

## PRZEGLĄD OSIĄGNIĘĆ KRAJOWYCH BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH TURBULENCJI W OKRESIE MINIONEGO DZIESIĘCIOLECIA

S. DROBNIAK

*Instytut Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej*

### Wstęp

Turbulencja jest jednym z najczęściej spotykanych w przyrodzie zjawisk fizycznych, występuje bowiem w atmosferze, rzekach i jeziorach, istnienie jej stwierdza się w materii tworzącej gwiazdy, nie wspominając już o roli jaką odgrywa w lotnictwie czy budowie maszyn energetycznych. Niewątpliwym paradoksem jest równocześnie fakt, że mimo wielu lat badań zarówno teoretycznych jak i eksperymentalnych ten najpowszechniejszy rodzaj ruchu pozostaje do tej pory najmniej poznanym. Przyczyn tego stanu wiedzy jest bardzo wiele, a najistotniejszą wydaje się być niezwykła złożoność turbulencji, wymykająca się próbom ścisłego jej opisu i sprawiająca, że skazani jesteśmy na bardzo uproszczone formy matematycznego jej ujęcia.

Nie bez znaczenia jest również i sposób podejścia do zagadnień turbulencji prezentowany przez ludzi zajmujących się tą problematyką. Jak stwierdził P. Bradshaw „dla jednych turbulencja to dział matematyki, dla drugich wiąże się ona głównie z techniką i technologią, podczas gdy jedynie słusznym wydaje się być traktowanie turbulencji jako zagadnienia wchodzącego w skład fizyki stosowanej”. Oznacza to, że rola dociekań teoretycznych i eksperymentalnych jest tu jednakowo ważna, zaś doświadczenie jest najbardziej istotnym kryterium weryfikującym słuszność proponowanych teorii.

### Charakterystyka współczesnych kierunków w dziedzinie badań turbulencji

Należy zdać sobie sprawę, że niniejsze opracowanie nie jest próbą podsumowania zamkniętego etapu badań, zaś miniony okres nie stanowi jakiegoś odrębnego rozdziału odróżniającego się od dokonań poprzednich. Prawidłowa działalność badawcza musi być uważana za proces ciągły, poznawanie prawd naukowych odbywa się najczęściej drogą nieprzerwanego gromadzenia faktów w celu dokonania ich syntezy. Rzecz jasna, także i w tej dziedzinie zdarzają się wyjątki, prace o charakterze wielkich odkryć stanowią cezurę czasową pozwalającą dzielić badania naukowe na te sprzed i po przełomowym wydarzeniu. Przykładem może tu być opublikowanie hipotezy Prandtla o drodze mieszania (1925 r.) czy też koncepcji lokalnej izotropii Kołmogorowa (1942 r.). Obydwie te teorie ukierunkowały na wiele lat tematykę prac tak doświadczalnych jak i teoretycznych. Spróbujmy odpo-

wiedzieć na pytanie, czy w eksperymentalnych badaniach turbulencji mieliśmy w omawianym okresie do czynienia z takim właśnie odkryciem? I tak i nie. Tak — gdy w pionierskich pracach BROWNA i ROSKO [1] przedstawiono po raz pierwszy absolutnie przekonujący dowód istnienia w typowym przepływie turbulentnym struktur koherentnych. Nie — odpowiadają drudzy, jako że o ich istnieniu wiadano już od dawna, a np. struktura turbulencji w ścieżce wirowej Kármána została już w latach czterdziestych zbadana przez Kovasznaya. Jak zwykle czas okazał się najlepszym sędzią, a dalsze prace prowadzone w tej dziedzinie wykazały doniosłość publikacji Browna i Rosko. Kiedy bowiem KLINE [45] oraz WILLMORTH i. LIU [93] potrafili wykazać, że struktury koherentne odpowiedzialne są za ok. 75% produkcji naprężeń stycznych, wówczas stało się jasne, że rewizji należało poddać zarówno dotychczasowe programy prac doświadczalnych jak i skorygować sposoby teoretycznego ujęcia zagadnienia. Powszechnie do tej pory „wyznawana” koncepcja turbulencji oparta była na mechanizmie kaskady wirów transportujących energię ruchu burzliwego, przy czym przepływ tej energii odbywał się w kierunku wirów o rosnących liczbach falowych. Odkrycie struktur koherentnych charakteryzujących się dużymi udziałami energii przy średnich zaledwie skalach długości wymagało pilnej korekty modelu kaskadowego. Odpowiedzią teorii stały się koncepcje strukturalnego modelowania turbulencji (Structural Modelling of Turbulence), którego oryginalność polega na odejściu od klasycznego operowania wielkościami uśrednionymi w czasie. Uśrednienie występuje w nich bowiem dopiero w ostatniej fazie analizy, polegającej na otrzymaniu rozwiązania w dziedzinie czasu z uwzględnieniem odpowiednich warunków brzegowych. Szczególnie obiecującym przykładem rozwiązań tego typu jest modelowanie dużych struktur wirowych (Large Eddy Simulation), których obszerną bibliografię podaje m.in. HIRATA [37].

