

Janusz W. ELSNER

Instytut Maszyn Ciepłych
Politechniki Częstochowskiej

WSPÓLczesne TENDENCJE W BADANIACH TURBULENCJI

Streszczenie: W pracy wskazano na miejsce turbulencji w dziedzinie nauk ścisłych, podkreślając jej charakterystyczne cechy i przytaczając istniejące definicje zjawiska. Omówiono ogólną metodologię badań, problemy modelowania turbulencji i współczesną technikę eksperymentu z podkreśleniem roli cyfrowej analizy wyników doświadczeń.

1. Miejsce turbulencji w dziedzinie nauk ścisłych

Turbulencja jako najbardziej powszechne zjawisko przepływowe jest obiektem zainteresowania zarówno astrofizyków, jak i meteorologów, inżynierów budownictwa przemysłowego i wodnego, specjalistów z zakresu maszyn przepływowych, aparatury chemicznej, ochrony środowiska, transportu lotniczego, lądowego, wodnego i wielu innych dziedzin. Mimo swego interdyscyplinarnego charakteru turbulencja jako zjawisko występujące w trakcie ruchu cieczy i gazów należy jednak w pierwszym rzędzie do mechaniki płynów, stanowiąc jej najbardziej dynamicznie rozwijający się dział.

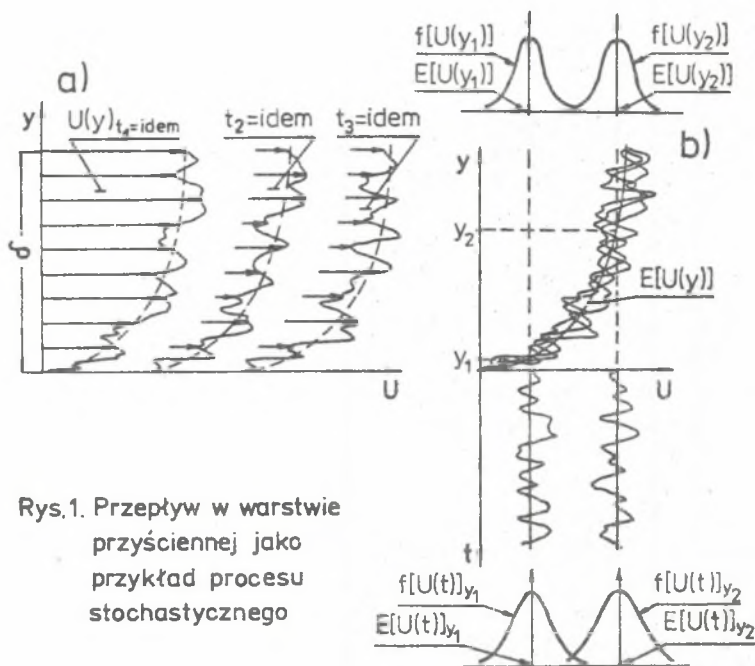
Turbulencja jest dziedziną stosunkowo młodą, formującą się dopiero w XIX wieku dzięki pracom Hagena (1839) i przede wszystkim Reynoldsa (1883). Według Cebeci'ego [1] termin "przepływ turbulentny" zaproponowany został dopiero w 1887 roku przez lorda Kelvina, który określenie to wprowadził na stałe do zbioru podstawowych kategorii pojęciowych mechaniki płynów.

2. Współczesne definicje turbulencji

Definicja turbulencji, począwszy od oryginalnego sformułowania O. Reynoldsa, poprzez określenia Taylora i von Karmana (1937) przechodziła znamieną ewolucję. Według współczesnego (1977) określenia Frosta i Muldena [2] termin "turbulentny" jest synonimem słowa "chaotyozny", w chaosie bowiem zawarte są główne cechy tego ruchu. Często stosowany termin "ruch przypadkowy" nie jest natomiast według [2] właściwy, jeżeli założymy bowiem, że fluktuacje jednej ze składowych prędkości mają charakter przypadkowy, wówczas fluktuacje składowych pozostałych są już zdeterminowane warunkiem ciągłości.

