

POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

**TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF
FLUID-FLOW MACHINERY**

**PRACE
INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH**



100



GDAŃSK 1996

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 machines

*

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

Wydanie publikacji dofinansowane zostało przez PAN ze środków DOT uzyskanych z Komitetu Badań Naukowych

EDITORIAL BOARD – RADA REDAKCYJNA

TADEUSZ GERLACH * HENRYK JARZYNA * JERZY KRZYŻANOWSKI
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ * WŁODZIMIERZ J. PROSNAK
JÓZEF ŚMIGIELSKI * ZENON ZAKRZEWSKI

EDITORIAL COMMITTEE – KOMITET REDAKCYJNY

EUSTACHY S. BURKA (EDITOR-IN-CHIEF – REDAKTOR NACZELNY)
JAROSŁAW MIKIELEWICZ
EDWARD ŚLIWICKI (EXECUTIVE EDITOR – REDAKTOR) * ANDRZEJ ŻABICKI

EDITORIAL OFFICE – REDAKCJA

Wydawnictwo Instytutu Maszyn Przepływowych
Polskiej Akademii Nauk
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. poczt. 621,
☎ (0-58) 46-08-81 wew. 141, fax: (0-58) 41-61-44,
e-mail: esli@imppan.imp.pg.gda.pl

ISSN 0079-3205

JERZY KRZYŻANOWSKI¹

Przyczynek do dyskusji na temat weryfikacji metod obliczeniowych maszyn przepływowych (wersja II)²

W ślad za rozwojem numerycznych metod mechaniki płynów sprawa weryfikacji wyników obliczeń maszyn przepływowych za pomocą wiarygodnych danych doświadczalnych staje się ważnym zagadnieniem.

W przypadku porównywania obliczeń 1-D³ i pomiarów 1-D wypracowano spójną metodykę postępowania. Przedstawiono ją m. in. na SYMKOM 91. W przypadku obliczeń 2-D i pomiarów 2-D, a tym bardziej obliczeń 3-D i pomiarów 3-D sprawa spójnego postępowania nastrocza trudności metodyczne. Na ogół poprzestaje się na jakościowych porównaniach; jest to siłą rzeczy niespójne i nieobiektywne.

Celem pracy jest zwrócenie uwagi na ten, na ogół pomijany, problem.

Główne tezy rozważań przedstawiono w materiałach SYMKOM'95. W tej publikacji: więcej uwagi poświęcono w rozdziale 2 dwóm generacjom badań i porównań AT oraz znaczeniu wiarygodności pomiarów doświadczalnych; w rozdziale 4 omówiono kilka szczegółów techniki weryfikacji modeli 1-D oraz metod obliczeniowych będących przedmiotem zainteresowania AT; porównania wyników obliczeń i pomiarów udokumentowano obszerniejszym materiałem ilustracyjnym; zwrócono też uwagę na trudności z określeniem warunków brzegowych dla obliczeń 2-D i 3-D wydzielonych stopni maszyny przepływowej.

1. Wstęp

Szybki rozwój metod i narzędzi Numerycznej Mechaniki Płynów (NMP) w ciągu ostatnich 10-15 lat skłania środowiska mechaników i konstruktorów do prac zmierzających do weryfikacji numerycznych technik symulacji przepływu. Standardowym podejściem jest tu na ogół porównywanie wyników obliczeń z wyni-

¹Instytut Maszyn Przepływowych PAN, ul. Fiszerza 14, 80-952 Gdańsk

²Fragmenty tego tekstu prezentowane były na:

– Seminarium Arbeitsgemeinschaft Turbomachinen (AT), Stuttgart/Kleinwalsertahl, 21-29.09.1994 oraz

– Konferencji SYMKOM'95, Bronisławów, 11-13.10.1995.

³1-D – jednowymiarowy, 2-D – dwuwymiarowy, 3-D – trójwymiarowy

kami badań doświadczalnych. Przy okazji takiego zamierzenia pojawia się szereg problemów:

- wyboru obiektu porównań i wiarygodnych danych doświadczalnych,
- wyboru metod obliczeniowych,
- sposobu porównywania obliczeń i pomiarów,
- jakościowego i ilościowego charakteru wniosków wyciąganych z takich porównań.

Celem tego referatu jest przedstawienie kilku uwag i komentarzy do tego wachlarza problemów. Autor oparł się na doświadczeniach wspólnych, uzyskanych w ramach wieloletniej współpracy Arbeitsgemeinschaft Turbomaschinen (1986-1996)⁴ oraz na ostatnio opublikowanych (częściowo) doświadczeniach innych zespołów międzynarodowej współpracy⁵. Tempo prac w tej dziedzinie ostatnio wyraźnie rośnie. Ciągłe otwartą pozostaje jednak sprawa dążenia do ilościowego porównania (obliczeń i pomiarów) z liczbowym określeniem niepewności.

2. Wybór obiektu i danych doświadczalnych dla weryfikacji metod NMP

Wybór podyktowany jest na ogół, między innymi, potrzebami merytorycznymi (nauki i gospodarki) i wiarygodnością danych doświadczalnych.

Kilka lat temu (1986) AT wybrała do celu weryfikacji metod NMP konfigurację geometryczną ostatniego stopnia turbiny parowej 200 MW. Dane doświadczalne z badań części niskoprężnej (NP) turbin mają bowiem istotne znaczenie przy pracach modernizacyjnych współczesnych turbin energetycznych dużej mocy. Modernizacja takich turbin jest ważnym elementem polityki rozwoju systemów energetycznych na świecie i w Polsce [1-3].

Modernizacja i wybór wyników badań eksperymentalnych ostatniego stopnia turbiny kondensacyjnej do weryfikacji metod obliczeniowych ma obszerną motywację. Wśród techniczno-ekonomicznych motywacji wymienia się:

- celowość przedłużenia życia maszyn po ich wieloletniej eksploatacji,
- poprawienie sprawności obiegu przez uporządkowanie procesu regeneracji (w części NP) oraz, często także,
- podwyższanie mocy turbiny.

Wśród motywacji poznawczych przepływ pary mokrej w ostatnich stopniach turbin parowych budzi wciąż zainteresowanie z kilku przyczyn:

⁴ AT – Arbeitsgemeinschaft Turbomaschinen: Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Uni. Stuttgart (H. Stetter), Technische Hochschule, Zittau (H. Wolf), Technische Universität Dresden (G. Sörgel), Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych P. Śl. (T. Chmielniak), Instytut Maszyn Przepływowych PAN Gdańsk (J. Krzyżanowski).

⁵ AGARD/ASME – Advisory Group for Aerospace Research and Development NATO/American Soc. of Mechanical Engin., ERCOFTAC – European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion.

- panuje powszechne przekonanie, że sprawność tych stopni mogłaby być znacznie wyższa niż jest,
- reprezentowany jest pogląd, że fizyka zjawisk przepływowych w tym m. in. problemy przepływu pary z kondensacją („przedwczesną”) nie są dostatecznie zbadane,
- pociąga to za sobą poważne wątpliwości na temat żywotności i zagrożenia awaryjnego ostatnich stopni turbin, pracujących w agresywnym środowisku „pierwszego kondensatu”,
- obawy te pogłębia fakt, że liczne konfiguracje geometryczne ostatnich stopni turbin pracują z dala od warunków projektowych tak z powodu nietrafnych obliczeń przepływu, jak i częściowego obciążenia turbin projektowanych na obciążenie podstawowe.

