

WSPÓŁCZESNE METODY MODELOWANIA PRZEPLYWÓW TURBULENTNYCH W OTOCZENIU PORUSZAJĄCEGO SIĘ AUTOBUSU MIEJSKIEGO

W niniejszej pracy przedstawiono aktualne tendencje w numerycznym modelowaniu przepływów turbulentnych oraz założenia i ograniczenia przy modelowaniu turbulencji metodami RANS, DNS oraz LES. Przedstawiono również pakiet Ansys FLUENT jako narzędzie CFD do symulacji przepływów turbulentnych na przykładzie opływu aerodynamiki modelu autobusu miejskiego oraz ogólne informacje dotyczące sposobów numerycznego rozwiązywania zagadnień brzegowych transportu.

WSTĘP

W technice przepływów płynów rzeczywistych – powietrza w otoczeniu poruszającego się pojazdu, rozważa się dwie formy przepływów: laminarne (uporządkowane) i turbulencje (burzliwe, chaotyczne). W analizach tych, nieodzownym kryterium stanowi liczba Reynoldsa, której wartość krytyczna pozwala określić stan krytyczny przepływu oddzielający obszar statecznego przepływu laminarnego od przepływu turbulentnego. Utrata stateczności przepływu laminarnego i przejścia w formę przepływu turbulentnego następuje w skutek nadmiernego wzrostu sił bezwładności nad siłami lepkości, działających na poruszające się elementy gazu [3]. W poruszającym się gazie pojawiają się przestrzenne wiry o różnej skali długości (wiry małe, średnie i wiry duże), co skutkuje powstaniem niestacjonarnych, małych odchyłek pól prędkości i ciśnień od wartości średnich i w konsekwencji przepływ staje się przestrzenny i chaotyczny. Dokładny opis zjawisk przepływu powietrza wokół struktury autobusu miejskiego należy do szczególnie trudnych. Składa się na to wiele czynników takich jak złożona geometria przestrzeni przepływowych, różnice w prędkościach przepływu w poszczególnych strefach nadwozia, występowanie ruchów wtórnych – trójwymiarowy charakter warstw przyściennych, anizotropia turbulencji. Sturbulizowaniu przepływu powietrza w trakcie opływu nadwozia pojazdu sprzyja niedoskonała geometria powierzchni (chropowatość, nierówności), istnienie struktur sztucznie wywołujących zawirowanie strumieni powietrza, a także różnica rozkładu ciśnień w poszczególnych strefach nadwozia. Niniejsza praca ma na celu przybliżenie sposoby opisu turbulencji stosowane w trakcie analiz numerycznych na przykładzie symulacji opływu aerodynamicznego struktury pojazdu.

1. METODY OPISU TURBULENCJI

Przedmiotem modelowania turbulencji jest nieskończona liczba powiązań pomiędzy poszczególnymi skalami zjawiska, których efektem są procesy turbulentnego transportu masy, pędu czy wielkości skalarnych (energii, ciepła). Interakcje te są zazwyczaj utożsamiane z wirową strukturą turbulencji, która przedstawiana jest jako nieskończona kaskada wirów realizujących procesy transportu w sposób charakterystyczny dla przepływu turbulentnego, co oznacza, że intensywność transportu masy, pędu i energii jest o kilka rzędów wielkości większa niż w przepływie laminarnym. Uwzględnienie w modelu złożonej struktury turbulencji przepływu jest zatem

konieczne ze względu na istotną intensyfikację wszystkich procesów transportu zachodzących w przepływach turbulentnych, co z kolei stanowi podstawę aplikacji technicznych zjawiska turbulencji [1]. W niniejszym rozdziale przedstawiono współczesne metody wykorzystywane do opisu turbulencji w obliczeniach numerycznych, w tym również do symulacji opływu aerodynamicznego struktury pojazdów.