Zgodnie z definicją Hinze'a [3] przepływ turbulentny jest to nieuporządkowany ruch płynu, w którym wszystkie charakteryzujące go wielkości fizyczne wykazują losową zmienność w czasie i w przestrzeni i mogą być

opisane za pomocą odpowiednio uśrednionych momentów statystycznych. Podkreślenie losowej zmienności parametrów przepływu w czterowymiarowej czasoprzestrzeni jest niezwykle istotne, wskazać bowiem można na istnienie przepływów, w których na przykład prędkość lub ciśnienie wykazują losowy charakter tylko w czasie lub tylko w przestrzeni i które w związku z tym nie mogą być zaliczone do rodziny przepływów turbulentnych.



Rys.1. Przepływ w warstwie przyściennej jako przykład procesu stochastycznego

Turbulencja stanowi zatem typowy przykład nieprzerwanej realizacji wielowymiarowego procesu stochastycznego, w którym rolę nielosowego parametru odgrywać może zarówno czas, jak i współrzędne przestrzeni. Tezę tę ilustruje rys. 1a, na którym przedstawiono trzy "zamrożone" w czasie chwilowe profile prędkości w warstwie przyściennej, uzyskane metodą "dymiącego drutu" [4,5]. Każdy z tych profili stanowi zapis pojedynczej realizacji procesu stochastycznego $\{U(y), y \in (0, \delta)\}$, w którym rolę nielosowego parametru odgrywa współrzędna y , mierzona w kierunku normalnym do powierzchni ścianki. Zbiór dostatecznie dużej liczby realizacji należących do jednego i tego samego procesu uzyskany być może drogą wielokrotnego powtarzania doświadczenia w ściśle tych samych, niezmiennych warunkach. Stałość tych warunków zapewniona może być na mocy założenia o statystycznie ustalonym w czasie charakterze przepływu, przy którym poszczególne realizacje $U(y)_{t=\text{idem}}$ z rys. 1a uznane być mogą za należące do jednego i tego samego procesu. Każdemu przekrojowi procesu (rys. 1b)

podporządkowany może być zatem odpowiedni rozkład prawdopodobieństwa $f[U(y)]$, co pozwala w konsekwencji na wyznaczenie dowolnego momentu funkcji losowej $U(y)$, na przykład jej wartości przeciętnej

$$(1) \quad E[U(y)] = \int_{-\infty}^{+\infty} U(y) f[U(y)] dU,$$

która określa profil prędkości średniej w warstwie. Ponieważ ponadto każda naniesiona na rys. 1b krzywa $U(y)_{t=idem}$ odpowiada innej obwili czasu, dlatego też wartość przeciętna $E[U(y)]$ wyznaczana być może również ze związku

$$(2) \quad E[U(y)] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U(y, t_i),$$

w którym liczba naturalna n oznacza ilość zrealizowanych doświadczeń.

Wartość oczekiwaną prędkości określić można również traktując prędkość lokalną dla $y=idem$ jako losową funkcję czasu. Ponieważ w każdym punkcie przepływu dysponujemy w tym przypadku tylko jedną, doświadczalnie zdjętą realizacją funkcji $U(t)_{y=idem}$, dlatego też niezbędne jest założenie ergodyczności procesu, które pozwala zapisać

$$(3) \quad E[U(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} U(t) dt$$

Przytoczony przykład wskazuje na zasadność sformułowanego przez Hinze'a zastrzeżenia definicyjnego, zgodnie z którym przepływ turbulentny stanowi ten rodzaj ruchu, w którym wszystkie charakteryzujące go wielkości fizyczne wykazywać muszą losową zmienność zarówno w czasie, jak i w przestrzeni.

Integralną cechą ruchu turbulentnego jest wreszcie występowanie w nim oalej galaktyki wirów o rozmiarach zmieniających się w sposób ciągły od największych do najmniejszych skal. Własności wirów największych o najniższych częstotliwościach określane są poprzez warunki ruchu średniego, z którego pobierają one swą energię przekazując ją następnie wirom o coraz mniejszej skali. Im mniejszy jest rozmiar wiru, tym większy jest gradient prędkości w wirze i tym większe naprężenia styczne, które przeciwdziałają ruchowi wirowemu. Jednocześnie zmniejsza się zależność od warunków ruchu średniego, rośnie natomiast wpływ lepkości, która prowadzi do dysypacji energii kinetycznej wirów o najdrobniejszych skalach. Tak więc w każdym ruchu turbulentnym istnieje skończony zakres rozmiarów wirów, przy czym w innych warunkach stałych rozmiary wirów najdrobniejszych maleją wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa.