Stąd uzasadnione zainteresowanie budzą:

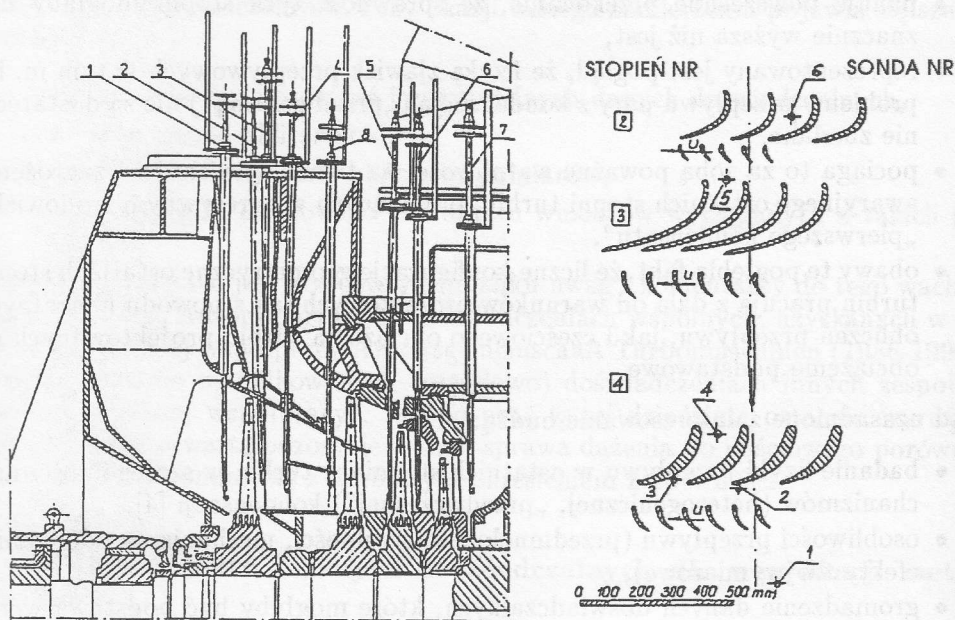
- badanie fizyki przepływu w ostatnich stopniach turbin w szczególności mechanizmów (heterogenicznej, „przedwczesnej”) kondensacji [4],
- osłabiwości przepływu (przedmuchy nieszczelności, mechanizmy oderwania, efekty trójwymiarowe),
- gromadzenie danych doświadczalnych, które mogłyby być podstawą weryfikacji metod obliczania przepływu w stopniach turbin o zadanej geometrii,
- badanie skutków różnego rodzaju uproszczeń w matematycznych modelach przepływu.

Zamierzenia badawcze grupy AT skupiły uwagę na tym ostatnim temacie. Oparcie się na wynikach badań przepływu w turbinach rzeczywistych ma m. in. ten niezaprzeczalny walor, że procesy przepływu pary mokrej w konfiguracjach modelowych nie modelują się w pełni.

W związku z programem AT weryfikacji metod obliczeniowych i zamierzeniami modernizacyjnymi, w IMP PAN rozwinięto metodykę badań przepływu pary mokrej w ostatnich stopniach rzeczywistych turbin za pomocą sondowania pola przepływu w przekrojach kontrolnych stopnia, rys. 1. Opracowano też metodykę określenia sprawności stopnia części NP, turbin rzeczywistych (pracujących w parze mokrej), opartą na pomiarach pola parametrów przepływu, wspieranym obliczeniem pomocniczym, [5]. Oszacowano dokładność określania tą drogą sprawności ostatniego stopnia na ok. $\pm 2,5$ do 4,5%. W wielu przypadkach może to stanowić przekonującą podstawę do decyzji modernizacyjnych i kontroli skuteczności modernizacji⁶. (Próby AT weryfikacji metod obliczeniowych (1986-1991) za pomocą wyników badań turbin rzeczywistych nazwiemy w tej publikacji badaniami I generacji).

Choć badania przepływu w turbinach rzeczywistych mają niezastąpione walory, to jednak wyniki sondowania pola prędkości w maszynach rzeczywistych mają ograniczoną dokładność. Wynika to z następujących przyczyn:

⁶ Autor pragnie zwrócić uwagę na prace S. Marcinkowskiego, dotyczące opracowania koncepcji i realizacji techniki pomiarowej IMP PAN i podziękować mu za liczne dyskusje, których wyniki wykorzystano także w tym referacie.

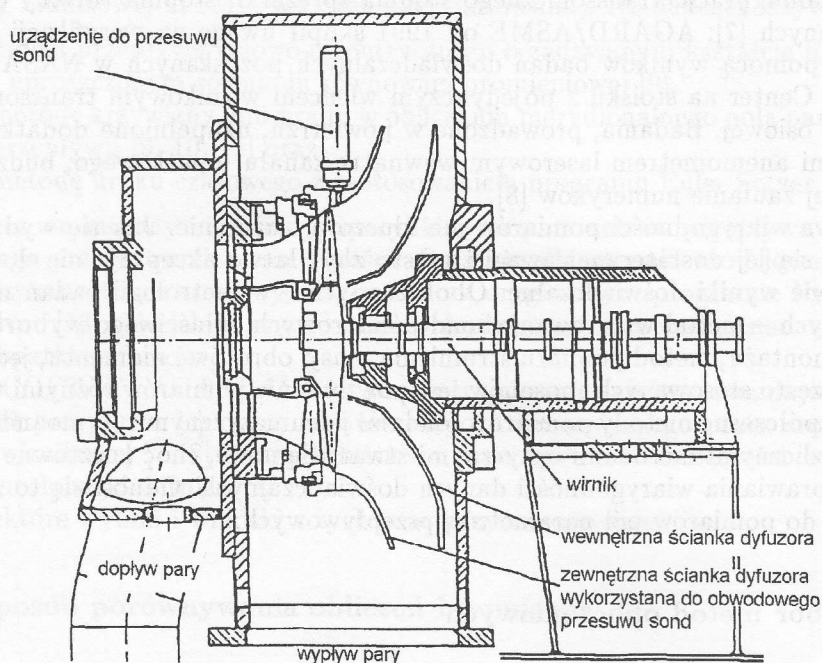


Rys. 1. Elementy techniki pomiarowej opracowanej w IMP PAN, lokalizacja sond w korpusie części NP turbiny 200/215 MW

- Fluktuacje parametrów ruchu podyktowane ruchem bloku kocioł-turbina i trudności z utrzymaniem ich na stałym poziomie.
- Braku możliwości (najczęściej) trawersowania sondami pola przepływu w kierunku obwodowym; wylania się wtedy pytanie o reprezentatywność takiego pomiaru na jednym trawersie promieniowym dla badanego przepływu (chodzi m. in. o ośiową symetrię przepływu). Dotyczy to w szczególności pomiarów w szczelinie międzywieńcowej stopnia. Do pewnych granic można te trudności eliminować przez staranny dobór położenia sond, sposób ich wprowadzenia do przepływu, komputeryzację pomiaru. Skuteczność niektórych z tych kroków sprawdzono w toku przytoczonych niżej i cytowanych serii pomiarowych,
- Mała wiarygodność pomiaru ciśnienia statycznego i kierunku w szczelinie międzywieńcowej stopnia w pobliżu ścian (wąskiego) kanału aparatu kierowniczego.
- Trudność z wyznaczeniem granic całkowania w swobodnych strumieniach pary ze stopniem turbiny z uwzględnieniem specyfiki przepływu w kierunku upustu.
- Specyficzne trudności z badaną przez AT konfiguracją ze stopniem Baumana w wyznaczaniu strumieni masy w przekrojach kontrolnych stopnia.