Również i w dziedzinie eksperymentu zrobiono do tej pory bardzo wiele, sytuacja jest tu jednak znacznie mniej klarowna i pod wieloma względami przypomina typowe „kłopoty bogactwa”. Początkowo wśród zajmujących się tym problemem specjalistów panowało przekonanie, że każdy rodzaj przepływu winien charakteryzować się występowaniem jednej typowej dla niego struktury koherentnej. I tak dla przepływu w rurze miała nią być bryła (slug), w warstwie przysciennej rozbłysk (burst), zaś w swobodnej strudze — pierścień wirowy (vortex ring). W krótkim jednak czasie w samej tylko warstwie przysciennej wykryto dodatkowo struktury kieszeniowe (turbulent spots), wstęgowe (streaks) i wiele, wiele innych. Jak stwierdził ostatnio jeden z pionierów tej dziedziny prof. Sato, istnieje pilna potrzeba prac unifikacyjnych dotyczących sposobów wykrywania obszarów burzliwości koherentnej, nie można bowiem wykluczyć, że w wielu przypadkach rodzaj odkrytej struktury może być pochodną zastosowanego kryterium detekcji. Najnowszym w tej dziedzinie osiągnięciem meteorologicznym jest metoda rozpoznawania struktur (pattern recognition), której sposób realizacji w odróżnieniu od zwykłego próbkowania warunkowego (conditional sampling) umożliwi znacznie ściślejsze określenie optymalnego progu detekcji (BLACKWELDER [2]). Obserwuje się również w ostatnich latach coraz powszechniejszy trend poszukiwania struktur pierwotnych czy też elementarnych, które byłyby wspólne dla kilku klas przepływów. Jako jedną z możliwości wymienia się przy tym wir agrafkowy (hairpin vortex) a gorącym zwolennikiem tego poglądu był zmarły niedawno M. D. HEAD [38]. Nie należy jednak sądzić, że struktury koherentne są jedynym problemem absorbującym uwagę w doświadczalnych badaniach turbulencji. Jest to niewątpli-

wie kierunek bardzo modny, rokujący nadzieje wielu sukcesów lecz nie oznacza to, że bezcelowe staje się kontynuowanie dotychczasowych kierunków badań. Odkrycie struktur koherentnych nie przybliżyło nas bowiem do poznania tajemnicy turbulencji, wręcz przeciwnie — do wielu już istniejących dodało nowe niewiadome.

### Przegląd krajowych prac doświadczalnych z zakresu mechaniki turbulencji w minionym dziesięcioleciu

Odpowiadając na pytanie jak na tle aktualnych światowych kierunków rozwoju mechaniki turbulencji przedstawiają się badania krajowe, należy odnotować z zadowoleniem, że opóźnienie naszych prac doświadczalnych nie było zbyt duże. Już bowiem w roku 1978 na III KKM CiG przedstawiono prace wykonane w ośrodkach w Poznaniu [4], Wrocławiu [41] i Częstochowie [94] dotyczące zagadnień struktur koherentnych. Do zmniejszenia luki czasowej przyczynił się na pewno fakt, że niektóre z nich wykonane były w laboratoriach zagranicznych, co pozytywnie świadczy o korzyściach wynikających z międzynarodowej współpracy. Mimo iż prace te dotyczą różnych zagadnień (struga płaska, osiowo-symetryczna, strumień uderzający) łączy je jednak wspólna cecha — w każdej z nich zastosowano zabieg wzmocnienia współistniejących w przepływie struktur koherentnych. Inny sposób podejścia do tego zagadnienia prezentuje praca [5], w której poszukuje się optymalnych kryteriów detekcji bez konieczności dodatkowego oddziaływania na przepływ. Dalszy rozwój prac prowadzonych w tej dziedzinie winien umożliwić lepsze poznanie mechanizmu tworzenia się turbulencji otwierając nowe możliwości sterowania procesami wymiany masy i ciepła w przepływie [73], [36]. Dalsze badania uwarunkowane są jednak odpowiednim unowocześnieniem bazy laboratoryjnej, która dotyczyć winna zwłaszcza aparatury umożliwiającej cyfrową analizę sygnałów szybkozmiennych. Przy okazji należy tu podkreślić istnienie wyraźnego sprzężenia zwrotnego między współczesną tematyką badań a rozwojem nowoczesnych narzędzi pomiarowych. Najlepszy przykład stanowią właśnie struktury koherentne, których odkrycie byłoby niemożliwe bez użycia komputerowej techniki „obróbki” sygnału termooanemometrycznego.

Wszechobecność turbulencji w połączeniu z coraz większym znaczeniem problemów ochrony środowiska sprawia, że drugim do ważności „modnym” obecnie kierunkiem badań jest zagadnienie transportu zanieczyszczeń w atmosferze i sterowania procesami opływu budowli. Kierunek ten reprezentowany jest szczególnie wyraźnie w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, a wykonywane tam prace obejmują szeroki zakres tematyczny, od zagadnień typowo aplikacyjnych [57] do podstawowych [67]. Należy przy tym podkreślić szerokie stosowanie technik wizualnych, w użyciu których ośrodek ten ma bezsprzecznie największe w kraju doświadczenie. Wizualizacja, zarówno tradycyjna jak i wykorzystująca bardziej nowoczesne sposoby (technika dyiącego drutu, pęcherzyków wodorowych itp.) jest w zasadzie metodą jakościową, pozwala jednak uzyskać wgląd w mechanizm zachodzących w przepływie przemian, ułatwiając tym samym dokonanie trafnej syntezy wyników ilościowych. W praktyce krajowej jest ona niestety w zbyt małym zakresie stosowana, co stanowi zresztą oznakę pewnej generalnej słabości polskich prac doświadczalnych. Zbyt wielu bowiem autorów

poprzestaje jedynie na prezentacji wyników ilościowych, nie dokonując próby ich syntezy tzn. wyjaśnienia mechanizmu zjawiska, w czym wizualizacja byłaby niejednokrotnie bardzo pomocna.