Znamienną cechą turbulencji jest również według Tennekesa i Lumley'a [6] jej 3-wymiarowy i dyfuzyjny charakter, który objawia się w drastycznej intensyfikacji zachodzących w przepływie procesów transportu. Wszystkie wymienione wyżej specyficzne własności wzięte łącznie pozwalają dopiero na w miarę pełne i współcześnie poprawne scharakteryzowanie turbulencji, tak powszechnego a zarazem tak złożonego zjawiska przepływowego.

3. Metodologia badań turbulencji

Współczesna metodologia badań turbulencji wyróżnia dwa odmienne sposoby podejścia do problemu, z których pierwszy nazwać by można umownie podejściem matematyków, drugi zaś - podejściem przedstawicieli nauk technicznych.

W sposobie pierwszym, opartym na gruncie teorii układów dynamicznych, traktuje się turbulencję jako efekt utraty stabilności równań Naviera - Stokesa. Z ogromnej liczby poświęconych tej problematyce pozycji wyróżnić można przykładowo prace takich autorów, jak: Lera [7], Hopf [8], Ladyżenskaja [9], Ruelle i Takens [10], Marsden i Cracken [11] i innych.

W warunkach krajowych matematyczne podejście do zagadnień turbulencji znalazło między innymi wyraz w tematyce dwóch szkół letnich zorganizowanych przez Politechnikę Wrocławską (TURBULENCJA A TEORIA UKŁADÓW DYNAMICZNYCH - Karpacz, czerwiec 1980) oraz przez Zakład Mechaniki Cieczy i Gazów IPPT-PAN (BIFURKACJA, STABILNOŚĆ ORAZ INNE ZAGADNIENIA MATEMATYCZNE RÓWNAŃ NAVIERA-STOKESA - Jabłonna, wrzesień 1980.).

Drugi sposób podejścia do problemu turbulencji opiera się głównie na metodach statystycznych oraz na zastosowaniu nowoczesnych technik doświadczalnych. Poza szczególnym przypadkiem wykrywania struktur koherentnych nie jesteśmy z reguły zainteresowani analizą ruchu pojedynczych struktur wirowych, lecz jedynie oceną ich szeregów, uśrednionych własności. Przy opisie turbulencji stosuje się zatem procedurę uśredniania równań transportu, która w efekcie przekształca je jednak w układ niezamknięty. Formułowanie odpowiedniej liczby brakujących związków stanowi treść tzw. modelowania turbulencji.

4. Hipotezy zamykające

Konstrukcja hipotez zamykających, czyli modelowanie turbulencji, stanowi jeden z podstawowych problemów współczesnej mechaniki przepływów turbulentnych. Istota zagadnienia wynika z faktu, że uwzględnienie związków superpozycyjnych

$$(4) \quad \begin{aligned} U(\mathbf{x}, t) &= \bar{U}(\mathbf{x}) + u(\mathbf{x}, t), \\ P(\mathbf{x}, t) &= \bar{P}(\mathbf{x}) + p(\mathbf{x}, t), \end{aligned}$$

na przykład w równaniu transportu pędu ustalonego turbulentnego przepływu płynu nieściśliwego przekształca je po uśrednieniu do postaci:

$$(5) \quad \frac{D\bar{U}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{\frac{\partial U_j}{\partial x_i}} - \overline{u_i u_j} \right),$$

która zawiera w sobie nieznanne a priori korelacje prędkości. Stanowią one składniki tensora dodatkowych naprężeń turbulentnych, zwanych naprężeniami Reynoldsa i powodują, że układ równań opisujących ruch turbulentny staje się układem niezamkniętym. W tej sytuacji niezbędne jest sformułowanie odpowiednich hipotez zamykających, stanowiących zgodnie z defi-

nicją Laundera i Spaldinga [12] dodatkowy układ równań, - które rozwiązane wspólnie z równaniami ruchu średniego umożliwiają obliczenie podstawowych wielkości charakteryzujących przepływ turbulentny.