1.1. Równania Reynoldsa dla przepływów turbulentnych

W literaturze anglosaskiej równania Reynoldsa jako zmodyfikowane równania Naviera – Stokesa, przystosowane do opisu przepływów burzliwych, nazywane są Reynolds Averaged Navier – Stokes Equations, w skrócie RANS. Klasyczne modelowanie turbulencji oparte jest na hipotezie Reynoldsa zgodnie z którą, chwilowe wartości wszystkich charakteryzujących przepływ wielkości fizycznych w danym punkcie obszaru przepływu są sumą wielkości uśrednionych w czasie i składowej fluktuacji (turbulencji), która jest losową funkcją czasu i przestrzeni. Zastosowanie tej koncepcji do równań Naviera – Stokesa przekształca je do postaci znanej jako równanie Reynoldsa, które dla płynu nieściśliwego może być zgodnie z [1] zapisane w postaci:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij}) + \bar{F}_i \quad (1)$$

gdzie: U_i ; p ; ρ oraz F oznaczają odpowiednio prędkość, ciśnienie, gęstość płynu i siłę masową, natomiast tensor naprężeń:

$$\sigma_{ij} = -\bar{p} \delta_{ij} + \nu \rho \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) + (\sigma_T)_{ij} \quad (2)$$

zawiera dodatkowy, niewystępujący w równaniu Naviera – Stokesa człon, nazywany tensorem naprężeń Reynoldsa:

$$(\sigma_T)_{ij} = -\rho \bar{u}_i u_j \quad (3)$$

Tensor naprężeń Reynoldsa jest tensorem symetrycznym, co w przypadku układu przestrzennego oznacza, że wartości sześciu z dziewięciu składowych są nieznane. Równanie ciągłości części średniej ma postać:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

Równania (1) i (4) uzupełnione o zależności oparte na modelowaniu, stanowią podstawę modeli turbulentnych RANS (Reynolds Averaged Navier – Stokes equations). Ponieważ równania Naviera – Stokesa są nieliniowe, każdy proces uśredniania generuje dodatkowe niewiadome, które wymagają powiązania z wielkościami średni-

mi. Ze względu na złożoną ilość niewiadomych występujących w powyższych równaniach, nie można ich rozwiązać nawet po uwzględnieniu warunków brzegowych (układ pozostaje niedomknięty). Do zamknięcia układu wymagane są dodatkowe związki funkcjonalne między naprężeniami Reynoldsa lub współczynnikami efektywnymi, a uśrednionymi parametrami polowymi, co określa się modelami turbulencji². Obecnie w celu "domknięcia" układu równań stosuje się powszechnie dwie metody:

1. Eddy Viscosity Models – modele lepkości polegające na wykorzystaniu hipotezy Boussinesqa, zgodnie z którą naprężenia turbulentne są proporcjonalne do prędkości deformacji i wyrażone są za pomocą dynamicznego współczynnika lepkości turbulencji μ_t .
2. Reynolds Stress Models – modele transportu naprężeń Reynoldsa polegające na bezpośrednim modelowaniu równań opisujących składowe tensora naprężeń. Modele powstałe bez wykorzystania koncepcji lepkości turbulentnej. Naprężenia Reynoldsa wyznaczone są bezpośrednio z własnych równań transportu, ujmujących procesy generacji, dyfuzji, konwekcji i dyssypacji.

Zarówno modele lepkościowe EVM jak i modele RSM, stanowią podstawę dla wszystkich pakietów numerycznych CFD, używanych obecnie do symulacji przepływów.