Z problemem turbulencji atmosferycznej wiąże się zagadnienie modyfikacji struktury ruchu burzliwego wywołanej obecnością dodatkowych sił masowych, takich jak siła wyporu termicznego w warstwie z gradientem temperatury, siły bezwładności wywołane skrzywieniem linii prądu w przepływach zawirowanych itp. Mamy wówczas do czynienia z ciekawą sytuacją, gdy oprócz produkcji turbulencji zachodzącej dzięki obecności naprężeń stycznych występuje dodatkowa generacja energii kinetycznej ruchu burzliwego wywołana działaniem fluktuacyjnych sił masowych. Istnieje pilna potrzeba prowadzenia prac badawczych w tej dalece jeszcze nierozpoznanej dziedzinie, do tej pory nie dysponujemy bowiem żadną zadawalającą teorią przepływu o niestabilnej stratyfikacji. Problemem tym zajmuje się w kraju aż pięć ośrodków, a mianowicie:

- Instytut Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej,
  - Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej,
  - Politechnika Białostocka,
  - Instytut Lotnictwa w Warszawie,
  - Instytut Techniki Ciepłej i Siłników Spalinowych Politechniki Poznańskiej
- przy czym zagadnienia te nie wyczerpują rzecz jasna całości zainteresowań naukowych poszczególnych ośrodków.

Badania podstawowe turbulencji stanowią od kilku już lat główny przedmiot działalności badawczej Instytutu Maszyn Ciepłych. W omawianym okresie wykonano tam szereg interesujących prac doświadczalnych, z których wymienić można przykładowo analizę wpływu gradientu ciśnienia [22] oraz kontrolowanego odsysania i domieszania czynnika [28] na rozwój śladu za opływającym ciałem. Również w IMC zrealizowano cykl badań dotyczących modyfikacji struktury turbulencji zachodzącej dzięki obecności sił masowych wywołanych zakrzywieniem linii prądu [17] oraz dodatkowo jeszcze różnicą temperatur [46] wyjaśniając przy tym szczegółowo ewolucję poszczególnych składników bilansu energetycznego turbulencji [54]. Zagadnienia te wydają się być ważne zarówno ze względów poznawczych (możliwość uściślenia stosowanych obecnie modeli turbulencji) jak i aplikacyjnych — zwłaszcza w dziedzinie spalania.

Zespół pracujący w ITLiMS Politechniki Warszawskiej poświęca główną uwagę zagadnieniu neutralnej stabilnej stratyfikacji przyziemnej warstwy atmosferycznej [63] co wypływa z możliwości praktycznego wykorzystania tego typu przepływu. Należy również wymienić opracowaną w tym ośrodku ciekawą analizę przejścia laminarno-turbulentnego na powierzchni płata z wykorzystaniem funkcji korelacyjnych [47].

Prace prowadzone w Politechnice Białostockiej dotyczą głównie problemu magazynowania ciepłej wody, stąd też w centrum zainteresowania znajduje się tam wymiana ciepła w warstwie granicznej stratyfikowanej stabilnie [68].

We wszystkich omówionych powyżej pracach transportowana wielkość oddziałuje na strukturę ruchu burzliwego, mamy więc do czynienia z tzw. aktywnym transportem wielkości skalarnej. Prace Instytutu Lotnictwa [19, 20] i część prac prowadzonych w IMC [96, 98] dotyczą natomiast zagadnień zamykania równań transportu pędu i ciepła przy założeniu, że ciepło transportowane jest jak typowa wielkość pasywna.

Analizując tematykę prowadzonych w kraju prac badawczych nie sposób nie wspomnieć o jednym z najtrudniejszych problemów meteorologicznych turbulencji a mianowicie o pomiarach korelacji prędkościowo-ciśnieniowych. Zagadnienie to jest przedmiotem zainteresowania kilku prac wykonanych w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN [89, 90].

Cechą charakterystyczną prac doświadczalnych w dziedzinie turbulencji jest znaczny stopień skomplikowania zarówno samej aparatury jak i stosowania procedur pomiarowych. Bardzo szerokie pasmo częstotliwości turbulencji oraz konieczność uwzględniania zjawisk o skalach zmieniających się od dziesiątków kilometrów (turbulencja atmosferyczna) do ułamków milimetra (skala dyssypacji) narzucają bardzo wysokie wymagania czujnikom i metodom pomiaru. Nie jest więc przypadkiem stosunkowo znaczny udział prac czysto meteorologicznych będących wynikiem poszukiwań optymalnego dla danego zagadnienia sposobu prowadzenia eksperymentu. Znaczny udział w tej kategorii opracowań mają następujące ośrodki:

- Instytut Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej,
- Instytut Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie,
- Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

Termoanometria stanowi już od wielu lat obiekt zainteresowania badawczego Instytutu Maszyn Ciepłych P.Cz., w omawianym okresie wykonano tam szereg prac dotyczących analizy odpodzi czujników w burzliwym polu przepływu [33, 34], opracowano również szereg specjalistycznych procedur pomiarowych [18, 52]. Wymienić również należy podjęte w tym ośrodku próby skonstruowania czujnika termoanometrycznego umożliwiającego pomiar dyssypacji energii turbulencji bez konieczności wprowadzania dodatkowych założeń upraszczających [26].

Podkreślić również należy prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, gdzie opracowano szereg specjalistycznych przyrządów, bez których niemożliwa byłaby realizacja wielu krajowych prac doświadczalnych z zakresu turbulencji. Wymienić tu można opracowania dotyczące anemometru impulsowego [77], korelatora analogowego [70] czy też bardzo przydatnego zwłaszcza w pomiarach przemysłowych anemometru stałoprądowego z detektorem zwrotu [43...]

Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska w Gliwicach specjalizujący się w problemach aerodynamiki wentylacji zajmuje się głównie metrologią przepływów silnie zaburzonych o małych wartościach prędkości średnich [74, 75]. Ośrodek ten prowadzi także prace dotyczące zastosowań anemometrii laserowej w aerodynamice wentylacji [35].