Tak więc, choć badanie maszyn rzeczywistych ma niezaprzeczalne walory (m. in. w procesie modernizacji) do celów weryfikacji metod obliczeniowych NMP

poszukuje się danych doświadczalnych, które sprawiają bardziej wiarygodne wrażenie.



Rys. 2. Parowa turbina modelowa ITSM Universität Stuttgart, [6].

Z tych powodów AT zdecydowała się (1991) skupić również uwagę na danych doświadczalnych pozyskanych w parowej turbinie modelowej ITSM, rys. 2. Nawiemy je tu badaniami AT II generacji. Wśród zalet badań opartych na takiej konfiguracji geometrycznej można wymienić:

- precyzyjne określenie geometrii układu łopatkowego turbiny modelowej (co w przypadku maszyny rzeczywistej nie zawsze jest możliwe);
- skomputeryzowanie techniki pomiarowej, ograniczenie wpływu fluktuacji parametrów ruchu turbiny modelowej;
- zaawansowanie techniki przedmuchu i cechowanie sond pomiarowych do badań w przepływie pary mokrej;
- możliwości (skomputeryzowanego) określania średnich wielkości przepływu dzięki trawersowaniu strumienia pary mokrej w kierunku obwodowym (przez 2 podziałki i po całym obwodzie);
- możliwość precyzyjnego określania sumarycznego strumienia masy pary;
- możliwość określenia sprawności stopnia modelowego.

Eksperymentalną weryfikacją metod NMP zajmują się wiele zespołów. Podejmują one różne decyzje w sprawie wyboru obiektów doświadczalnych. Wymienie dwa. ERCOFTAC od 1992 bada relacje między obliczeniami i wynikami pomiarów różnych konfiguracji: transsonicznego stopnia sprężarki, stopnia turbiny osiowej i kilku innych [7]; AGARD/ASME od 1991 skupił uwagę na weryfikacji metod NMP za pomocą wyników badań doświadczalnych pozyskanych w NASA Lewis Research Center na stoisku z pojedynczym wieńcem wirnikowym transsonicznej sprężarki osiowej. Badania, prowadzone w powietrzu, uzupełnione dodatkowymi pomiarami anemometrem laserowym wewnątrz kanału łopatkowego, budzą najwidoczniej zaufanie numeryków [8].

Sprawa wiarygodności pomiarów ma kluczowe znaczenie. Jak się wydaje nie poświęca się jej dostatecznej uwagi i często zbyt łatwo akceptuje nie do końca sprawdzone wyniki doświadczalne. Obok znanych – w metrologii badań maszyn wirnikowych – metod wzorcowania sond pomiarowych, właściwego wyboru techniki ich montażu, metod pomiaru strumienia masy, obrotów i momentu, jednym z niedość często stosowanych sposobów jest powtarzanie pomiarów różnymi technikami. Współczesne metody pomiarów sondami pneumatycznymi, termooanemometrami, rozlicznymi metodami optycznymi stwarzają nowe, choć kosztowne możliwości poprawiania wiarygodności danych doświadczalnych. Odnosi się to zresztą nie tylko do pomiarów pól parametrów przepływowych.

3. Wybór metod obliczeniowych

Rozwój metod i narzędzi NMP stawia przed numerykami zadania coraz ambitniejszych weryfikacji modeli obliczeniowych turbin. Dziś jako *state-of-art* określa się umiejętność obliczeń za pomocą lepszego, ustalonego, transsonicznego, 3-D modelu przepływu, łącznie z modelowaniem przepływów nieszczelności dla zadanej konfiguracji geometrycznej, [8]. O osiąganą tą drogą dokładności wspomnimy niżej. Trzeba jednak powiedzieć, że te zaawansowane metody NMP:

- nie modelują jeszcze zadawałajaco szeregu zjawisk przepływowych,
- są czasochłonne i
- kosztowne, ponieważ rutynowa praktyka projektanta wymaga raczej zastosowania superkomputerów a nie stacji roboczych (przydatnych do rozwoju programów NMP), tj. wymaga specjalnego, kosztownego wyposażenia komputerowego.

Choć więc należy przyznać, że dla takich właśnie modeli należy przyszość, w tej sytuacji weryfikacja metod uproszczonych obliczeń przepływowych nadal budzi zainteresowanie ponieważ:

- reprezentują one szybkie narzędzie pracy inżynierskiej,
- są tanie
- i choć mniej dokładne są przedmiotem łatwych korekt.

Stąd są one nadal w inżynierskim użyciu.

AT zdecydowała się zestawiać wyniki obliczeń przepływu dla zadanej geometrii ostatniego stopnia turbiny 200 MW (w I generacji porównań) i dla stopnia turbiny modelowej ITSM⁷ (w II generacji porównań). Do obliczeń użyto:

- model przepływu osiowo-symetrycznego o zadawanym kształcie linii prądu i uproszczonym równaniu równowagi promieniowej [9],
- metodę krzywizny linii prądu w obliczaniu merydionalnego pola parametrów przepływu [9, 10, 11] oraz
- metodę kroku czasowego z zastosowaniem programu Euler-Solver [12].

Przytoczone metody nie ujmują specyfiki pola parametrów przepływu zmodyfikowanego przepływami nieszczelności. Ostatnio dla stopnia modelowego ITSM opublikowano także nowe wyniki, oparte na oryginalnym programie Navier-Stokes-Solver [13]. Modelują one również przepływy mieszczelności nad wierzchołkiem łopatki wirnikowej.

ERCOTAC i AGARD/ASME koncentrują swoje zainteresowania wokół modeli 3-D przepływu lepkiego, turbulentnego, transsonicznego przez stopień maszyny wirnikowej [7, 8] z uwzględnieniem przepływów nieszczelności nad wierzchołkiem łopatki wirnikowej.

Niektóre wyniki i wnioski z tych prac przytoczono niżej.

4. Sposób porównywania obliczeń i pomiarów

Uwaga autorów, przeważnie, skupia się na (jakościowym) porównywaniu wykresów wybranych parametrów przepływów w przekrojach kontrolnych, sprowadzonych do dwu wymiarów. W wielu przypadkach jest to postępowanie niespójne. Wróćmy do tej sprawy.

