

Seria: MECHANIKA z. 113

Nr kol. 1198

Krzysztof J. JESIONEK

Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów  
Politechnika Wrocławska

Arkadij E. ZARJANKIN

Energomaszynostroitelnyj Fakultet, Kafiedra Parowych i Gazowych Turbin  
Moskowskij Energetičeskij Institut

## NIEKTÓRE PROBLEMY MODELOWANIA PRZEPIYWÓW TURBULENTNYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę znaczenia różnych parametrów przepływu turbulentnego (jak intensywność turbulencji, energia kinetyczna turbulencji, rozkład energii turbulencji w funkcji częstotliwości, współczynniki korelacyjne i skala turbulencji) w procesie modelowania przepływów. Na podstawie przeprowadzonych rozważań stwierdzono, że stopień turbulencji jest najważniejszym parametrem z wymienionych i powinien być dołączony do stosowanych kryteriów podobieństwa.

## SOME PROBLEMS OF MODELLING OF TURBULENT FLOWS

Summary. A several turbulent flow parameters (e.g. turbulence intensity  $E$ , turbulent kinetic energy  $q$ , frequency distributions of energy of velocity fluctuations  $F(n)$ , correlation coefficients  $R_{ij}$ , the scale of turbulence  $L$ ) and their meanings in the flow modelling process have been analysed in this paper. It was found that in modelling procedure of the turbulent flows, the turbulence intensity  $E$  is the most important flow parameter of them.

## НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Резюме. В работе представлен анализ значения разных параметров турбулентного течения (степень турбулентности, энергия пульсационного движения, распределение энергии по частотам, коэффициенты корреляции и масштаб турбулентности) в процессе моделирования. На этой основе можно отметить, что степень турбулентности является самым главным и должно включить его в число критериев моделирования течения турбулентных потоков.

## 1. WSTĘP

Przy rozwiązywaniu większości ważnych pod względem technicznym zagadnień związanych z ruchem płynu w kanałach ma się zwykle do czynienia z przepływem o charakterze turbulentnym. Pole prędkości w danym przekroju kontrolnym zmienia się w chaotyczny sposób z upływem czasu. W takich warunkach, do opracowania jakiegokolwiek, możliwej do przyjęcia metodyki obliczeń wymienionych przepływów stosowane jest następujące rozwiązanie.

Otóż rzeczywisty, niestacjonarny strumień zastępowany jest pewnym strumieniem kwazistacjonarnym, dla którego przeprowadzana jest następnie stosowna analiza przepływu. Przy takim podejściu pojawia się pytanie, jakie wielkości charakterystyczne powinien posiadać wyżej wspomniany strumień kwazistacjonarny, aby na przykład obliczeniowe wartości strat energii w kanałach odpowiadały wartościom rzeczywistym.

Analogiczne pytanie powstaje także w nawiązaniu do problemów związanych z modelowaniem przepływu turbulentnego. Jeżeli przepływ stacjonarny określony jest w pełni poprzez pole prędkości, a do jego modelowania wystarczające jest zapewnienie proporcjonalności wektorów prędkości i równość ich kierunków w odpowiednich punktach charakterystycznych modelu i obiektu, to w przypadku strumienia turbulentnego obraz przepływu ulega już istotnej komplikacji. I rzeczywiście, w tym ostatnim przypadku rozpatrywać należy cały szereg nowych wielkości.

## 2. WIELKOŚCI CHARAKTERYSTYCZNE PRZEPŁYwu TURBULENTNEGO

Do zbioru parametrów charakterystycznych dla analizowanego przepływu turbulentnego zalicza się, pomijając uśrednioną prędkość

$$C = i \cdot \bar{u} + j \cdot \bar{v} + k \cdot \bar{w} \quad (1)$$

takie wielkości, jak:

- intensywność lub stopień turbulencji

$$E = \sqrt{\frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}}{3 \bar{C}^2}} \quad (2)$$

- energia kinetyczna turbulencji (energia pulsacji przepływu)

$$q = \frac{1}{2} \left( \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (3)$$