W literaturze krajowej pojawiło się kilka wzmianek dotyczących stosowania LDA, są to jednak w większości pomiary o charakterze rozpoznawczym [45, 14]. Oznacza to, że aparatura laserowa nie przekroczyła jeszcze progu praktycznego zastosowania w doświadczalnych badaniach turbulencji. Świadczy to niestety o pewnym opóźnieniu w stosunku do przodujących ośrodków zagranicznych, gdzie pomiary przy użyciu LDA wykonywane są już rutynowo. Wypada więc ubolewać, że aparatura, której wprowadzenie obiecywało przewrót w krajowej metrologii turbulencji nie przynosi do tej pory spodziewanych efektów. Przyczyn tego stanu rzeczy jest na pewno wiele, lecz najbardziej istotną wydaje się być niekompletność posiadanych zestawów LDA i rozproszenie ich w wielu ośrodkach. Inną jeszcze dziedziną metrologii, która nie jest reprezentowana w kraju

są pomiary pól wirowości chwilowej przy zastosowaniu specjalnych, konstruowanych wyłącznie do tego celu czujników. Prowadzenie tego typu badań wymaga jednak opowania specyficznej technologii produkcji miniaturowych sond wielowłóknowych jak również posiadanie dużej ilości kanałów aparatury termooanemometrycznej. Ponieważ tak w jednej jak i w drugiej dziedzinie krajowej stan posiadania jest raczej ubogi, stąd też i brak możliwości realizacji tego typu prac.

### Najważniejsze cechy charakterystyczne krajowych prac doświadczalnych minionego dziesięciolecia

Jak już wspomniano wcześniej, niniejszy przegląd ma charakter czysto okolicznościowy i nie dotyczy żadnego zamkniętego etapu badań. Jest to więc jedynie próba oceny kierunków krajowych badań doświadczalnych turbulencji na tle analogicznych prac prowadzonych zagranicą. Pamiętając o tym autor nie rości sobie praw do ferowania ocen i wyrokowania, który z omówionych kierunków jest ważniejszy czy bardziej obiecujący od innych. Szczęśliwie się jednak składa, że przed dziesięć laty z okazji II Kongresu Nauki Polskiej bardzo wnikliwą i krytyczną ocenę polskich prac badawczych w zakresie turbulencji przedstawili prof. J. Mączyński i doc. J. Kołodko. Spróbujmy więc przypomnieć najważniejsze tezy ich referatów i zastanowić się, na ile zachowują one słuszość w odniesieniu do omawianego okresu. W największym skrócie można je ująć następująco:

- istnieje wyraźne zjawisko zacofania badawczego w porównaniu z nauką światową, wyrażające się zarówno w ubogim wyposażeniu laboratoriów jak i w braku oddźwięku na nowoczesne koncepcje turbulencji,
- krajowe prace doświadczalne dotyczą głównie wtórnych efektów turbulencji takich jak wymiana ciepła i masy, nie zaś podstaw turbulencji i jej mechanizmów,
- prace polskie nie są obecne na żadnym z międzynarodowych sympozjów naukowych w dziedzinie turbulencji, nie publikuje się prac badawczych nawiązujących do głównych nurtów badawczych na świecie.

Niektóre z tych zarzutów straciły przynajmniej w części swoją zasadność jako że prace krajowe były w minionym dziesięcioleciu publikowane w poważnych wydawnictwach [6, 28] oraz wielokrotnie prezentowane na międzynarodowych sympozjach poświęconych turbulencji [30, 3]. Ważną rolę w przełamaniu izolacji i zapóźnienia odegrały staże naukowe w przodujących ośrodkach zagranicznych i nawiązanie ścisłej współpracy z organizacjami naukowymi pracującymi w dziedzinie turbulencji. W rezultacie kierunki krajowych prac badawczych w większości zgadzają się z problematyką, nad którą pracuje się obecnie zagranicą przykładem — struktury koherentne.

Wypada jednak zgodzić się z aktualnym nadal zarzutem marginalności prac doświadczalnych, które w zbyt małym stopniu skierowane są na fizykalną interpretację zachodzących w przepływie zjawisk. Niewątpliwa użyteczność badanych efektów turbulencji nie może przesłaniać konieczności poznawania jej mechanizmów, bez znajomości których nie można wyciągać wniosków o takim stopniu uogólnienia, jaki wymagany jest od pracy naukowej. Uważne przejrzenie zamieszczonej w niniejszym artykule bibliografii prac doświadczalnych skłania do wniosku, że znakomita ich większość dotyczy zagadnień

mających bezpośredni związek z praktyką przemysłową co przeczy w sposób oczywisty obiegowym opiniom o oderwaniu nauki od przemysłu.

Prace doświadczalne w dziedzinie turbulencji są niestety bardzo kosztowne, a niski stopień rozwoju zaplecza produkcyjnego aparatury sprawia, że opierają się one w znacznej mierze na przyrządach pochodzących z importu. W rezultacie dziedzina ta jest bardzo wrażliwa na wszelkie wahania w ilości przeznaczonych na nie środków. Porównanie ilości prac doświadczalnych z zakresu turbulencji na poszczególnych konferencjach MCiG wykazuje, że maksimum przypada na rok 1978 i od tej pory liczba tego rodzaju prac systematycznie maleje.

Jedną z przyczyn, które na to zjawisko mają bezpośredni wpływ jest postępująca dekapitalizacja i moralne starzenie się posiadanej w kraju aparatury. Rozproszenie środków materialnych sprawia również, iż niejednokrotnie brak części zamiennych zestawu pomiarowego nie pozwala na należyte wykorzystanie pozostałych jego elementów.