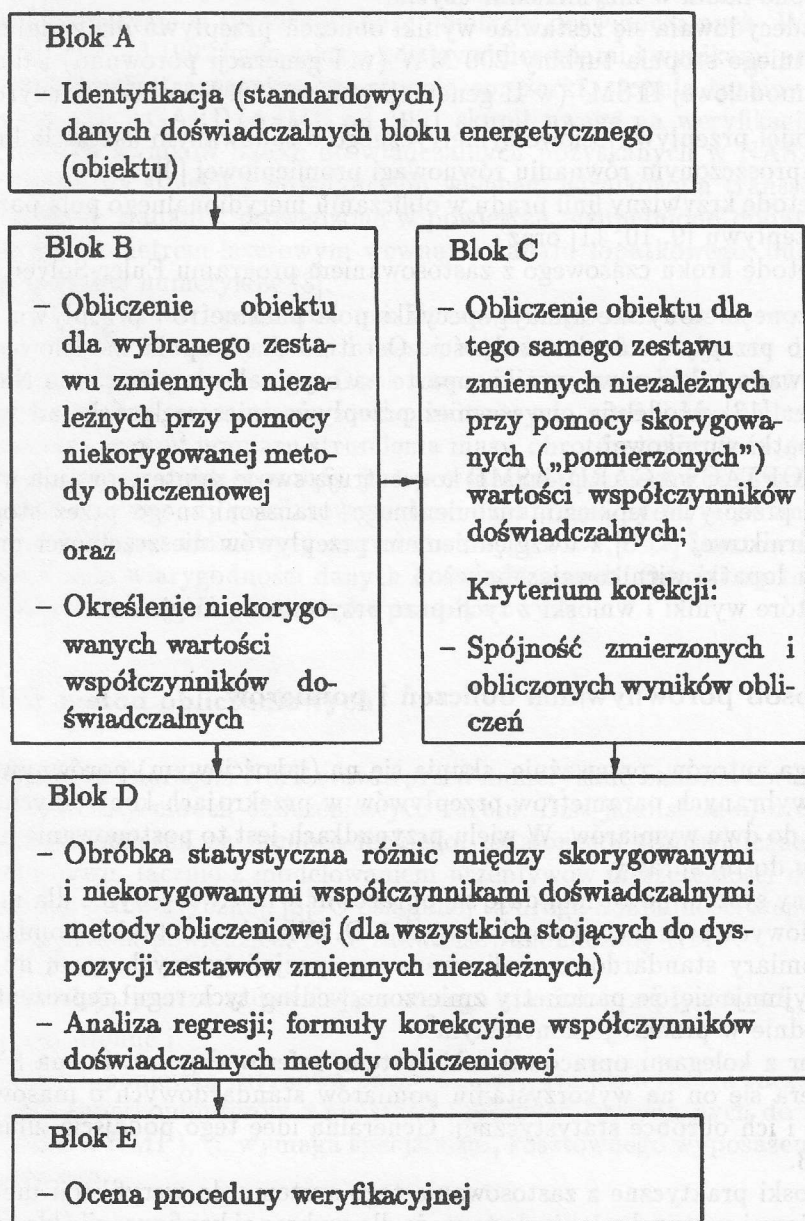
Spójny system porównań daje się opracować właściwie jedynie dla metod 1-D obliczeniowych oraz metod pomiarowych 1-D. Właściwości takich pomiarów spełniają pomiary standardowe, realizowane wg specjalistycznych norm np. [14, 15, 16]. Przyjmuje się, że parametry zmierzone według tych reguł reprezentują wartości średnie w przekroju kontrolnym⁸.

Autor z kolegami opracował taki system, referował go m. in. na SYMKOM 91. Opiera się on na wykorzystaniu pomiarów standardowych o masowym charakterze i ich obróbce statystycznej. Generalną ideę tego podejścia zilustrowano na rys. 3.

Wnioski praktyczne z zastosowania tego systemu do weryfikacji metody 1-D obliczeniowej sprowadzają się do tego, że dla wybranej konfiguracji (klasy konfiguracji) łatwo można opracować korekty doświadczalnych współczynników poprawkowych używanych w tej metodzie i doprowadzić do lepszej zgodności wyników

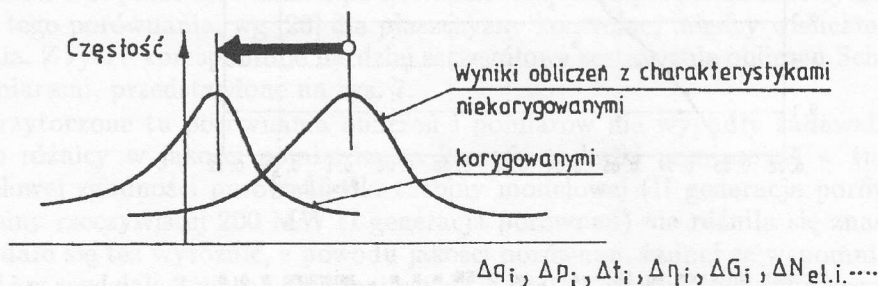
⁷Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlabor, H. Stetter, Universität Stuttgart, RFN

⁸ W licznych przypadkach założenie takie nie jest uzasadnione. S. Marcinkowski wskazuje na takie przypadki [17].



Rys. 3. Koncepcja wykorzystania pomiarów standardowych do weryfikacji metod obliczeń ciepłno-przepływowych, [18].

obliczeń z doświadczeniem. Można też skontrolować statystyczną odległość obliczeń skorygowanych i nieskorygowanych od wyników pomiarów. M. in. w [18] opisano istotę tego systemu. Dla przykładu przytoczono też tam korekty wybranych współczynników prędkości φ, ψ i przelotności μ_1, μ_2 . W rozważanym przypadku skorygowane współczynniki zapewniają lepszą zgodność między obliczeniami i pomiarem charakterystyk aparatów obiegu kocioł turbina, w szczególności samej turbiny. Schemat badania skuteczności takiej korekty przedstawiono na rys. 4. (Zmiana kształtu krzywej obliczeń korygowanych wynika z nieliniowej natury modelu obliczeniowego obiektu). Skorygowanie tych współczynników pozwala zmniejszyć rozbieżności między obliczeniem i pomiarem zużycia ciepła o ok. 0,5%. Zastosowanie skorygowanych współczynników wymiany ciepła w wymiennikach regeneracyjnych o dalsze 1,3%. Liczby te dotyczą pewnych wybranych, jednowymiarowych metod obliczeń przepływowych i wymiany ciepła.



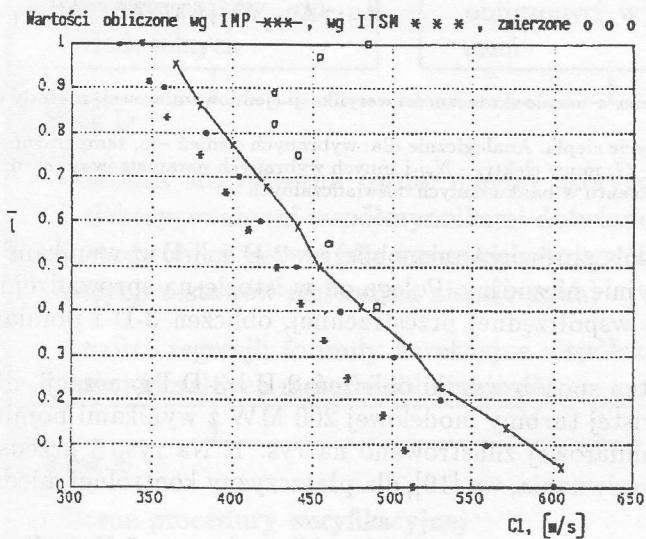
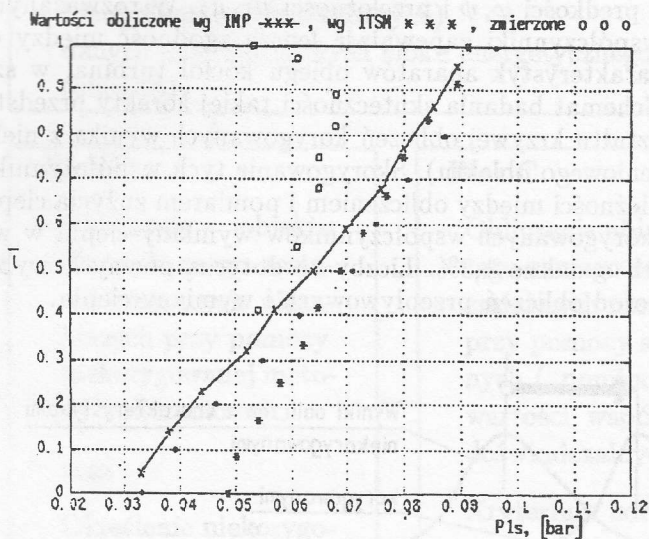
Rys. 4. Schemat postępowania w ocenie skuteczności weryfikacji (jednowymiarowej) metody obliczeniowej, wg [18].