1.2. Metoda bezpośrednia symulacji obliczeniowej przepływów turbulentnych

Metoda bezpośrednia symulacji obliczeniowej przepływów turbulentnych nazywana w literaturze anglosaskiej DNS (Direct Numerical Simulation), polega na bezpośrednim rozwiązaniu równań Naviera – Stokesa bez jakichkolwiek uproszczeń, co oznacza uwzględnienie w obliczeniach wszystkich skal turbulencji (od skali najmniejszej do największej). Obliczenia prowadzone metodą DNS umożliwiają prawidłowe odtworzenie dynamiki wszystkich skal liniowych i czasowych turbulencji, które w odróżnieniu od metod RANS nie są modelowane, lecz są wynikiem numerycznego rozwiązania. Wiąże się to jednak z koniecznością zastosowania gęstych, wysoce dokładnych siatek, których elementy muszą być mniejsze niż najdrobniejsze skale turbulencji. Kolejnym problemem związanym ze stosowaniem metod bezpośrednich jest długość kroku czasowego, który musi być na tyle mały aby przemieszczenie molekuly płynu w tym czasie nie przekroczyło elementu siatki. W metodzie DNS, uśrednianie równań zastąpione jest przez uśrednianie rozwiązań, pozwalające uzyskać miary statystyczne charakteryzujące turbulencję przepływu. Szacunkowa liczba węzłów siatki obliczeniowej, niezbędna do uzyskania wiarygodnego rozwiązania DNS dla przepływu turbulentnego może być wyrażona zgodnie z [1,3] jako:

$$N_{DNS} > \left(\frac{l}{\eta}\right)^3 \approx Re_t^{9/4} \quad (5)$$

gdzie:

Re_t – turbulentna liczba Reynoldsa oparta na makroskali turbulencji,

l – rozmiar wirów o największej skali,

η – rozmiar najmniejszych zawirowań istotnych dla prawidłowego odtworzenia dynamiki turbulencji (skala długości Kolmogorowa):

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} \approx Re_t^{9/4} \quad (6)$$

gdzie:

ν – współczynnik lepkości kinematycznej analizowanego płynu,

ε – szybkości dyssypacji energii kinetycznej turbulencji.

Liczbę wymaganych kroków czasowych n uzyskuje się zgodnie z [3] z zależności:

$$n \approx \frac{l}{\eta} \approx Re_t^{3/4} \quad (7)$$

Natomiast czas obliczeń można oszacować z równania:

$$\tau = l / \sqrt{k} \quad (8)$$

gdzie k oznacza energię kinetyczną turbulencji.

Zasoby komputerowe, wymagane do przeprowadzenia symulacji złożonych przepływów metodą DNS, przekraczają możliwości obliczeniowe najpotężniejszych współczesnych komputerów. Największe obecnie wieloprocesorowe komputery umożliwiają symulację DNS dla przepływów charakteryzujących się liczbą Re_t rzędu $10^3 - 10^4$, podczas gdy przepływy w skali przemysłowej charakteryzują się liczbą Reynoldsa rzędu $Re_t \approx 10^5 - 10^6$, natomiast przepływy geofizyczne to $Re_t \approx 10^7 - 10^9$. Metoda DNS stosowana jest jedynie do badań prostych przepływów modelowych, co umożliwia pełną analizę zjawisk zachodzących w tych przepływach i umożliwia ich pełne zrozumienie. Badania te w dużej mierze koncentrują się na zagadnieniu stateczności przepływów. Metoda DNS uważana jest za rodzaj eksperymentu numerycznego umożliwiającego uzyskanie ścisłych danych, które następnie służą do tworzenia nowych i weryfikacji starych modeli metod uproszczonych, takich jak RANS i LES^{1,3}.

1.3. Metody symulacji dużych wirów turbulentnych

Metoda symulacji dużych wirów turbulentnych LES (Large Eddy Simulation) zgodnie z [13] jest metodą pośrednią między metodami RANS i DNS, stanowiącą kompromis między wymogami narzucanymi przez złożoną strukturę przepływu turbulentnego i dostępnymi obecnie możliwościami obliczeniowymi. Podstawowym założeniem metody LES jest separacja ciągłego widma energii turbulentnych fluktuacji na część rozwiązywaną (numerycznie) i modelowaną (analitycznie). Złożona dynamika pełnych równań opisujących ruch płynu zostaje uproszczona w procesie tzw. filtracji, a podział na ruch drobno i wielkoskalowy zależy od przyjętej szerokości filtra, na ogół równej szerokości elementu siatki. Wielkoskalowy ruch płynu, silnie zależny od warunków brzegowych, jest wyznaczany ze zmodyfikowanych równań Naviera – Stokesa, natomiast drobnoskalowe struktury (mniejsze od szerokości zastosowanego filtra), w których energia kinetyczna jest rozpraszana przez działanie sił lepkości, są modelowane. Im mniejsza szerokość filtra zostanie zastosowana, tym bardziej metoda będzie zbliżona do metody bezpośredniej (DNS). Metoda LES umożliwia dostosowanie precyzji obliczeń do badanego problemu. Procedura filtracji może być zapisana jako operacja splotu, która dla prostego przypadku 1D przybiera postać:

$$\bar{F}(\bar{x}) = G(\bar{x}) \cdot (\bar{x}) = \int_{\Omega} G(\bar{x} - \bar{\xi}) \bar{F}(\bar{\xi}) d\bar{\xi} \quad (9)$$

gdzie \bar{x} i $\bar{\xi}$ są wektorami w obszarze obliczeniowym, Ω , G – funkcja filtrująca związana z szerokością filtra $\bar{\Delta}$.

Zastosowanie powyższej procedury do równań Naviera – Stokesa przekształca je do postaci:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \tau_{ij}^{SGS} \right] \quad (10)$$

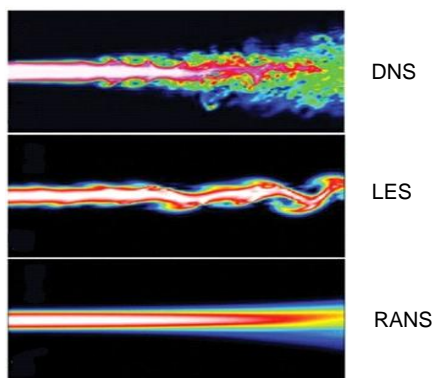
gdzie τ_{ij}^{SGS} oznacza tensor naprężeń podsiatkowych, dla którego należy stworzyć odpowiedni model:

$$\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (11)$$

Rola tego modelu (nazywanego modelem podsiatkowym) jest bardzo istotna, gdyż zgodnie z [4], w prawidłowo modelowanych naprężeniach podsiatkowych powinno być zawarte ok. 20 % energii turbulentnych fluktuacji. Modelowanie naprężeń podsiatkowych stanowi zasadniczą trudność w zastosowaniu metody LES. Obecnie

stosuje się wiele zmodyfikowanych modeli podsiatkowych, których przegląd przedstawiono między innymi w pracach [5,6]. Możliwość modelowania jedynie drobno składowych struktur izotropowych sprzyja wyższej uniwersalności metody LES, jednak jej stosowność wciąż ogranicza się do badania przepływów w stosunkowo prostych obszarach ze względu na dużą czasochłonność obliczeń. Redukcja nakładów obliczeniowych w stosunku do metody DNS, może być zgodnie z [7] oszacowana z zależności:

$$N_{LES} > \left(\frac{0.4}{Re_t^{1/4}} \right)^3 N_{DNS} \quad (12)$$

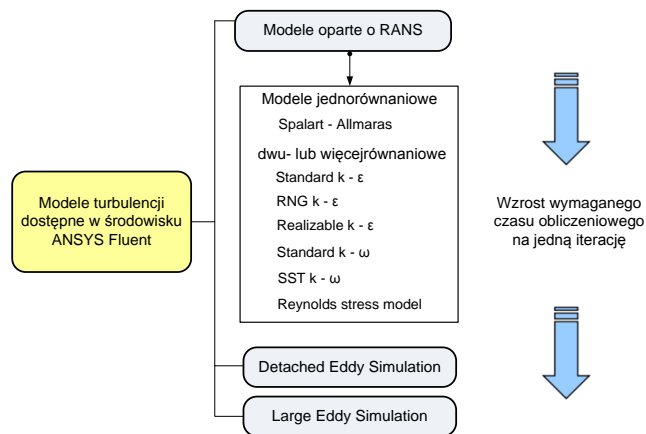


Rys. 1. Zestawienie wyników symulacji przy różnych metodach obliczeniowych: a) DNS, b) LES, c) RANS, [8]