Należy również przypomnieć wielokrotnie podnoszony zarzut, iż krajowe prace badawcze są bardzo rozproszone, brak bowiem w kraju ośrodka takiego jak np. francuski Institut de Mecanique Statistique de la Turbulence, który mógłby koordynować poszczególne tematy badań.

### **Przewidywane kierunki rozwoju badań doświadczalnych turbulencji**

Niezwykła złożoność struktury przepływów burzliwych sprawia, że jakiegokolwiek przewidywania co do przyszłych i obiecujących z poznawczego punktu widzenia kierunków badań są zajęciem nader niewdzięcznym. Dotychczas zgromadzony zasób informacji i doświadczeń wskazywałby jednak na trzy najważniejsze, przyszłościowe dziedziny zainteresowań.

Pierwszą z nich jest klasyczny eksperyment prowadzony w ścisłym powiązaniu z potrzebami numerycznego modelowania przepływów turbulentnych. Nowe, obiecujące hipotezy zamykania układu równań ruchu takie jak chociażby koncepcja transportu naprężeń, wymagają niezbędnego „wsadu” eksperymentalnego. Nie chodzi tu jednak o proste porównanie sumarycznych wyników obliczeń z rezultatami doświadczenia, lecz raczej o eksperymentalną weryfikację słuszności przyjętych koncepcji modelowania poszczególnych członów równań transportu. W dziedzinie numerycznych modeli turbulencji liczące się w skali krajowej osiągnięcia ma Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej, w którym od wielu już lat pracuje się nad modelem K-E. Należy sądzić, że uzupełnienie dociekań teoretycznych odpowiednim programem eksperymentalnym mogłoby w efekcie znacznie rozszerzyć nasz zasób wiedzy o istocie ruchu burzliwego.

Druga dziedzina to niewątpliwie problem struktur koherentnych, których badania są mimo wielkich osiągnięć ciągle jeszcze w stadium wstępnym. Nasz zasób wiadomości o zorganizowanej wirowości jest dalece niewystarczający, zbyt wiele zagadnień o fundamentalnym nieraz znaczeniu jest tu nadal otwartych. Zważywszy obserwowany w ostatnich latach dynamiczny rozwój tej gałęzi wiedzy sądzić można, że również w przyszłości będzie ona stanowić nadal pole dla eksperymentu. Złożoność tych zjawisk wymagać

będzie jednak dość istotnych modyfikacji stosowanych obecnie narzędzi badawczych. Coraz powszechniejsza staje się opinia, iż jedynie pomiary ilościowe połączone integralnie z wizualizacją zachodzących w przepływie procesów mogą być tu właściwym rozwiązaniem. Wydaje się, że ten właśnie typ pomiarów pozwoli zawęzić bardzo szeroki obecnie zakres dowolności w interpretacji wyników.

Ostatnią wreszcie grupą badań wartych chyba dalszej kontynuacji jest eksperymentalna analiza skomplikowanych i trudnych do analitycznego ujęcia przepływów trójwymiarowych. Przykładem mogą tu być zjawiska zachodzące w rzeczywistych maszynach przepływowych jak również w tym przypadku rozwój badań warunkowany jest uzyskaniem specjalnej aparatury pomiarowej.

### Przegląd bibliograficzny prac z zakresu badań doświadczalnych turbulencji

Ograniczone łamy niniejszego opracowania są przyczyną, dla której niemożliwe było przytoczenie wszystkich prac, jakie ukazały się w tej dziedzinie w minionym dziesięcioleciu. W szczególności pominięto opracowania dotyczące przepływów przez palisady, jako że przegląd taki zawarty jest w mającej się niebawem ukazać odrębnej monografii J. Elsnera [32]. W zestawieniu bibliograficznym oparto się głównie na streszczeniach referatów wygłoszonych na Krajowych Konferencjach Mechaniki Ciecży i Gazów, wychodząc z założenia, że formuła tych konferencji zapewnia lepszy przegląd prowadzonych w kraju prac. Inne publikacje zamieszczone są tylko w tych przypadkach, gdy nie znajdują swego odpowiednika w treści zgłoszonych referatów. Dlatego nie wszystkie prace na to zasługujące mogły być tu wymienione, celem przeglądu nie było jednak zestawienie wszystkich publikacji z tej dziedziny lecz taki ich wybór, który byłby reprezentatywny dla najważniejszych kierunków prowadzonych w kraju badań. Rzecz jasna, za wszelkie niedopatrzienia wyłączną winę ponosi autor, stąd wszelkie uwagi i uzupełnienia będą powitane z prawdziwą wdzięcznością.

#### Literatura cytowana w tekście

1. BROWN, A. ROSKO, *Journal of Fluid Mechanics*, 1974, vol. 64.
2. R. BLACKWELDER, *Pattern Recognition of Coherent Eddies*, Proc. Dynamics Flow Conf., Marseille, 1978.
3. W. BIAŁOSKÓRSKI, H. BOGIŃSKI, J. KOŁODKO, *Niektóre wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych w dziedzinie hydrodynamiki jezior. II KKMCIg*, 1976.
4. L. BOGUSŁAWSKI, E. DUBANIEWICZ, Cz. POPIEL, *Badanie turbulentnego strumienia swobodnego w pobliżu wylotu z rury*.
5. L. BOGUSŁAWSKI, *Struktury koherentne turbulentnej warstwy przyściennej*, ZN Pol. Poznańskiej, 1982.
6. L. BOGUSŁAWSKI, Cz. POPIEL, *Flow Structure of the free round turbulent jet in the initial region*, J. F. M., 1979, vol. 90.
7. K. BRODOWICZ, T. DYAKOWSKI, M. SHAMLOUL, *Badanie stateczności laminarnego przepływu z odsysaniem*, IV KKMCIg — 1980.
8. J. BRYKALSKI, *Badania rozkładu ciśnienia na modelu kadłuba śmigłowca z nadmuchem wirnika*, IV KKMCIg, 1980.