$\delta g_i = q_{obl} - q_{pom.i}$; q – zużycie ciepła. Analogicznie dla: wybranych ciśnień – p , temperatur – t , sprawność – η , strumienia masy – G , mocy elektr. – N_{el} i innych wybranych parametrów obiektu; i – numer pomiaru (standardowego) obiektu w banku danych doświadczalnych

Standardowy sposób porównywania obliczeń 2-D i 3-D z wynikami pomiarów 3-D jest koncepcyjnie niespójny. Polega on w istocie na sprowadzeniu, przez uśrednianie po jednej współrzędnej przestrzennej, obliczeń 3-D i pomiarów 3-D do przypadku 2-D.

AT porównała w ten sposób wyniki obliczeń 2-D i 3-D I generacji, dla ostatniego stopnia rzeczywistej turbiny modelowej 200 MW z wynikami pomiaru 2-D. Elementy techniki pomiarowej zilustrowano na rys. 1. Na rys. 5 przedstawiono tylko fragment tego porównania, wg [19], dla płaszczyzny kontrolnej między wieńcami tego stopnia.

Obliczenia IMP PAN oparto na modelu obliczeniowym 2-D (osiowo symetrycznym, zadawany kształt linii prądu w postaci prostokreślnych powierzchni stożkowych, uproszczone równanie równowagi promieniowej, straty obliczane wg Craiga i Coxa, przylotność palisad stopni elementarnych wg Szczegłajewa, parametry stanu wg tablic parowych). Algorytm opracował E. Błażko, technikę obliczeń i założenia opisano w [9]. Obliczenia TH Zittau [10] oparto na metodzie 2-D krzywizny linii prądu, uproszczonej formie równania równowagi z korektorem,



Rys. 5. Zestawienie (I generacji) niektórych wyników pomiarów: $p_1(r)$, $c_1(r)$ i obliczeń parametrów przepływu w szczelinie międzywieńcowej turbiny 200 MW. Obliczenia: xx – IMP PAN, ** – Uni. Stutt., ●● – IMiUE n, oo – pomiar, [19].

własnymi danymi dotyczącymi strat łopatkowych i pozałopatkowych i równaniem stanu jak dla gazu doskonałego. Obliczenia IMiUE_n [11] oparto na metodzie 2-D krzywizny linii prądu, pełnej formie równania równowagi promieniowej ze specyficznymi, pośrednio zadawanym kształtem linii prądu, stratami łopatkowymi (w tym szczególnym przypadku) zadawanymi wg Craiga Coxa jak IMP PAN i równaniem stanu jak dla gazu doskonałego. Obliczenia ITSM oparto na modelu obliczeniowym 3-D Schabera [12] (program 3-D Euler Solver, rozwiązanie metodą kroku czasowego, uproszczone równanie stanu dla pary, pominięto specyfikę przedmuchu nieszczelności nad łopatką wirnikową, siatka obliczeniowa H, ilość punktów siatki w kierunku osiowym, obwodowym, promieniowym odpowiednio 110, 11, 13).

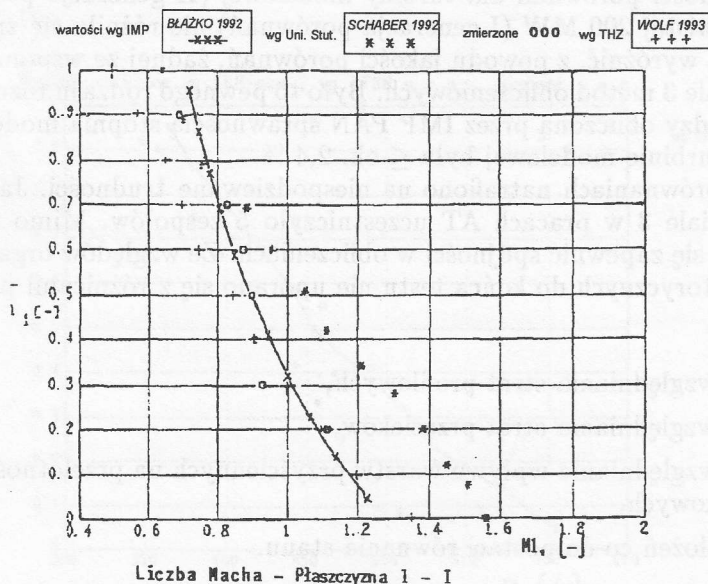
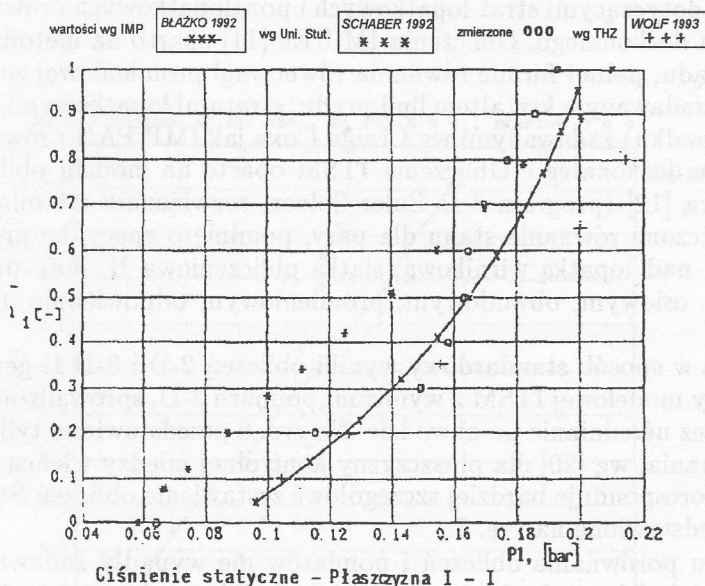
AT porównała w sposób standardowy wyniki obliczeń 2-D i 3-D II generacji, dla stopnia turbiny modelowej ITSM z wynikami pomiaru 3-D, sprowadzonymi do wykresów 2-D przez uśrednianie po obwodzie. Na rys. 6 przedstawiono tylko fragment tego porównania, wg [20] dla płaszczyzny kontrolnej między wieńcami tego stopnia. Z rys. 6 koresponduje bardziej szczegółowe zestawienie obliczeń Schabera z pomiarami, przedstawione na rys. 7.

Przytoczone tu porównania obliczeń i pomiarów nie wypadły zadawająco. Mimo różnicy w jakości pomiarów na korzyść techniki pomiarowej w turbinie modelowej zgodności porównań dla turbiny modelowej (II generacja porównań) i turbiny rzeczywistej 200 MW (I generacja porównań) nie różniła się znacząco. Nie udało się też wyróżnić, z powodu jakości porównań, żadnej ze wspomnianych wyżej i w rozdziale 3 metod obliczeniowych. Było to pewnego rodzaju rozczarowanie. Różnica między obliczoną przez IMP PAN sprawnością stopnia modelowego, a pomiarem w turbinie modelowej była $\leq$ ok. 2,4 %.