- rozkład energii w funkcji częstotliwości  $n$  (charakteryzowany jest przez funkcję spektralną  $F(n)$ ), która dla średnich częstotliwości jest proporcjonalna do  $n$

$$F(n) \cong n^{-5/3} \quad (4)$$

natomiast dla dużych wartości  $n$

$$F(n) \cong n^{-7} \quad (5)$$

- współczynnik korelacji  $R_{ij}$  (w skrajnym przypadku - w punkcie) określony przez zależności

$$\left. \begin{aligned} R_{xy} &= \frac{\overline{u'v'}}{\sqrt{\overline{u'^2}} \sqrt{\overline{v'^2}}} \\ R_{yz} &= \frac{\overline{v'w'}}{\sqrt{\overline{v'^2}} \sqrt{\overline{w'^2}}} \\ R_{zx} &= \frac{\overline{w'u'}}{\sqrt{\overline{w'^2}} \sqrt{\overline{u'^2}}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

- skala turbulencji ( $R$  promień przekroju poprzecznego strumienia)

$$L = \int_0^R R_{ij} \cdot dy \quad (7)$$

gdzie:  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$  - składowe prędkości uśrednionej  $C$  w kierunkach osi układu współrzędnych,

$u'$ ,  $v'$ ,  $w'$  - składowe pulsacyjne prędkości,

$$\sqrt{\overline{u'^2}} \quad \sqrt{\overline{v'^2}} \quad \sqrt{\overline{w'^2}} \quad - \text{średniokwadratowe składowe pulsacyjne prędkości.}$$

Okazuje się, że z wyżej przytoczonych pięciu wielkości charakteryzujących strumień turbulentny, cztery są niezależne, a energia pulsacji związana jest

ze stopniem turbulencji E prostą zależnością

$$q = \frac{3}{2} \bar{c}^2 \cdot E^2 . \quad (8)$$

### 3. WARUNKI PODOBIENSTWA

W tej sytuacji aby zapewnić podobieństwa dwóch przepływów turbulentnych, konieczna jest nie tylko proporcjonalność prędkości uśrednionych w odpowiadających punktach modelu i obiektu, ale także osiągnięcie w tych punktach jednakowych wartości stopnia turbulencji, podobnego charakteru zmian funkcji spektralnych, równości współczynników korelacji oraz skali turbulencji.

Łatwo zauważyć, że zapewnienie równości wymienionych wielkości w dwóch podobnych przepływach jest praktycznie niemożliwe. A zatem w problematyce modelowania przepływów turbulentnych chodzi głównie o tzw. modelowanie częściowe. Z całego bowiem zestawu charakterystycznych kompleksów bezwymiarowych wybiera się tylko te, które w maksymalnym stopniu wpływają na badany proces. Prawdą jest, że taki wybór powinien być poprzedzony specjalnymi badaniami, które pozwalają oszacować stopień oddziaływania każdego kompleksu na analizowane zjawisko.

Taka procedura daje możliwości uwzględnienia wspomnianego oddziaływania za pomocą szeregu współczynników poprawkowych. Wykorzystując omówione wyżej podejście, rozważyć można w jaki sposób wymienione wielkości określające przepływ turbulentny, mogą wpływać na charakterystyki energetyczne badanych modeli i obiektów.

### 4. ZNACZENIE STOPNIA TURBULENCJI

Spśród zbioru wielkości charakterystycznych, stopień turbulencji napływającego strumienia należy rozpatrywać jako parametr decydujący i bezdyskusyjnie włączyć go do bazy podstawowych kryteriów modelowania procesów przepływowych, zarówno hydrodynamicznych, jak i cieplnych. Wniosek taki wynika z rozważań czysto energetycznych dlatego, że właśnie stopień turbulencji określa energię ruchu pulsacyjnego.

Z fizykalnego punktu widzenia, turbulencja napływającego strumienia zmienia przede wszystkim warunki kształtowania się warstwy przyściennej i zgodnie z tym może w zasadniczy sposób zmienić charakter przepływu płynu w kanałach. Stopień oddziaływania rozpatrywanej wielkości zależy w pierwszej kolejności od wzdłużnego gradientu ciśnienia.

## 5. PRZEPLWY KONFUZOROWE

W kanałach konfuzyjnych, gdzie występuje ujemny wzdłużny gradient ciśnienia (przepływ ulega tu przyspieszeniu), podwyższony stopień turbulencji w praktyce zawsze pociąga za sobą wzrost oporów, czyli podwyższenie strat energetycznych.

