1977.
- [43] A. Konorski, *Dynamical Model of Interphase Heat and Mass Transfer in Non-Equilibrium Flow*. CHISA-Paper Nr G-4.9, Praha 1978.
- [44] A. Matuszkiewicz, *Równowagowy współczynnik kondensacji małych kropel*. Prace IMP, z. 82, 1982.

- [45] A. Konorski, *Problems of Interphase Heat and Mass Transfer on Liquid Droplets*. [W:] *Heat and Mass Transfer in Gas-Liquid Systems*, Ossolineum 1980.
- [46] A. Matuszkiewicz, *Analiza procesów przemian fazowych na powierzchni rozdziału ciecz – para i metody obliczania współczynnika kondensacji wody*. Praca doktorska w IMP PAN, nr rej. 206/80.
- [47] A. Konorski, *Numeryczna analiza nierównowagowej kondensacji pary wilgotnej na powierzchni filmu*. Mat. Symp. Wymiany Ciepła i Masy PAN, Jabłonna 1976.
- [48] A. Konorski, R. Zaworski, E. Jankowska, *Nierównowagowy model kondensacji pary wilgotnej na powierzchni filmu cieczowego*. Prace IMP, z. 75, 1978.
- [49] A. Matuszkiewicz, *Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych współczynnika kondensacji wody*. Prace IMP, z. 76, 1978.
- [50] A. Matuszkiewicz, *Zależność równowagowej wartości współczynnika kondensacji od temperatury*. Mat. X. Zjazdu Termodyn. (wyd. Pol. Wrocław), Wrocław 1978.
- [51] A. Matuszkiewicz, *Zastosowanie równania BGKW do wyznaczania wymiany masy, energii i pędu na granicy rozdziału faz*. Prace IMP, z. 82, 1982.
- [52] A. Matuszkiewicz, *Zależność współczynnika kondensacji od niektórych własności struktury molekularnej wody*. Arch. Termodyn. i Spal., nr 3, Warszawa 1978.
- [53] A. Konorski, Z. Drożyński, *Algorytm wyznaczania parametrów termodynamicznych urządzeń eżektorowych*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 39/989/80.
- [54] Z. Drożyński, *Opis termodynamiczny modeli procesów mieszania w urządzeniach eżektorowych*, Oprac. wewn. IMP PAN nr 159/80.
- [55] A. Konorski, *Perspektywiczna tematyka prac badawczych w dziedzinie eżektorów*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr 98/77.
- [56] A. Matuszkiewicz, *Interpretacja efektów bezwładnościowych w procesach przewodnictwa*. Mat. Symp. Wym. Ciepła i Masy PAN, Jabłonna 1976.
- [57] A. Matuszkiewicz, *O falowym równaniu przewodzenia ciepła*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 2/871/77.
- [58] A. Konorski, *Problematyka techniczno-ekonomiczna pracy niskoprężnych turbin siłowni konwencjonalnych i jądrowych oraz schładzania wody*. Oprac. dla potrzeb ekspertyzy „Prognozy badań w zakresie problemów ciepłno-przepływowych”. Komitet Termodynamiki i Spalania PAN, 1979.
- [59] R. Puzyrewski, W. Studziński, *Integral Method of Calculation of the Water Vapor Expansion Through the Nozzle with Condensation*. Ref. EUROMECH 88, Karlsruhe 1976.
- [60] R. Puzyrewski, *Calculation of Homogeneous Condensation in High Expanded Water Vapor*. Ref. Sem. on Two-Phase Flow, C. E. N. G., Grenoble, 1980.
- [61] W. Studziński, *Condensation Effects on Critical Flow and Parameters of Wet Steam with Real Gas Properties*. Mat. VII Konf. „Parni Turbiny Velkych Wykonů”, Plzeň 1979.
- [62] R. Puzyrewski, W. Studziński, *One-dimensional Water Vapor Expansion with Condensation at Higher Pressures*. Int. Journal of Multiphase Flow, Vol. 6, 1980.
- [63] W. Studziński, *Boundary layer in Compressible Flow of Wet Water Vapor*. Int. Journal of Multiphase Flow, Vol. 5, 1979; patrz też: praca doktorska pod tym samym tytułem w języku polskim, IMP PAN, Gdańsk 1976.
- [64] W. Studziński, *Nonequilibrium Flow of Wet Steam in Laminar Boundary Layer*. Ref. EUROMECH 88, Karlsruhe 1976.
- [65] J. Krzyżanowski, *Ze współpracy z amerykańskimi ośrodkami naukowymi*. Nauka Polska, nr 7 - 8, Warszawa 1980.
- [66] L. Bitel, *Pomiar grubości filmu wodnego metodą niezrównoważonego mostka prądu przemiennego*. Ref. VII Krajowa Konf. Metrologii, Warszawa 1979.
- [67] L. Bitel, *Liquid Film Thickness Measurement with Wall Heat Flux*. Ref. Semin. on Two-Phase Flow, C. E. N. G., Grenoble 1980.