9. W. CHUDZIK, S. GOMUŁA, W. RONCZYŃSKI, *Badanie kinematyki ruchu wirowego indukowanego w przestrzeni ograniczonej*, IV KKMCiG, 1980.
10. W. CHUDZIK, S. GOMUŁA, W. RONCZYŃSKI, *Badania dyssypacji energii w ruchu wirowym powietrza*, IV KKMCiG, 1980.
11. W. CZERNUSZENKO, P. LEBIECKI, *Pomiary podstawowych charakterystyk turbulencji przy przepływie wody w kanale otwartym*, III KKMCiG, 1978.
12. B. DEPTUŁA, B. DOMALANUS, W. GOŁAŚ, *Experimental investigations of the thermal boundary layer*, Mat. XIII Bien. Fluid Dyn. Symp.
13. B. DEPTUŁA, W. GOŁAŚ, B. DOMALANUS, *Termiczna warstwa przyścienna w przepływach laminarnych i turbulentnych*, IV KKMCiG, 1980.
14. T. DOBSKI, *Pomiar poziomu turbulencji w płomieniu za pomocą sondy mikrofonowej*, ZN Pol. Pozn. Nr 22, 1982.
15. P. DOMAGAŁA, *Analiza odpowiedzi czujników termooanemometrycznych w zmiennym polu prędkości i temperatur*, II KKMCiG, 1976.
16. P. DOMAGAŁA, *O pewnej metodzie pomiaru dyssypacji energii w przepływach turbulentnych*, ZN. Pol. Pozn. Nr 22, 1982.
17. S. DROBNIAK, *Ewolucja pól prędkości w osiowo-symetrycznej strudze ze zmiennym zawirowaniem wstępnym*, II KKMCiG, 1976.
18. S. DROBNIAK, *Lepkość wirowa w osiowo-symetrycznych strugach zawirowanych*, IV KKMCiG, 1980.
19. T. DROZD, *Metody doświadczalne wyznaczania zależności zamykających układ równań opisujących turbulentny przepływ nieizotermiczny*, III KKMCiG, 1978.
20. T. DROZD, *Wyznaczanie charakterystyk cieplno-przepływowych w oparciu o mechanizm turbulentnego transportu pędu i ciepła w różnych rodzajach przepływów*, IV KKMCiG, 1980.
21. J. ELSNER, S. DROBNIAK, *Turbulent energy distribution in a turbine cascade blade*, XIV Bien. Fluid. Dyn. Symp.
22. J. ELSNER, J. WILCZYŃSKI, *Evolution of Reynolds Stresses in Shear Flows with longitudinal pressure gradient*, XII Bien. Fluid Dyn. Symp.
23. J. ELSNER, J. WILCZYŃSKI, *Lepkość wirowa w strugach zapalisadowych z podłużnym gradientem ciśnienia*, II KKMCiG, 1976.
24. J. ELSNER, T. TARNOWSKI, *Odpowiedź sondy X na zmianę kierunku przepływu strugi*, III KKMCiG, 1978.
25. J. ELSNER, S. DROBNIAK, *Metoda wyznaczania tensora naprężeń burzliwych w przepływie przestrzennym*, III KKMCiG, 1978.
26. J. ELSNER, P. DOMAGAŁA, *Dwukanalowa metoda termooanemometryczna dla wyznaczania dyssypacji energii turbulencji*, IV KKMCiG, 1980.
27. J. ELSNER, J. KURZAK, *Ewolucja bnieizotermicznej zawirowanej strugi osiowo-symetrycznej*, V KKMCiG, 1982.
28. J. ELSNER, A. JARŻA, *The wake flow pattern behind a row of parallel plates with slot or surface suction of the flowing medium*, Mat. Konf. „Structure and Mechanism of Turbulence”, vol. I, wyd. Springer Verlag, 1978.
29. J. ELSNER, *Contemporary problems of hot-wire anemometry*, Tagung — Turbulenzmesstechnik, Berlin 1981, Akademie der Wissenschaften der DDR.
30. J. ELSNER, S. DROBNIAK, P. DOMAGAŁA, *A New Hot-Wire Method for experimental analysis of turbulence energy dissipation*, Proc. of 132 Euromech Colloquium, Lyon 1980.
31. J. ELSNER, S. DROBNIAK, *Turbulence Structure in swirling jet*, IUTAM Symp. „Structure of Complex Shear Flow”, 1982. wyd. Springer-Verlag (w druku).
32. J. ELSNER, *Aerodynamika palisad łopatkowych*, Wyd. PWN (w druku).
33. J. ELSNER, T. TARNOWSKI, *Odpowiedź sondy X na zmianę kierunku przepływu strugi*, III KKMCiG.
34. J. ELSNER, T. TARNOWSKI, *Charakterystyki katowe mostkowego układu termooanemometrycznego*, Mat. symp. TURBULENCJA 74, Częstochowa, 1974.
35. E. GRABEK, *Badania ruchu wirowego gazu w cyklonie*, IV KKMCiG, 1980.
36. E. GRABEK, Z. POPIOLEK, *Zastosowanie anemometru laserowego w badaniach modelowych z zakresu wentylacji i odpylenia*. III KKMCiG, 1978.