Ostatnie stwierdzenie wynika bezpośrednio z równania służącego do obliczania współczynnika strat  $\zeta$  w kanałach o dowolnym kształcie

$$\zeta = 1 - \varphi_0^2 \left( 1 - \frac{\bar{\Delta}_2^{***}}{1 - \bar{\Delta}_2^*} \right). \quad (9)$$

W równaniu powyższym występują takie wielkości, jak:

- względna powierzchnia przepływu odpowiadająca stratom energii w przekroju wylotowym wg [3] i [4]

$$\bar{\Delta}_2^{***} = \frac{\Pi_2 \cdot \Delta_2^{***}}{A_2}, \quad (10)$$

gdzie:  $A_2$  - pole powierzchni przekroju wylotowego,

$\Pi_2$  - obwód zwilżany tego przekroju,

$\Delta_2$  - miara liniowa strat energii,

- względna powierzchnia przepływu odpowiadająca stracie wydatku

$$\bar{\Delta}_2^* = \frac{\Pi_2 \cdot \Delta_2^*}{A_2}, \quad (11)$$

gdzie:  $\Delta_2^*$  - miara liniowa straty wydatku,

- współczynnik prędkości

$$\varphi_0 = \frac{u_{2\max}}{u_{2t}}, \quad (12)$$

gdzie:  $u_{2max}$  - prędkość maksymalna w przekroju wylotowym,  
 $u_{2t}$  - teoretyczna prędkość strumienia w tymże przekroju przy nieobecności strat energii w rdzeniu.

Ponieważ w przepływie konfuzorowym profil prędkości w warstwie przyściennej jest wypełniony w sposób wystarczający, to przy podwyższonej turbulencji zewnętrznej dodatkowy transport pędu i energii w kierunku ścianki nie może już w sposób istotny zmienić tego wypełnienia. Wchodzące do równania (9) integralne charakterystyki warstwy przyściennej rosną wraz ze wzrostem stopnia turbulencji napływającego strumienia prawie proporcjonalnie do tempa narastania fizycznej grubości  $\delta$  warstwy przyściennej. Należy mieć na uwadze także jednoczesny spadek wartości współczynnika prędkości  $\varphi_0$ , uwarunkowany dysypacją energii turbulencji poza obszarem warstwy przyściennej.

W rezultacie, zgodnie z danymi eksperymentalnymi [1], przy powiększeniu stopnia turbulencji napływającego strumienia od wartości 1% do 10%, obserwuje się w konfuzorowej palisadzie profili wzrost strat energii rzędu 50%. Dla przepływu konfuzorowego można więc w zasadzie zbudować pewną uniwersalną zależność, pozwalającą uwzględnić wpływ stopnia turbulencji za pomocą odpowiednich współczynników poprawkowych.

## 6. PRZEPIŁY DIFUZOROWE

Zagadnienie przepływu turbulentnego ulega diametralnej zmianie w przypadku analizy odcinków dyfuzorowych, gdzie składowa prędkości strumienia w kierunku ruchu głównego stopniowo maleje wzdłuż osi kanału. W rezultacie następuje zamiana części energii kinetycznej w energię potencjalną. Efektem takiej przemiany jest przyrost wartości ciśnienia statycznego w kierunku głównego ruchu strumienia. Przepływ odbywa się wtedy w warunkach występowania dodatniego wzdłużnego gradientu ciśnienia.

W takich okolicznościach małe wypełnienie profilu prędkości w obszarze warstwy przyściennej, przy niskiej turbulencji zewnętrznej, stwarza możliwości bardzo silnego przekształcania wyjściowego profilu prędkości ze wzrostem  $E$ .

W rezultacie powierzchni integralne warstwy przyściennej (10) i (11), określające wielkości współczynnika strat (9), zmieniają się w niewielkim stopniu. Przy wystąpieniu zjawiska oderwania strumienia od ścianki, powierzchnie te zaczynają ze wzrostem stopnia turbulencji zmniejszać się, powodując w efekcie końcowym spadek wartości współczynnika strat energii (9). W ten sposób dla przepływów dyfuzorowych nie jest w zasadzie możliwym znalezienie dostatecznie ogólnej zależności na określenie strat energii w funkcji stopnia turbulencji. A zatem kryterium to powinno zawsze być uwzględnione przy modelowaniu różnego rodzaju przepływów turbulentnych.