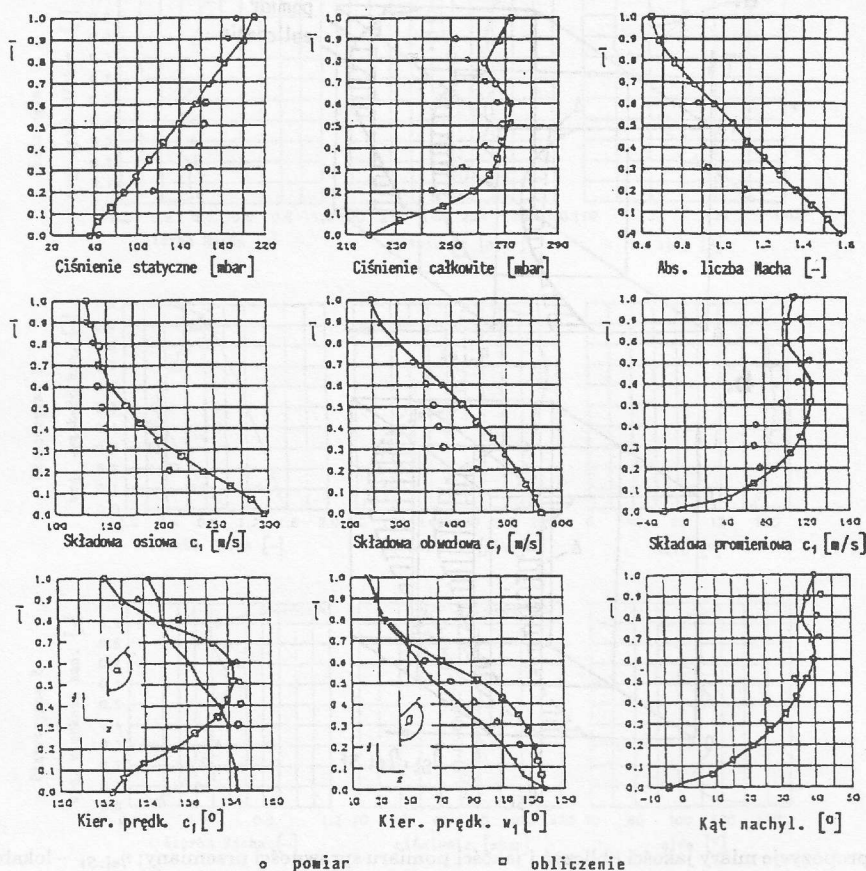
Przy tych porównaniach natrafiono na niespodziewane trudności. Jak wspomniano w rozdziale 3 w pracach AT uczestniczyło 5 zespołów. Mimo usilnych starań nie udało się zapewnić spójności w obliczeniach. Ze względów organizacyjnych, ale i merytorycznych do końca testu nie uporano się z różnicami podejścia wynikającymi z

- sposobu uwzględniania strat profilowych,
- sposobu uwzględniania strat przecieków,
- sposobu uwzględniania wpływu warstw przyściennych na przelotności wieńców łopatkowych,
- różnych założeń co do postaci równania stanu.

Były też trudności z dokładnym skojarzeniem przekrojów kontrolnych w obliczeniu i pomiarze. Przy równocześnie występujących 3 grupach metod obliczeniowych, o znaczących różnicach w stopniu uproszczenia, ilość czynników wpływających na wynik obliczenia była bardzo duża. Także i ilości parametrów przepływu, porównywana w trzech przekrojach kontrolnych, była duża. Jedne z nich lepiej, inne gorzej odpowiadały pomiarom. Nie pozwoliło to, ani na wyraźne wyróżnienie, ani na wyraźną dyskwalifikację porównywanych metod obliczeniowych.



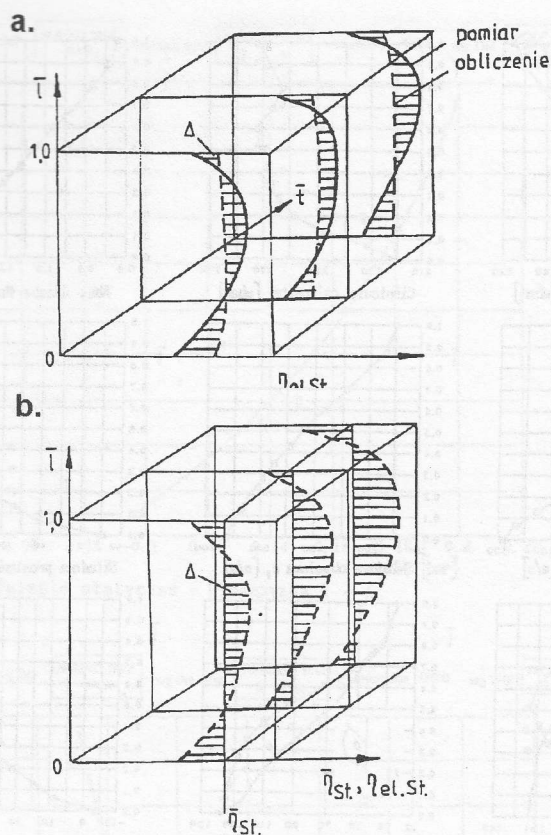
Rys. 6. Zestawienie (II generacji) niektórych wyników pomiarów: $p_1(r)$, $M_1(r)$ i obliczeń parametrów przepływu w szczelinie międzywieńcowej turbiny modelowej ITSM; $\varphi = 0,61$; obliczenia: xx - IMP PAN, ** - Uni. Stutt., ++ - THZ, oo - pomiar, [20]



Rys. 7. Wyniki obliczeń Schabera (3-D Euler Solver) przepływu w szczelinie międzywieńcowej turbiny modelowej ITSM (II generacja porównań), $\varphi = 0,61$, $\circ$ - pomiar, $\square$ - obliczenie, [12]

Po tych doświadczeniach własnych patrzę z pełnym zrozumieniem na podobnego rodzaju trudności na jakie dziś natrafiają inni autorzy, np. [8], zajmujący się porównaniem znacznie szlachetniejszych, metod obliczeniowych 3-D. Przestrzegam także przyszłych autorów takich porównań przed tego rodzaju trudnościami.

Warto tu jeszcze raz podkreślić, że nie opracowano dotychczas spójnego (obiektywnego) sposobu porównywania wyników obliczeń i pomiarów. Porównanie obliczonej i pomierzonej sprawności stopnia, jako wartości integralnej, ukrywa ewentualne przyczyny rozbieżności. Jakościowe porównywanie licznych wykresów rozkładów parametrów wzdłuż długości łopatki nie jest jednoznaczne; trudno tu ustrzec się od subiektywnej oceny. Może porównywanie, odpowiednio grupowanych sum kwadratów odchyłek, mogłoby tu wносить jakiś obiektywny ład, rys. 8. Stąd też te porównania w naszej własnej praktyce i w praktyce innych autorów mają czysto jakościowy charakter.