37. M. HIRATA, H. TANAKA, H. KOWAMURA, N. KASAGI, *Heat Transfer in Turbulent Flows*, The Seventh Int. Heat Transfer Conf. München, 1982.
38. M. R. HEAD, *New aspects of turbulent boundary layer structure*, J. F. M., 1981, vol. 107.
39. A. JARŻA, *Charakterystyka turbulentnej warstwy przyściennej przy jej odsysaniu przez ściankę porowatą*, I KKMCIg, 1974.
40. A. JARŻA, *Odsysanie czynnika z krawędzi splywu płytek a mikrostruktura ich śladów aerodynamicznych*, I KKMCIg, 1974.
41. A. JARŻA, *Oddziaływanie turbulencji wstępnej na przepływ za palisadą płytek przy szczelinowym odsysaniu gazu z krawędzi splywu*, III KKMCIg, 1978.
42. K. JEŻOWIECKA-KABSCH, *Ekspansja nieściśliwego strumienia turbulentnego*, III KKMCIg, 1978.
43. K. JEŻOWIECKA-KABSCH, *Badania struktury rozprzestrzeniania się płaskiej strugi oscylacyjnej*, IV KKMCIg, 1980.
44. J. KIEŁBASA, R. TYSOWSKI, *Anemometr stałotemperaturowy z linearyzátorem i detektorem zwrotu*, III KKMCIg, 1978.
45. S. J. KLINE et al J. F. M., 1967, vol. 30.
46. J. KONIECZKA, J. MIZERACZYK, S. KWAŚNIEWSKI, *Różnicowy anemometr laserowy do pomiaru przepływu cieczy i gazów*, III KKMCIg, 1978.
47. L. KURZAK, *Ewolucja pól temperatury w zawirowanej strudze osiowo-symetrycznej*, III KKMCIg, 1978.
48. M. LITWIŃCZYK, S. SKRZYŃSKI, *Badanie struktury przepływu w strefie przejścia drogą pomiaru funkcji korelacyjnych*, III KKMCIg, 1978.
49. E. MANEK, S. PIEŃKOWSKI, *Wpływ burzliwej warstwy wody na geometrię zbiorników akumulujących ciepłą wodę*, ZN Pol. Pozn. Nr 22, 1982.
50. J. MORDARSKI, S. TRĄBSKI, *Ścieżka wirawa za układem wielowalcowym w niejednoordnym polu prędkości*, II KKMCIg, 1976.
51. S. MIERZWIŃSKI, *Badania w zakresie aerodynamiki odpylania i wentylacji prowadzone w Zakładzie Ogrzewnictwa, Wentylacji i Ochrony Atmosfery Pol. Śląskiej*, III KKMCIg, 1978.
52. J. MICZKA, J. ZIELIŃSKI, *Badania rozwoju pola temperatur za palisadą podgrzewanych ciał*, I KKMCIg, 1974.
53. M. MUSIALIK, *Termoanemometryczna metoda pomiaru przepływów przestrzennych o znacznych gradientach prędkości*, III KKMCIg, 1978.
54. M. MUSIALIK, *Analiza przepływu osiowo-symetrycznego z zawirowaniem wstępnym*, III KKMCIg, 1978.
55. M. MUSIALIK, *Przemiany energii turbulencji w osiowo-symetrycznej strudze zawirowanej*, IV KKMCIg, 1980.
56. M. MUSIALIK, *Mikrostruktura i lokalna izotropia w turbulentnych strugach zawirowanych*, ZN Pol. Pozn. Nr 22, 1982.
57. J. OSTROWSKI, J. WOJCIECHOWSKI, L. TURKOWSKI, *The study of the flow control near the ground by the use of forest canopy*. XIV Bien. Fluid Dyn. Symp.
58. J. OSTROWSKI, M. LITWIŃCZYK, L. TURKOWSKI, *The results of the test of the secondary flow phenomena past the body and wing-body combination of the gliders*, XIV Bien. Fluid Dyn. Symp.
59. J. OSTROWSKI, J. WOJCIECHOWSKI, *Stadium oplywu hal huty*, I KKMCIg, 1974.
60. J. OSTROWSKI, W. PEŁKA, *Model tunelu pulsującego do badania zjawisk oplywu w przepływie nieustalonym*, I KKMCIg, 1974.
61. J. OSTROWSKI, M. LITWIŃCZYK, S. SKRZYŃSKI, *Badania oplywu kadłubów szybowców i przejścia skrzydło-kadłub*, I KKMCIg, 1974.
62. J. OSTROWSKI, *Zjawiska oplywu profilów laminarnych o wysokich współczynnikach siły nośnej*, I KKMCIg, 1974.
63. J. OSTROWSKI, *Wpływ przepływów wtórnych na ukształtowanie pola prędkości przepływu głównego*, II KKMCIg, 1976.
64. J. OSTROWSKI, P. SIERPUTOWSKI, *Zjawiska oplywu przeszkód terenowych*, II KKMCIg, 1976.
65. J. OSTROWSKI, J. WOJCIECHOWSKI, *Zasady kształtowania stref ochronnych i pasów zielonych dla zmniejszenia przyziemnego transportu zanieczyszczeń*, III KKMCIg, 1978.