## 7. POZOSTAŁE PARAMETRY

Oddziaływanie pozostałych parametrów turbulencji na charakterystyki energetyczne kanałów w zasadzie nie było przedmiotem badań, dlatego można tu prowadzić jedynie ogólne rozważania. Tak więc wydaje się pożądane, aby przeanalizować oddziaływanie skali turbulencji  $L$  (7) jednocześnie ze spektralną funkcją  $F(n)$ , (4) i (5). Rzecz jest jednak w tym, że sztucznie generowana turbulencja ma tendencję do wygaszania się w funkcji czasu według zależności wykładniczej, a poza tym przechodzi ona szybko od wielkoskalowej turbulencji w drobnoskalową. Stąd w dużym zakresie funkcja spektralna okazuje się uniwersalna, bo tylko w części początkowej jest zależna od skali turbulencji. Wynika stąd, że do zbioru określonych kryteriów modelowania można nie wliczać zarówno skali turbulencji, jak i funkcji spektralnej, ponieważ prawdopodobne ich oddziaływanie na finalne charakterystyki warstwy przyściennej jest w sumie niewielkie.

Bardziej złożone wydaje się zagadnienie znaczenia wartości współczynników korelacji  $R_{ij}$ . Ponieważ wielkości te są w pewnym sensie miarą skojarzenia ortogonalnych składowych pulsacji prędkości w analizowanym punkcie pola przepływu, posiadają one wiarygodną naturę w wyniku stochastycznego charakteru ruchu turbulentnego. A więc przy turbulencji swobodnej wartości współczynników korelacji powinny zbliżać się do 50%, ( $R_{ij} = 0,5$ ). Dowolna, mogąca się pojawić niesymetria przepływu zmienia wartości  $R_{ij}$ , powodując ich spadek w rezultacie naruszenia zasady równego rozkładu prawdopodobieństwa. Wskutek tego dla przepływu w kanale o przekroju prostokątnym według danych [2],  $R_{ij}$  zmienia się w zakresie  $0,33 < R_{12} < 0,43$ ,



natomiast w tzw. strugach swobodnych jest według [5] i [6] równe  $\approx 0,4$ .

Przytoczone dane pozwalają więc także i tego parametru turbulencji nie uwzględniać jako istotnego kryterium w procesie modelowania.

## 8. PODSUMOWANIE

Przedstawione rozważania prowadzą do wniosku, że w zagadnieniach związanych z problematyką modelowania przepływów turbulentnych, konieczne jest włączenie do zbioru kryteriów podobieństwa także intensywności turbulencji  $E$ , (2).

## LITERATURA

- [1] Baranowski B. W., Wlijanije turbulentnosti i nierawnomiernosti wchodnogo profilja skorosti na energeticzeskije charakteristiki kanalow, Awto-refierat dissertacji, MEI, Moskwa, 1976.
- [2] Comte-Bellot G., Ecoulement turbulent entre deux parois paralleles, Publications Scientifiques et Techniques du Ministre de l'Air, 1965 r., p. 160.
- [3] Dejcz M. E., Zarjankin A. E., Gidrogazodinamika, Energoatomizdatielstwo, Moskwa 1984.
- [4] Jesionek K. J., Analiza nieściśliwego przepływu dyfuzorowego i powstających strat, Prace Naukowe Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Pol. Wrocław. Nr 43, Seria: Monografie nr 21, Wrocław 1992.
- [5] Liepmann H. W., Laufer J., Investigation of free turbulent mixing, NACA Technical Note 1257, 1947.
- [6] Townsend A. A., Turbulent Shear Flow, Cambridge University Press, Cambridge, England, 1956.

Recenzent: Prof. Ryszard Gryboś

Wpłynęło do Redakcji dnia 26. 10. 1992

## Abstract

Turbulent motion is chaotic. Yet the term "chaotic" must be used almost as a synonym for the word "turbulent". This is the substance of the motion.



Experimental studies usually measure a temporal mean of the physic quantities under investigation.

Prediction of unsteady turbulent flows has developed greatly during the last few years, due to the improvement of calculation methods and closure models. Unfortunately, the knowledge of the physics of the phenomenon has not progressed as much, and there exists still a lack of experimental data to validate the theoretical work. This is one of the reasons for undertaking the study of modelling investigations of turbulent flows.

A several turbulent flow parameters [e.g. turbulence intensity  $E$  (2), turbulent kinetic energy  $q$  (3), frequency distributions of energy of velocity fluctuations  $F(n)$  (4) and (5), correlation coefficients  $R_{ij}$  (6), the scale of turbulence  $L$  (7)] and their meanings in the flow modelling process have been analysed in this paper. It was found that in the modelling procedure of turbulent flows, the turbulence intensity  $E$  is the most important flow parameter of them.