W metodzie DES (Detached Eddy Simulation) zastosowano model hybrydowy, w którym duże wiry traktowane są tak jak w metodzie LES, a warstwy przyścienne i cienkie warstwy ścinające traktowane są tak jak w metodzie RANS. Charakterystycznym elementem metody DES jest procedura rozpoznawania obszarów modelowanych za pomocą metod LES i RANS. W metodzie DES dwie zasadnicze skale: pierwsza jest typowa dla metody RANS - l_{RANS} , a drugą skalą jest szerokość filtra metody LES - l_{LES} . Jeśli $l_{RANS} < l_{LES}$, to w tym obszarze przepływ jest modelowany, a nie rozwiązywany. Poszukiwanie modeli hybrydowych było związane z trudnościami w zastosowaniu metody LES w najbliższym sąsiedztwie opływanych powierzchni.

2. SPOSOBY OPISU ZJAWISK TURBULENCJI WE WSPÓŁCZESNYCH KOMPUTEROWYCH SYSTEMACH OBLICZENIOWYCH

Dynamiczny rozwój technologii i wzrost mocy obliczeniowej komputerów powoduje sukcesywne wypieranie klasycznych metod obliczeniowych na rzecz metod numerycznych. Współczesne symulacje przepływów przeważnie przeprowadza się z wykorzystaniem Komputerowej Mechaniki Płynów. Jednym ze środowisk opierających się o CFD jest pakiet ANSYS Fluent, który pozwala na modelowanie złożonych zjawisk związanych z przepływami (spalanie, turbulencja, przepływy wielofazowe, reakcje chemiczne, przewodzenie ciepła, radiacja itp.). Możliwość wykonania symulacji numerycznej na etapie projektowania konstrukcji pozwala na znaczne zmniejszenie kosztów i czasu analizy w porównaniu do konwencjonalnych metod oraz umożliwia prowadzenie szybkiej i wydajnej optymalizacji zagadnienia. CFD wykorzystuje główne metody modelowania przepływu tj. RANS, DNS i LES. Na rys. 2 przedstawiono schematycznie modele turbulencji dostępne w środowisku ANSYS Fluent.



Rys. 2. Modele turbulencji dostępne w pakiecie ANSYS Fluent

Model Spalart – Almaras jest jednorównaniowym modelem opierającym się na równaniu transportu. Ze względu na oszczędność obliczeniową, umożliwia stosowanie siatek o dużych elementach. Skuteczny jedynie w przypadku mało skomplikowanych modeli (quasi-2D). Zaprojektowany specjalnie do zastosowań lotniczych z uwzględnieniem przepływów w warstwie przyściennej (np. profile lotnicze, skrzydła i kadłuby samolotów, pociski, kadłuby statków). Mało skuteczny w przypadku przepływów 3D lub przepływów z oderwaniem warstwy przyściennej.

Model turbulencji Standard k – ε jest dwurównaniowym modelem odpowiedni jedynie do przepływów w pełni turbulentnych. Rozbudowany i dość dokładny pomimo wielu ograniczeń. Najpowszechniej stosowany model turbulencji dla zastosowań przemysłowych. Zawiera podmodele do uwzględniania ściśliwości, prężności, spalania itp. Równanie E zawiera moduł, który nie może być obliczony na warstwie przyściennej. Mało skuteczny w przypadku złożonych przepływów zawierających silne gradienty ciśnienia lub skomplikowaną ścieżkę przepływu. Termin "realizable" oznacza, że model spełnia, zgodnie z fizyką przepływów turbulentnych, pewne matematyczne założenia naprężeń Reynoldsa które ostatecznie zwiększają wydajność tego modelu. Model odpowiedni dla złożonych przepływów z udziałem szybkich zmian parametrów płynu, umiarkowanych turbulencji, lokalnych zaburzeń (np. oderwanie warstwy przyściennej, zawirowania za opływającymi ciałami, wentylacja pomieszczeń, rozprężanie w dyfuzorach). Zapewnia wysoką skuteczność zarówno w przypadku opływów jak i przepływów z uwzględnieniem warstwy przyściennej, rotacji, oderwania strugi i recyrkulacji.