- [68] S. Marcinkowski, J. Krzyżanowski, R. Puzyrewski, E. Błażko, *Metoda zapobiegania erozji łopatek turbin parowych*. Projekt wynalazczy, IMP PAN, wniosek racjonalizatorski nr 176/3/77.
- [69] R. Puzyrewski, S. Marcinkowski, Z. Ferdyn, *Hollow Blades Diaphragm for Turbine 215 MW – Effectiveness of Suction Slots Application*. Mat. VII Konf. „Parni Turbiny Velkych Wykonů”, Plzeň 1979.

- [70] S. Marcinkowski, *Obserwacje przepływu pary mokrej w ostatnim stopniu turbiny 13 K 215 z tarczami powłokowymi*. Prace IMP, z. 82, 1982.
- [71] S. Marcinkowski, *Nowe badania wizualizacyjne przepływu pary mokrej w ostatnich stopniach turbiny 13 K 215*. Mat. konf. „Problemy rozwoju i projektowania maszyn energetycznych”. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 114/1022/81.
- [72] S. Marcinkowski, *Technika kopiowania stanu powierzchni za pomocą kauczuku silikonowego w zastosowaniu do rejestracji zniszczeń erozyjnych oraz rejestracji osadów soli w częściach przepływowych turbin*. Prace IMP PAN, z. 80, 1981.
- [73] S. Marcinkowski, *Wpływ czynników korozyjnych na zagrożenie awaryjne stopni turbinowych*. Energetyka, nr 1, 1981.
- [74] S. Krzeczkowski, *Mechanizm rozpadu pojedynczych kropeł w strumieniu gazu w funkcji parametrów przepływu*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 56/927/79.
- [75] S. Krzeczkowski, *Mechanizm i kinetyka rozpadu kropeł w strumieniu gazu*. Ref. III Kraj. Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, Częstochowa 1978.
- [76] S. Krzeczkowski i in., *Investigation of Secondary Liquid Phase Structure in Steam Wake*. Trans. ASME J. Fluid Eng. Vol. 99, 1977.
- [77] S. Krzeczkowski, *Badania struktury strumienia kropeł w śladzie aerodynamicznym*. Ref. II Kraj. Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, Jastrzębia Góra 1976.
- [78] S. Krzeczkowski, *Measurements of Liquid Droplet Disintegration Mechanisms*. Int. J. of Multiphase Flow., Vol. 6, pp. 227 - 239, 1980.
- [79] S. Krzeczkowski i in., *Liquid Film Thickness Tests-Wet Steam Tunnel*. Ref. Conf. Two-Phase Flow and Heat Transfer, Miami, USA, 1976.
- [80] F. G. Hammitt, J. Krzyżanowski, S. Krzeczkowski, *Liquid Film and Droplet Stability Consideration as Applied to Wet Steam Flow*. Forschung im Ingenieurwesen, Bd. 47, Nr 1, 1981.
- [81] S. Krzeczkowski, *Ocena wielkości maksymalnych kropeł wtórnych w turbinie na podstawie znajomości kryterium stabilności i czasu ich rozpadu w przepływie*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 104/1999/80.
- [82] B. Weigle, *O koncentracji fazy ciekłej w strumieniu kropeł*. Mat. II Kraj. Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, Jastrzębia Góra 1976.
- [83] B. Weigle, *Teoretyczne badania struktury strumienia kropeł w śladzie płaskiej płytki*. Ref. IV Kraj. Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, Burzenin 1980.
- [84] B. Weigle, *Model periodycznej kolizji kropeł z łopatką wirnikową w stopniu turbiny parowej*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr rej. 256/77.
- [85] J. Krzyżanowski, Z. Szprengiel, *O niektórych problemach erozji układów łopatkowych w przepływie dwufazowym*. Ref. II Kraj. Konf. Mech. Cieczy i Gazów, Jastrzębia Góra 1976.
- [86] Z. Szprengiel, B. Weigle, *Assessment of Erosion Due to Polyfractional Rain of Droplets*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr rej. 142/79.
- [87] J. Krzyżanowski, Z. Szprengiel, B. Weigle, *On the Erosion Prediction of Steam Turbine Blading*, Proc. ELSI V Conf., Cambridge 1979.
- [88] J. Krzyżanowski, *Erosionsprobleme der Hochleistungsdampfturbinen*. VDI Konferenz – Thermische Strömungsmaschinen Diskussionsbeitrag, Düsseldorf 1976.
- [89] J. Krzyżanowski, *Erosionsprobleme von Hochleistungsdampfturbinen*. BWK, H. 7, Düsseldorf 1977.
- [90] J. Krzyżanowski, B. Weigle, *Some Experiments on Wet Steam Flow Visualisation in Large Steam Turbine Blading*. Trans. ASME, J. of Fl. Engg., V. 98, Series I, No 3, Sept. 1976.