66. J. OSTROWSKI, J. WOJCIECHOWSKI, *Zjawiska generacji warstwy przyściennej w przepływie przyspieszonym*, III KKMCiG, 1 1978.
67. J. OSTROWSKI, S. BRODOWICZ, *Badanie wpływu rozpraszaczy wiru końcowego na charakterystyki aerodynamiczne i obciążenie płata*, III KKMCiG, 1978.
68. J. OSTROWSKI, P. SIERPUTOWSKI, *Aerodynamika wiatru i jej problematyka*, IV KKMCiG, 1980.
69. K. PIĘNKOWSKI, *Turbulencja termiczna w płynach statecznie stratyfikowanych*, IV KKMCiG, 1980.
70. J. PIOTROWSKI, Z. POPIOLEK, W. ŚLĘZAK, *Metody wzorowania termooanemometrów stosowane w Zakładzie Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Śląskiej*, III KKMCiG, 1978.
71. J. PIWOWARCZYK, *Elektroniczny korelator analogowy i jego zastosowanie w mechanice płynów*, III KKMCiG, 1978.
72. Cz. O. POPIEL, *Turbulentny osiowo-symetryczny strumień uderzający*, III KKMCiG, 1978.
73. Cz. O. POPIEL, E. DUBANIEWICZ, *Badanie struktury makrowirów w uderzającym strumieniu osiowo-symetrycznym*, IV KKMCiG, 1980.
74. Cz. O. POPIEL, *Zagadnienia uporządkowania struktur przepływu w osiowo-symetrycznych strumieniach swobodnych i uderzających*. ZN Pol. Pozn. Nr 22, 1982.
75. Z. POPIOLEK, W. ŚLĘZAK, *Interpretacja sygnału termooanemometru w silnie burzliwych przepływach o małych prędkościach*. III KKMCiG, 1978.
76. Z. POPIOLEK, *Statystyczne błędy pomiaru prędkości turbulencji przepływu*, IV KKMCiG, 1980.
77. G. RYGIEL, Z. WIERCIŃSKI, *Odkształcenie ścieżki von Kármána napływającej na cylinder*, IV KKMCiG, 1980.
78. J. RYSZ, B. STASICKI, *Anemometr do pomiaru powolnych przepływów*, III KKMCiG, 1978.
79. Z. ROMICKI, H. STIEWITT, *A. Dünckelacker of flow structures in liquids the help of ultrasound*, XII Bien. Fluid Dyn. Symp.
80. P. SIERPUTOWSKI, J. OSTROWSKI, *Wpływ fali generowanej przy podmuchu na obciążenia bryły nieopływowej umieszczonej wewnątrz warstwy przyściennej*, III KKMCiG, 1978.
81. P. SIERPUTOWSKI, *Charakterystyki turbulencji w modelowanej, atmosferycznej warstwie przyziemnej*, IV KKMCiG, 1980.
82. S. SKRZYŃSKI, *Badanie pola przepływu w otoczeniu laminarnych profili lotniczych z uwzględnieniem zjawiska przepływu w warstwie przyściennej*, I KKMCiG, 1974.
83. S. SKRZYŃSKI, M. LITWIŃCZYK, *Zjawiska przejścia warstwy laminarnej w turbulentną na profilach lotniczych*, II KKMCiG, 1976.
84. A. SMOLNY, *Weryfikacja wybranych metod pomiaru naprężeń stycznych na ścianie dla turbulentnej warstwy przyściennej*, ZN Pol. Pozn. Nr 22, 1982.
85. Z. SMÓLSKI, H. SOBKOŃSKA, *Wpływ wilgotności względnej przepływającego powietrza na charakterystyki czujników termooanemometrycznych*, III KKMCiG, 1978.
86. Z. SMÓLSKI, H. SOBKOŃSKA, *Eksperymentalna weryfikacja 3-ch znanych metod odwzorowywania charakterystyk czujników termooanemometrycznych*, III KKMCiG, 1978.
87. E. SOEHRICH, *Próby określenia warunków samomodelowania przepływu w modelach wentylacyjnych pomieszczeń*.
88. K. SZYMOCHA, *Przydatność anemometru laserowego w badaniach przepływu płynów*, III KKMCiG, 1978.
89. W. TRUTWIN, S. GOMUŁA, M. KRUSZYŃSKI, *O próbie określenia zależności współczynnika dyfuzji turbulentnej w powietrzu od prędkości ruchu powietrza*, III KKMCiG, 1978.
90. Z. WIERCIŃSKI, *Optymizacja cylindra jednorodnym strumieniem płynu i eksperymentalne określenie korelacji wzajemnej ciśnienia i prędkości w przepływie*, IV KKMCiG, 1980.
91. Z. WIERCIŃSKI, *Pomiar korelacji wzajemnej ciśnień na powierzchniach dwóch cylindrów dla podkrytycznych liczb Reynoldsa, gdy drugi cylinder umieszczony jest w śladzie sypłowym pierwszego*. ZN. Pol. Pozn. Nr 22, 1982.
92. J. WILCZYŃSKI, *Przepływ ze ścinaniem przy istnieniu podłużnego gradientu ciśnienia*, I KKMCiG, 1974.
93. W. W. WILLMORTH, S. S. LIU, *Structure of the Reynolds stress and the occurrence of bursts in the turbulent boundary layer*. Adv. in Geophysics, 1974, Academic Press.
94. R. WOLAŃSKI, M. JANIK, R. KŁAJNY, *Turbulentna struga swobodna w polu oddziaływań akustycznych*, III KKMCiG, 1978.

95. J. ZIELIŃSKI, *Uwagi do pomiarów temperatury w turbulentnym przepływie nieizotermicznym*, I KKMCiG, 1974.
96. J. ZIELIŃSKI, *Określenie współczynnika turbulencji dyfuzji termicznej w płaskim przepływie nieizotermicznym*, II KKMCiG, 1976.
97. J. ZIELIŃSKI, *Ewolucja przepływu nieizotermicznego za palisadą ciał symetrycznych*, IV KKMCiG, 1980.
98. J. ZIELIŃSKI, *Turbulentna liczba Prandtla w przepływie zapaliskowym*. ZN Pol. Pozn. Nr 22, 1982.

*Praca została złożona w Redakcji dnia 10 lipca 1983 roku.*

---