Model turbulencji RNG k – ε oferuje w większości te same zalety i ma podobne zastosowania jak model „Realizable” jednak charakterystyka tego modelu jest trudniejsza do zbiegnięcia. Stałe w równaniach k – ε są uzyskiwane za pomocą teorii grup renormalizacji. Charakteryzuje się wyższą skutecznością niż model Standard k – ε w przypadku złożonych przepływów wymuszonych, przepływów z gęsto usytuowanymi liniami prądu, wirami i przypadków z oderwaniem strugi. Zawiera dodatkowe podmodele:

- zróżnicowany model lepkości w celu uwzględnienia jej przy niskiej wartości liczby Reynoldsa,
- wywodząca się analitycznie, algebraiczna formuła dla turbulencji Prandtla / liczby Schmidt’a,
- modyfikacji wirów.

Model turbulencji Standard k – ω charakteryzuje się wysoką, w porównaniu do modeli z grupy k-ε, skutecznością symulacji zjawisk zachodzących w warstwie przyściennej, zaburzeń przepływów i przepływów przy niskich wartościach liczby Reynoldsa. Zawiera podmodele uwzględniające ściśliwość płynów oraz stan przejściowy

pomiędzy przepływem laminarnym i turbulentnym, powszechnie stosowany w branży lotniczej i maszynach wirnikowych.

Model turbulencji SST $k - \omega$ jest dwurównaniowym modelem hybrydowym. Stanowi płynne przejście z modelu standard $k - \omega$, wykorzystywanego w warstwie przyściennej, do modelu $k - \epsilon$ w miarę oddalania się od powierzchni ograniczającej przepływ. Zawiera zmodyfikowane sformułowanie lepkości turbulentnej w celu uwzględnienia efektu transportu głównych naprężeń ścinających.

Model turbulencji RSM jest najbardziej znanym z grupy RANS. Unika zakładania izotropowych prędkości turbulencji. Wymaga wyższej mocy obliczeniowej. Trudniejszy do zbiegnięcia ze względu na ściśle sprzężenie równań. Odpowiedni do rozbudowanych przepływów 3D z silnymi zmianami kierunku przepływu, silnymi wirami/rotacją.

3. OGÓLNE WIADOMOŚCI DOTYCZĄCE SPOSOBÓW NUMERYCZNEGO ROZWIĄZYWANIA ZAGADNIENÍ BRZEGOWYCH TRANSPORTU

Obecnie w rozwiązywaniu zagadnień brzegowych (granicznych) dotyczących mechaniki płynów, a w tym gazów lepkich stosowane są trzy podstawowe metody, których wspólną cechą jest dyskretyzacja przy rozwiązywaniu postawionych zadań. Metody te są następujące:

- metoda kroków skończonych (MRS) – polega na dyskretyzacji równań różniczkowych opisujących przepływ i warunków brzegowych lub granicznych, a w konsekwencji sformułowaniu równań algebraicznych. Rozwiązanie układu tych równań przeprowadza się metodami algebry macierzowej,
- metoda elementów skończonych (MES) – polega na dyskretyzacji obszaru całkowania równań poprzez podział obszaru na odpowiednią ilość elementów skończonych. W wybranych punktach elementów lokalizuje się węzły, a następnie postuluje zmiany funkcji rozwiązujących układ równań transportu w obrębie elementu, wykorzystując aproksymacje tych funkcji funkcjami bazy. Parametry funkcji aproksymujących określane są metodami wariacyjnymi np. metodą Galerkiną. Tak więc metoda MES jest skojarzoną metodą różnicową z odpowiednio dobraną metodą wariacyjną. Należy zaznaczyć, że posługując się elementami typowych kształtów, można w niezbyt skomplikowany sposób dobrać funkcję bazy i w "rutynowy" sposób wyznaczyć dyskretne wartości poszukiwanej funkcji. A zatem metoda MES prowadzi do sformułowania układu równań algebraicznych, które łatwo jest "zalgorytmizować" i dostosować do obliczeń komputerowych. Metoda ta idealnie nadaje się do rozwiązywania zagadnień płaskich,
- metoda objętości skończonych (MOS) – polega na dyskretyzacji obszaru całkowania odpowiednią ilością elementów przestrzennych, o kształtach dostosowanych do geometrii obszaru całkowania i rozwiązywanego zagadnienia brzegowego. Pozwala to bezpośrednio dyskretyzować układ równań transportu np. opisujących przepływ gazów lepkich z wymianą ciepła w formie całkowitej w każdym kolejnym elemencie. Zaletą tej metody jest prosty, naturalny sposób formułowania warunków brzegowych. Zastosowanie metody MOS prowadzi do sformułowania układu równań algebraicznych rozwiązywanym metodami algebry macierzowej. Rozwiązywanie takiego układu jest więc łatwo dostosować do obliczeń 2n komputerowych. Metoda ta idealnie nadaje się do rozwiązywania zagadnień przestrzennych.

PODSUMOWANIE

Pomimo półtora wieku prowadzonych badań przeprowadzanych w dziedzinie przepływów turbulentnych, zagadnienie to stanowi wciąż aktualny i daleki do rozwiązania problem badawczy, czego powodem jest przede wszystkim wielkoskalowy charakter zjawiska. Wykorzystywane obecnie metody opisu turbulencji z grupy RANS wiążą się z wieloma ograniczeniami bowiem opierają się o przybliżenia generujące błędy. Sama symulacja numeryczna jest więc ciągłym zbliżaniem się do rozwiązania, a jej wynik wymaga weryfikacji w warunkach rzeczywistych lub jak w przypadku badania aerodynamiki pojazdów – weryfikacji w tunelu aerodynamicznym. Najbardziej dokładną i przyszłościową metodę opisu turbulencji stanowi obecnie metoda DES. Ze względu jednak na wymaganą moc obliczeniową, która przekracza możliwości współczesnych komputerów, perspektywa zastosowania tej metody do analizy przepływów w skali technicznej jest bardzo odległa.

BIBLIOGRAFIA

1. Bogusławski A., Drobnik S., Tyliczszak A., Turbulencja – od losowości do determinizmu. Instytut Maszyn Ciepłych, Politechnika Częstochowska, 2008
2. Elsner W. J., Turbulencja przepływów. PWN, Warszawa, 1987
3. Tuliszka-Sznitko E., Wybrane zagadnienia z mechaniki płynów wirujących. WPP, Poznań, 2011
4. Vreman B., Geurts B., Kuerten H., „Large eddy simulation of turbulent mixing layer”, Journal of Fluid Mechanics 339, 357-390
5. Geurts B.J., Elements of direct and large – eddy simulation. Edwards, Philadelphia, 2004
6. Lesieur M. Turbulence in Fluids, 4th ed., Springer Verlag. The Netherlands, 2008
7. Ansys. Modeling Turbulent Flows. Introductory FLUENT Training, 2006
8. Maries A., Haque M. A., Yilmaz S. L., Nik M. B., Marai G. E., New Developments in the Visualization and Processing of Tensor Fields, Springer, pp. 137-156

Actual methods of turbent flow modeling in surrounding of a moving city bus

This paper presents the current trends in the numerical modeling of turbulent flows and the limitations of the conventional turbulence models like RANS, DNS and LES. It also presents the general usability of the Computational Fluid Dynamics (CFD) in process of studying aerodynamics of the city busses.

Autorzy:

mgr inż. **Mateusz Paszko** – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych, m.paszko@pollub.pl

mgr inż. **Krzysztof Łygas** – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatykacji, k.lygas@pollub.pl