Mimo istnienia różnorodnych kryteriów klasyfikacyjnych, matematyczne modele turbulencji dzieli się najczęściej na dwie grupy. Modele grupy pierwszej oparte są na koncepcji lepkości turbulენტnej, wiążącej tensor naprężeń Reynoldsa z tensorem prędkości deformacji przepływu średniego

$$\bar{D}_{ij} = \partial \bar{U}_i / \partial x_j + \partial \bar{U}_j / \partial x_i \quad \text{zgodnie ze związkiem}$$

$$[6] \quad \overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \sqrt{T} \bar{D}_{ij},$$

w którym $k = \frac{1}{2} \overline{u_k u_k}$ oznacza kinetyczną energię turbulencji. Współczynnik lepkości \sqrt{T} aproksymowany może być algebraicznie w funkcji wybranych parametrów ruchu średniego lub też wyznaczany w oparciu o równania transportu jednej lub dwóch odpowiednio dobranych wielkości (na przykład energii turbulencji k i jej dyssypacji ϵ w 2-równaniowym modelu $k-\epsilon$).

Modele grupy drugiej nie wykorzystują pojęcia lepkości turbulენტnej, zaś naprężenia Reynoldsa wyznaczone zostają bezpośrednio z własnych równań transportu, które wyrażają przestrzenną zmianę naprężeń jako sumę efektów produkcji, dyfuzji, redystrybucji i dyssypacji. Modele te w swej najbardziej rozwiniętej postaci zawierają do 23 [13], a nawet i 28 [14, 15] równań różniczkowych. Dokładność modelu rośnie na ogół wraz ze wzrostem liczby równań, zwiększa się jednak równocześnie koszt czasu komputerowego. Jeżeli proponowany model za cenę prostoty i oszczędności kosztów nie zapewnia lepszej dokładności obliczeń, to cechy te dyskwalifikują jednoznacznie jego dalszą przydatność.

Konstrukcja hipotez zamykających była przedmiotem zainteresowań całej plejady autorów. W pierwszym rzędzie wymienić tu należy Prandtla [16], który w 1925 sformułował historycznie pierwszy model turbulencji w 2-wymiarowej warstwie przyściennej w oparciu o teorię drogi mieszania oraz Kolmogorova [17] - autora pierwszego modelu 2-równaniowego z roku 1942. Duży wkład w dziedzinę modelowania turbulencji wnieśli w późniejszych latach Rotta [18], Harlow i Nakayama [19], Spalding [20, 21], Saffman [22] i wielu innych.

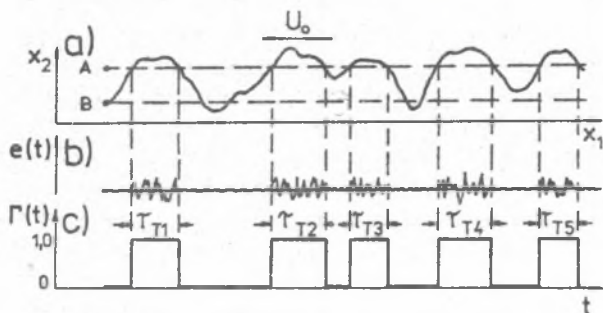
Odrębnym problemem są metody modelowania turbulენტnej wymiany ciepła podsumowane między innymi w pracach Laundera [23], Kolovandina [24] czy też Hirata i współautorów [25].

5. Metodyka badań eksperymentalnych

Ze względu na przedstawione wyżej trudności w teoretycznej analizie przepływów turbulentnych szczególnie duży udział w procesie ich poznawania miały, mają i mieć będą metody eksperymentalne. Ich gwałtowny, jakościowy rozwój związany był z wprowadzeniem do techniki pomiarowej w latach 40-tych termooanemometru z grzaniem czujnikiem, zaś w latach 60-tych - dopplerowskiej anemometrii laserowej. Obie te metody, doskonalone nieprzerwa-

nie w oparciu o postęp nowoczesnej elektroniki, zapewniają obecnie możliwość pomiaru całego szeregu złożonych wielkości fizycznych, charakteryzujących przepływy turbulენტne.