Rys. 8. Dwie propozycje miary jakości obliczeń i jakości pomiaru sprawności przemiany; $\eta_{el.St}$ – lokalna sprawność przemiany w stopniu elementarnym, $\bar{\eta}_{St}$ – globalna sprawność przemiany w stopniu;

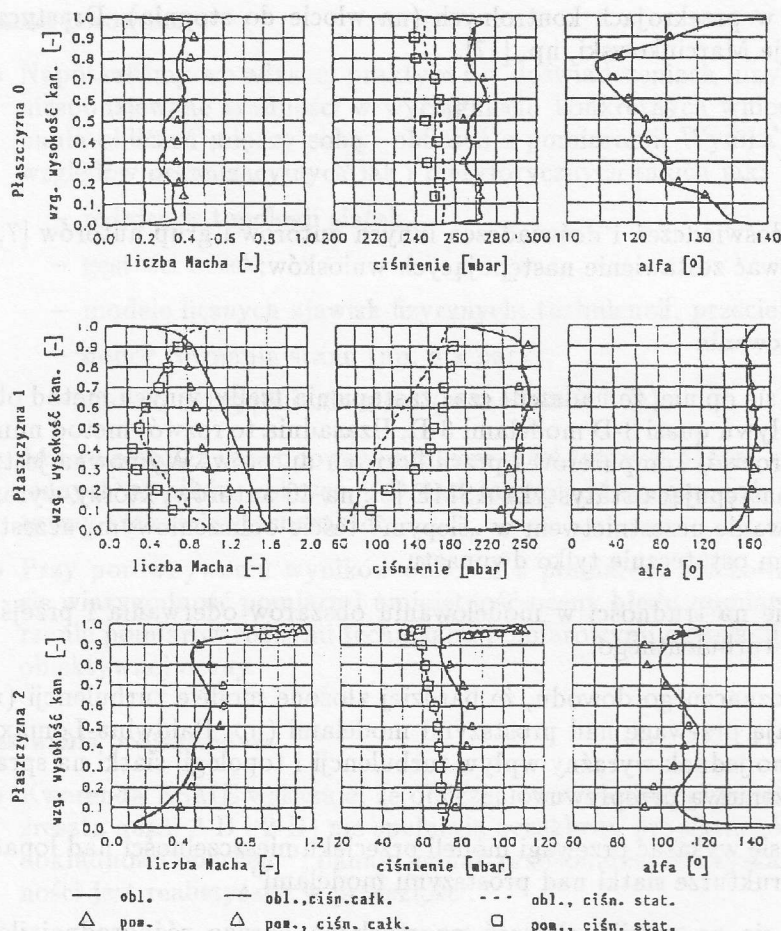
a. miara jakości obliczenia: $\Sigma(\Delta^2) \Rightarrow \min.$,

b. miara jakości pomiaru globalnego i pomiaru lokalnego sprawności przemiany: $\Sigma(\Delta^2) \Rightarrow \min., \bar{\eta}_{el.St} \Rightarrow \bar{\eta}_{St}$

Kiedy obliczenia i pomiary w przyszłości w pełni się pokryją problem ten zniknie. Dzisiaj brak obiektywnych narzędzi oceny wiarygodności metod obliczeniowych utrudnia wybór kierunków doskonalenia metod obliczeniowych. Wybór ten opiera się dzisiaj na zasadzie prób i błędów.

Ostatnio w AT (1994) przedstawiono i opublikowano nowe wyniki porównania obliczeń z pomiarem w turbinie modelowej [13]. Obliczenie oparto na programie 3-D Navier-Stokes Solver, użyto zmodyfikowanego modelu turbulencji Baldwina-Lomaxa; obliczenie wykonywano w 8 obszarach, w tym w obszarze przepływów nieszczelności nad łopatką wirnikową; użyto siatki typu H z liczbą oczek 275.000; przyjęto warunki brzegowe jako dane:

- w przekroju kontrolnym na wlocie do stopnia – rozkład ciśnienia całkowitego, rozkład entropii, kierunku promieniowym wg danych pomiarowych;
- w przekroju kontrolnym za stopniem – rozkład ciśnienia statycznego



Rys. 9. Wybrane wyniki obliczeń R. Mertza i in. (3-D Navier-Stokes Solver) przepływu w stopniu turbiny modelowej ITSM, [13]

Obliczenia wykonano na komputerze Silicon-Graphics Work Station; czas obliczeń wynosił 40-70 godz.

Wybrane wyniki wg [13] przedstawiono na rys. 9. Jakościowo stwierdzić można lepszą zgodność niż w porównaniach AT pierwszej i drugiej generacji. Pozostaje otwartym pytanie, skąd dla zadanej geometrii projektant ma pozyskać niezbędne dane do warunków brzegowych. Być może skutecznym krokiem byłyby obliczenia wielostopniowych układów łopatkowych, oparte na uproszczonych modelach 1-D i 2-D, rozpoczynane od przekroju o znanym i stałym rozkładzie parametrów (T. Chmielniak). Dla ostatnich stopni tych wielostopniowych układów pozostaje nadal otwarte pytanie o rozkład ciśnienia (statycznego) za stopniem. Jest on determinowany m. in. przepływem w króćcu wylotowym maszyny (!). Innym zakłócającym czynnikiem jest na pewno wpływ przedmuchów nieszczelności na struk-

turę przepływu w przekrojach kontrolnych (na wlocie do stopnia). Drastyczne przykłady opisuje Marcinkowski, np. [17].

5. Wnioski

Z własnych doświadczeń i doświadczeń innych autorów i grup autorów [7, 8] można zaryzykować zestawienie następujących wniosków:

Problemy modelowania

- Pojawiają się opinie, że nadszedł czas zastąpienia tradycyjnych metod obliczeń przepływu quasi 3-D modelami 3-D. Uzasadnia to rozwój metod numerycznych, rozwój komputerów i prace licznych autorów. Wymowna jest tu jednakże następująca statystyka ASME [8]: na 40 autorów, którzy wyrazili zainteresowanie uczestnictwem w „ślepych” teście obliczeniowym, uczestniczyło w nim ostatecznie tylko dwunastu.
- Natrafia się na trudności w modelowaniu obszarów oderwania i przejścia laminarno-turbulentnego.
- Brak jednoznacznego dowodu, że bardziej złożone modele turbulencji (np. $k \sim \varepsilon$) mają przewagę nad prostszymi modelami (np. Baldwina-Lomaxa). Stwierdzono jednak wyraźny wpływ turbulencji i topologii siatki na sprawność obliczeniową przepływu.
- Nie udało się wykazać przewagi modeli przecieku nieszczelności nad łopatką o gęstej strukturze siatki nad prostszymi modelami⁹.
- Napotyka się na wyniki obliczeń opartych na bardzo różnorodnej ilości oczek w siatce. W cytowanych publikacjach chodziło o przedział 37.000 do 1.000.000. Wpływu gęstości siatki definitywnie nie zbadano. Autorzy wydają się skłaniać do poglądu, że dla siatek typu H ilość oczek powinna wynosić co najmniej 200 000.
- Nie udało się też definitywnie ocenić przewagi bardziej złożonych topologii siatek C i O nad siatkami H, które nastroczają trudności w obszarach wydłużonych oczek. Niestety ci autorzy, którzy używają bardziej złożonych siatek, równocześnie stosują gęstsze siatki, co utrudnia porównania.
- Jak dotąd wyniki obliczeń zależą nie tylko od programu ale i jego użytkownika: te same programy z podobną siatką prowadziły różnych autorów do odmiennych wyników.

⁹Dla przykładu Mertz i in., [13] uzyskał zachęcające wyniki obliczeń przecieku, dla ok. 10.000 oczek w obszarze szczeliny, przy 271.000 oczek o różnym zagęszczeniu w obszarze całego stopnia (kierownica + wirnik).