- [91] J. Krzyżanowski, S. Marcinkowski, B. Weigle, Z. Szprengiel, *O problemach prognozowania erozji łopatek wirnikowych turbin parowych*. Mat. Konf. „Problemy rozwoju i projektowania maszyn energetycznych”. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 114/1022/81.
- [92] J. Krzyżanowski, *Aktuelle Probleme der Nassdampfströmung in den Endstufen der Turbinen*. Energietechnik, H. 11, 1980.
- [93] R. Puzyrewski, K. Namieśnik, S. Krzeczkowski, T. Król, *Badania profili w analogii wodnej*. Ref. II Kraj. Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, Jastrzębia Góra 1976.

- [94] K. Namieśnik, *Określenie analogii między skośną falą dyspergowaną na płytkiej wodzie i falą uderzeniową*. Praca doktorska, IMP PAN, Gdańsk 1979.
- [95] K. Namieśnik, *O trafności modelowania zjawisk falowych metodą analogii płytkiej wody*. Ref. Konf. „Problemy rozwoju i projektowania maszyn energetycznych”, Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 114/1022/81.
- [96] K. Namieśnik, *Obliczanie współczynnika strat energii w przepływie przez palisadę łopatkową na podstawie obrazu fal uderzeniowych*. Ref. III Kraj. Konf. Mech. Cieczy i Gazów, Częstochowa 1978.
- [97] P. Doerffer, *Zmniejszanie intensywności fal uderzeniowych poprzez modyfikację krawędzi spływowej łopatki transsonicznej*. Ref. III Kraj. Konf. Mech. Cieczy i Gazów, Częstochowa 1978.
- [98] P. Doerfer, *Badanie eksperymentalne spływu z krawędzi w przepływie naddźwiękowym*. Ref. IV Kraj. Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, Burzenin 1980.
- [99] R. Puzyrewski, *Problemy optymalizacji aerodynamicznej stopnia turbiny*. Ref. III Kraj. Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, Częstochowa 1978.
- [100] R. Puzyrewski, L. Bogdali, *Peripheral Efficiency Optimisation of Axial Turbine Stage by Means of Nonlinear Programming*. Arch. Bud. Maszyn, z. 3, 1980.
- [101] J. Dudzisz, J. Krzyżanowski, A. Krupa, S. Marcinkowski, B. Weigle, *Untersuchung des Teillastverhaltens einer Dampfturbine grosser Leistung*. Energietechnik, Nr 4, 1978.
- [102] S. Marcinkowski, *Metoda zapobiegania błędowi pomiaru ciśnień spowodowanych występowaniem korków cieczy w trakcie pomiarowym*. Zgłoszenie patentowe, nr 75/2/77, IMP PAN, Gdańsk 1977.
- [103] J. Prokopowicz, *Przegląd prac prowadzonych w IMP PAN w dziedzinie turbin gazowych*. Mat. Konf. SPE 80, IMP PŁ, Łódź 1980.
- [104] J. Prokopowicz, *Prace dla przemysłu lotniczego w ramach problemu MR I-26 w okresie 1976 - 1980*. Mat. Konf. „Problemy rozwoju i projektowania maszyn energetycznych”, Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 114/1022/81.
- [105] J. Prokopowicz, *Wysokotemperaturowy obieg gazowo-turbinowy z falowym wymiennikiem energii (FWE) z doprowadzeniem wody do czynnika roboczego*, Prace IMP, z. 77, 1980.
- [106] J. Prokopowicz, *Removal of contaminations from air delivered to gas turbines*. Budownictwo Okrętowe, nr 3, Gdańsk 1978.
- [107] J. Prokopowicz, R. Kozubowski, *Doświadczalne badania palisad separatora zanieczyszczeń powietrza roboczego silnika turbospalinowego napędu głównego statku*. Prace IMP, z. 81, 1981.
- [108] A. Gardzilewicz, S. Krzeczkowski, J. Krzyżanowski, *On Computer Aided Turbines and Power Stations Design*. Ref. VII Konf. Parni Turbiny Velkych Vykonů, Plzeň 1979.
- [109] A. Gardzilewicz, S. Krzeczkowski, J. Krzyżanowski, *Komputeryzacja w projektowaniu turbin i obiektów cieplnych*. Ref. IV Konf. „Komputerowe metody w mechanice konstrukcji”, Koszalin 1979.
- [110] T. Jankowski, S. Krzeczkowski, A. Gardzilewicz, A. Markiewicz, *Numeryczna metoda projektowania i obliczania obiegów cieplnych*. Ref. IV Konf. „Komputerowe metody w mechanice konstrukcji”, Koszalin 1979.
- [111] J. Krzyżanowski, *On two-phase flow research in IFFM*, Ref., Symposium C.E.N.G., Grenoble, Francja 1980.
- [112] A. Konorski, *Flow choking in non-equilibrium two-phase flow*. Ref., Symposium C.E.N.G., Grenoble, Francja 1980.
- [113] J. Krzyżanowski, *Aktualne problemy aerodynamiki ostatnich stopni turbin parowych*. Mat. IV Kraj. Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, Burzenin 1980.