Niewątpliwą rewelacją w metrologii przepływów turbulენტnych stanowiło również wprowadzenie w latach 60-tych cyfrowej techniki przetwarzania sygnałów niosących w sobie zakodowane informacje o charakterze badanego zjawiska. Technika ta, która do chwili obecnej znalazła już powszechne, rutynowe zastosowanie w większości specjalistycznych laboratoriów światowych, nie tylko w istotny sposób rozszerzyła instrumentalną bazę eksperymentu, ale i otworzyła przed nim nowe możliwości poznawcze. Przykładem może tu być procedura warunkowego próbkowania sygnału pomiarowego, która umożliwia między innymi analizę zjawiska intermittencji, zauważonego po raz pierwszy przez Corrsina [26] w 1943 roku. Zjawisko to, charakterystyczne dla przepływów swobodnych, polega na istnieniu ruchomej powierzchni rozdziału (rys. 2a), która rozgranicza przepływ turbulენტny od przepływu bezwirowego. Sygnał wyjściowy czujnika umieszczonego w strefie przepływu



Rys.2. Przepływ intermittenncy: a) powierzchnia rozdziału, b) odpowiedź napięciowa czujnika, c) funkcja intermittencji

intermittenncygo (rys. 2b) ma przebieg zależny od tego, po której stronie powierzchni rozdziału znajduje się on w danej chwili czasu. Liczbową miarą zjawiska jest współczynnik intermittencji γ , definiowany związkem

$$(7) \quad \gamma = \frac{\sum (\tau_{T_i})}{T}.$$

Licznik wyrażenia (7) stanowi sumę okresów, w których punkt obserwacji znajduje się po wewnętrznej stronie powierzchni rozdziału, a więc w strefie przepływu turbulენტnego (rys.2), natomiast T oznacza tu całkowity czas pomiaru.

Omawiane zjawisko scharakteryzowane być może również za pomocą funkcji intermittencji, określonej zależnością:

$$(8) \quad \Gamma(x, t) = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli w chwili } t \text{ punkt określony wektorem} \\ & \text{ należy do obszaru przepływu turbulენტnego} \\ 0 & \text{jeżeli w chwili } t \text{ punkt ten leży poza obszarem} \\ & \text{ przepływu turbulენტnego,} \end{cases}$$

Przykładowy jej przebieg zilustrowany został na rys. 2c, zaś zastosowanie funkcji Γ w procesie uśredniania warunkowego (symbol $\langle \rangle$) wynika np. ze związku

$$\langle u^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \Gamma(t) u^2(t) dt = \overline{\Gamma u^2}$$

Szczególnym rodzajem uśredniania warunkowego jest tzw. uśrednianie fazowe lub grupowe, stosowane przy analizie powstawania i rozwoju struktur koherentnych. Struktury te, choć odkryte dzięki zastosowaniu metod wizualizacyjnych [27,28], są obecnie obiektem pogłębionych studiów przy użyciu techniki termocanemometrycznej, połączonej z komputerowym opracowaniem danych doświadczalnych [29,30].

Podstawowym problemem techniki cyfrowej jest rodzaj współpracy komputera z systemem przyrządów pomiarowych. Pierwszy z tych sposobów, znany pod nazwą systemu on - line lub też przetwarzania w czasie rzeczywistym, stosowany może być wówczas, gdy czas przetwarzania jest krótszy od czasu pobierania informacji, co wymaga zastosowania maszyn cyfrowych o odpowiednio dużej szybkości działania. Sposób drugi to praca w systemie of - line, która wiąże się z kolei z koniecznością zapamiętywania i przechowywania pewnej ilości danych do chwili, gdy moc obliczeniowa komputera zostaje zwolniona do opracowania zarejestrowanych wcześniej informacji.