Technika porównań

- Napotkaliśmy we własnej praktyce i w doświadczeniach innych autorów na niespodziewane trudności w wyciągnięciu konkretnych wniosków z porównania obliczeń między sobą i obliczeń z pomiarami. Wynika to zarówno ze względów organizacyjnych jak i merytorycznych takich jak:
 - różnice w topologii siatek,
 - gęstości oczek,
 - modele licznych zjawisk fizycznych: turbulencji, przecieków, ale także
 - dobór równania stanu (np. dla pary),
 - sposób uwzględniania strat (w modelach 2-D).
- Jest to również spowodowane brakiem obiektywnych metod oceny przewagi jednych wyników obliczeń 3-D nad innymi. Mają one, jak dotąd, subiektywny i jakościowy charakter.
- Przy porównywaniu wyników obliczeń z pomiarem kluczową sprawą staje się wiarygodność pomiaru i umiejętność oceny błędu pomiarowego. Powtarzanie pomiarów różnymi technikami pomiarowymi może zmierzać do takiej obiektywnej oceny.

Oczekiwania projektantów

- Kwerenda ASME wskazuje, że obliczeniowe możliwości metod 3-D (tak jak zresztą quasi 3-D i 2-D) nie spełniają oczekiwań projektantów dotyczących dokładności obliczeń¹⁰; panuje jednak przekonanie, że uzyskanie tej dokładności jest realistyczne w przyszłości.
- Na obecnym etapie wyniki obliczeń numerycznych budzą zainteresowanie bo:
 - ujawniają występowanie zjawisk dotychczas nieujawnionych,
 - pozwalają przynajmniej na relatywną ocenę wpływu korekt geometrii.
- W związku z tymi oczekiwaniami programy obliczeniowe powinny dopuszczać łatwe korekty geometrii.

Pracę zgłoszono w grudniu 1995

¹⁰wg [8] oczekiwania te kształtują się następująco:
przyrost ciśnienia $\pm 1 \div 2\%$,
przyrost temperatury $\pm 1 \div 2\%$
sprawność $\pm 0,5 \div 1,0\%$,
kąt wylotowy z wieńca wirnikowego $\pm 1 \div 2^\circ$

Literatura

- [1] Krzyżanowski J., Czwiertnia K., Łuniewicz B.: *Experience with modernisation methods of large steam turbines low pressure parts*, Proc. of the Power-Gen-Europe'93 Conference, Paris 1993.
- [2] Krzyżanowski J., Czwiertnia K., Łuniewicz B.: *Steam turbine retrofit based on experimental expertise*, Proc. of the Power-Gen-Europe'94 Conference, Köln 1994.
- [3] Krzyżanowski J.: *Turbiny parowe 200/215 MW wczoraj dziś i jutro*, Sesja 15-lecia uruchomienia pierwszego bloku w El. Pątnów, manuskrypt, Pątnów, 1994, także: *Energetyka*, z. 11, 1995.
- [4] Krzyżanowski J.: *Erozja łopatek turbin parowych*, Ossolineum, Seria: Maszyny Przepływowe, Wrocław-Warszawa-Kraków 1991.
- [5] Krzyżanowski J.: *Przegląd metod określania sprawności (części niskoprężnej) turbin*, Zeszyty Naukowe IMP PAN, nr 415/1356/93, Gdańsk 1993.
- [6] Eyb G.: *Experimentelle Untersuchung des Strömungsfeldes am Modell einer ND - Dampfturbinen-Endstufe*, Dysertacja doktorska, Mitteilung des ITSM Uni. - Stuttgart, Nr 32, Stuttgart 1989.
- [7] Gregory-Smith D.G.: *Seminar and workshop: 3D turbomachinery flow prediction III, 9-12 styczeń, 1995*, ERCOFTAC Bulletin, No. 25, June 1995.
- [8] Strazisar A.J., Denton J.D.: *CFD code assessment in turbomachinery - a progress report*, Global Gas Turbine News, ASME-IGTI, May/June, Atlanta 1995.
- [9] Krzyżanowski J.: *Problemy obliczeń przepływowych stopni turbin parowych dużej mocy*, Materiały IV Międzynarodowej Konferencji nt. "Turbiny Parowe Dużych Mocy – konstrukcja i eksploatacja", Elbląg-Gdańsk, 21-24.X.1988.
- [10] Wolf H., Hultsch M.: *Zur Aerodynamischen Auslegung der Niederdruckstufen von Dampfturbinen*, Materiały IV Międzynarodowej Konferencji nt. "Turbiny Parowe Dużych Mocy – konstrukcja i eksploatacja", Elbląg-Gdańsk, 21-24.X.1988.
- [11] Chmielniak T., Łukowicz H.: *Testberechnung einer Stufe der 200 MW Turbine*, Oprac. IMiUEn. Pol. Śląskiej, Gliwice 1990.
- [12] Schaber V.: *Dreidimensionale Strömungsberechnung durch eine Dampfturbinen-Endstufe*, rozdział 8 i 10 pracy doktorskiej, Mitteilung des ITSM Uni.-Stuttgart, Stuttgart, 1992.

- [13] Mertz R., Krückels J., Mayer J.M., Stetter H.: *Influence of grid refinement on the solution of the 3-D Navier-Stokes equations for flow in a transsonic turbine stage with tip gap*, VDI Berichte 1185, Düsseldorf 1995.
- [14] Steam turbines; Performance test codes, ANSI/ASME-PTC 6-1976.
- [15] Interim test code for an alternative procedure for testing steam turbines; Performance test codes, ANSI/ASME PTC 6.1-1984.
- [16] Thermal acceptance tests of steam turbines (VDI rules of steam turbines), DIN 1943, VDI Nachrichten, Nr 10/7, Düsseldorf, March 1975.
- [17] Marcinkowski S.: *Wpływ konstrukcji turbiny na pomiary ciśnień i temperatur pary upustowej*, materiały II Konferencji problemów cieplnych w energetyce, ITC-PW, Warszawa, 5-9.XII.1995.
- [18] Krzyżanowski J., Krzyślak P., Głuch J.: *An application of statistics to validation of turbomachinery calculation methods*, Proc. ASME-Turbo-Expo 1992, Paper No. 92-GT-272, 1992.
- [19] Krzyżanowski J.: *Aerodynamika ostatnich stopni turbin parowych – eksperymentalne i teoretyczne badania przepływu; Nowe wyniki 1991*, Oprac. wewn. IMP PAN, Nr arch. 239/91, Gdańsk 1991.
- [20] Błażko E., Rogala I.: *Porównanie wyników pomiarów i obliczeń przepływowo-termodynamicznych turbiny modelowej*, Oprac. wewn. IMP PAN, Nr arch. 338/92, Gdańsk 1992.

A note on the validation of calculation methods for turbomachinery

Summary

Following the development of computational fluid dynamics, the validation, based on reliable experimental data base, of results of turbomachinery flow calculation has become an essential issue.

In the case of comparison of 1-D calculations and 1-D measurements, a coherent methodology has already been worked out. The methodology has been presented at the conference SYMKOM'91. However, for 2-D calculations and 2-D measurements, let alone 3-D calculations and 3-D measurements, certain methodological difficulties arise. Usually, turbine engineers put up with the qualitative comparison, which is neither coherent nor objective.

The goal of the paper is to focus attention on this generally neglected problem.

The main theses were presented in the proceedings of the conference SYMKOM'95. In this paper more light is shed in Chapter II on two generations of AT (Arbeitsgemeinschaft Turbomaschinen) investigations and comparisons as well as on the question of reliability of experimental measurements. In Chapter IV details are presented concerning the validation of 1-D models and the calculation methods being of interest for AT. The comparison of results of calculations and experiments is documented more extensively. The present paper also points out difficulties in determination of boundary conditions for 2-D and 3-D calculations of stages of turbomachinery.