Najważniejszym merytorycznym etapem cyfrowego opracowywania wyników eksperymentu jest proces przetwarzania informacji liczbowych wprowadzonych do pamięci komputera. Proces ten, oparty na wykorzystaniu specjalistycznych algorytmów obliczeniowych, pozwala w szczególności na zastosowanie procedury warunkowego uśredniania, a w konsekwencji na analizę funkcji intermityncji, badanie rozwoju i rozpadu struktur koherentnych itp. Jakościowy skok w rozwoju techniki cyfrowej związany był z opracowaniem algorytmu szybkiej transformaty Fouriera, który wprowadzony został do praktyki obliczeniowej przez Cooley'a i Tukey'a [31] w 1965 roku. Procedury FFT, stosowane głównie w analizie korelacyjno-spektralnej, zrewolucjonizowały technikę obliczeń cyfrowych, stwarzając możliwości niedostępne dla klasycznych metod analogowych.

Drugą istotną zaletą techniki cyfrowego opracowywania wyników doświadczeń jest fakt, że przechowywaniu podlega tu oryginalny, uzyskany w trakcie pomiarów zapis sygnału. Zapis ten, dostępny w każdej chwili, przetwarzany być może wielokrotnie, pozwalają na uzyskiwanie dowolnych informacji o własnościach badanego zjawiska.

- X -

Ze względu na ograniczone ramy pracy omówiono w niej jedynie najbardziej ogólne problemy turbulencji, związane w pierwszym rzędzie z metrologią badań tego złożonego zjawiska przepływowego. Informacje szczegółowe

znaleźć można w licznych opracowaniach monograficznych, z których przykładowo wymienić można prace Bradshawa [32], Tennekesa i Lumley'a [6], A.J.Reynoldsa [33], Hinze'a [3], Townsenda [34], Frosta i Mouldena [2] i innych.

Literatura

- [1] Cebeci T., Smith A.M.O.: Analysis of turbulent boundary layers. New York: Academic Press 1974.
- [2] Frost W., Moulden T.H.: Handbook of Turbulence. New York: Plenum Press 1977.
- [3] Hinze J.O.: Turbulence. 2nd ed. New York: Mc Graw-Hill 1975.
- [4] Corke T. i in.: A new technique for introducing controlled sheets of smoke streaklines in wind tunnels. W: Proc.Int. Congress on Instr.in Aerospace Simulation Fac. IEEE Publ. 1977 77CH 1251-8 AES, ss. 74-80.
- [5] Kasagi N., Hirata M., Yokobori S.: Visual studies of large eddy structures in turbulent shear flows by means of smoke wire method. W: Proc.of Int.Symp.on Flow Visualization, Tokyo 1977, ss.169-174.
- [6] Tennekes H., Lumley J.L.: A first course in turbulence. Cambridge: MIT Press 1972.
- [7] Leray J.: Étude de divers equations integrales non lineaires et de quelques problemes que pose l'hydrodynamique, J.Math. Pures Appl., 12 1933 .
- [8] Hopf E.: Über die Anfangswertaufgabe für hydrodynamischen Grundgleichungen, Math. Nachv., 4 1951 .
- [9] Ladyzenskaja O.A.: The mathematical theory of viscous incompressible flow. Gordon and Breach, New York 1969 .
- [10] Ruelle D., Takens F.: On the nature of turbulence. Commun.Math.Phys. 20,ss.167-192 1971 .
- [11] Marsden J.E., Mc Cracken M.: The Hopf bifurcation and its applications, Applied Math.Sci. vol 19, Springer, New York 1976 .
- [12] Launder B.E., Spalding D.B.: Mathematical models of turbulence. London: Academic Press 1972.
- [13] Davydov B.I.: K statističeskoj dinamike nesžimaemoj turbulentnoj židkosti. Dokl.Akad. SSSR 1961 T.136 ss.47-50.
- [14] Kolovandin B.A., Vatuten I.A.: K statističeskoj teorii neodnorodnoj turbulentnosti nesžimaemoj židkosti. Inž.Fiz. Z.1970 T.19,ss.789-802.
- [15] Kolovandin B.A., Vatuten I.A.: On the statistical theory of nonuniform turbulence. W: Progr.Heat Mass Transfer. Vol.4. London: Pergamon Press 1971,ss.257-277.
- [16] Prandtl L.: Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz. ZAMM 1925 Bd.5, ss.136-139.

- [17] Kolmogorov A.N.: Uravnenija turbulentnogo dviženija nesžimaemoj židkosti. Izv.Akad.Nauk SSSR ser.Fiz.1942 T.6 nr 1-2, s.56-58.
- [18] Rotta J.: Statistische Theorie nichthomogener Turbulenz. Z.Phys.1951 Bd.129, s.547-572.
- [19] Harlow F.H., Nakayama P.J.: Transport of turbulence energy decay rate. W: LA Rep.-3854 Los Alamos Sci.Lab., University of California 1968.
- [20] Spalding D.B.: The calculation of the length scale of turbulence in some turbulent boundary layers remote from walls. W:Imperial College, Heat Transfer Section Rep. TWF/TN/31 1967.
- [21] Spalding D.B.: The prediction of two-dimensional steady turbulent flows. W: Imperial College, Heat Transfer Section Rep. EF/TN/A/16 1969.
- [22] Saffman P.G.: A phenomenological theory for the computation of turbulent shear flows. W: Lecture Notes in Mathematics. Vol.615.Turbulence Seminar, Proc. 1976/77. Ed.P.Barnard, T.Ratui. Berlin: Springer-Verlag 1977 s.71-82.
- [23] Launder B.E.: Heat and mass transport. W: Turbulence.Ed.P.Bradshaw. Berlin: Springer-Verlag 1978, s.231-287.
- [24] Kolovandin B.A.: Korreljacionnoe modelirovanie processov perenosa v sdvigovyh turbulentnyh tečenijach.W: Akad.Nauk BSSR, Institut Teplomassoobmena. Minsk 1982 preprint nr 5.
- [25] Hirata M. i in.: Heat transfer in turbulent flows.W:Proc.-Seventh. Int.Heat Transfer Conf., München 1982.
- [26] Corrsin S.: Investigation of flow in an axially symmetrical heated jet of air.W: NACA W-94 1943.
- [27] Kline S.J. i in.: The structure of turbulent boundary layers. J.Fluid Mech.1967 Vol.30 part 4, s.741-773.
- [28] Brown G.L., Roshko A.: On density effects and large-scale structure in turbulent mixing layer. J.Fluid Mech.1971 Vol.64, s.775-816.
- [29] Wygnanski J.: The recognition of an evolved large scale structure in turbulent shear flows.W:Proc.of the Dynamic Flow Conference 1978 s.191-211.
- [30] Hussain A.K.M.F., Zaman K.B.M.Q.: Vortex pairing in a circular jet under controlled excitation. Part.2. Coherent structure dynamics. J.Fluid Mech.1980 Vol.101 part 3, s. 193-544.
- [31] Cooley J.W., Tukey J.W.: An algorithm for the machine calculations of Fourier series.Math.Comput.1965 Vol.19, s.297.
- [32] Bradshaw P.: Turbulence.W: Topics in Applied Physics.Vol.12. Turbulence. Ed.P.Bradshaw.Berlin:Springer-Verlag 1978.
- [33] Reynolds A.J.: Turbulent flows in engineering.London:John Wiley 1974
- [34] Townsend A.A.: The structure of turbulent shear flow. 2nd ed. Cambridge: University Press 1976.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Р е з ю м е

В работе указано место турбулентности в отрасли физико-математических наук, подчёркивая её характеристические свойства, приведено существующие дефиниции явления.

Обсуждено общую методологию исследований, проблемы моделирования турбулентности и современную технику эксперимента. Подчёркнуто значение численного анализа результатов исследований.

CONTEMPORARY TRENDS IN TURBULENCE RESEARCH

S u m m a r y

The report indicates the position of turbulence in the domain of pure and applied sciences, discussing its characteristic features and existing definitions. The general problems of research methodology, turbulence modelling as well as the modern experimental technique including digital ones are also among the main points of interest of the paper.