

ANALIZA MODELI TURBULENCJI

na przykładzie benchmarku komory testowej Annex 20

Piotr Kamil Korman • Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny, Zakład Inżynierii Chemicznej

Sławomir Pietrowicz • Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,

Katedra Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych

Wykonano symulacje przepływu powietrza przez komorę, aby zbadać wpływ modelu turbulencji na wyniki obliczeń numerycznych. Analizowano zwłaszcza rozkład linii prądu w komorze i profile składowej poziomej wektorów prędkości wzdłuż wybranych prostych przechodzących przez komorę. Wyniki numeryczne poddano walidacji z danymi pomiarowymi.

► Geometria układu

Dwuwymiarową geometrię analizowanego układu, zaproponowaną przez Nielsena [4, 5], obecnie wykorzystuje się do testowania modeli/procedur numerycznych, m.in. modeli turbulencji zaimplementowanych w programach CFD. Geometrię stanowi przekrój przez pomieszczenie (zwane dalej komorą), z wlotem powietrza w lewym górnym rogu i wylotem w prawym dolnym rogu. Model geometryczny, dla którego wygenerowano siatkę i przeprowadzono symulacje, zawierał dodatkowo kanał wlotowy o długości 1 m i kanał wylotowy o długości 3 m. Schemat geometrii pokazano na rys. 1. Linia przerywaną zaznaczono odcinki, dla których zostały wykreślone profile składowej poziomej i składowej pionowej prędkości. Komora symulacyjna ma proporcje geometryczne opisane w raporcie [4]: $L/H = 3,0$; $h/H = 0,056$; $t/H = 0,16$. Analizy numeryczne wykonano dla komory o długości $L = 9$ m, dlatego pozostałe wymiary były następujące: $H = 3$ m, $h = 0,168$ m, $t = 0,48$ m. Grubość przestrzeni symulacyjnej (różnica współrzędnych z obu ścian o warunku brzegowym typu symetria) była równa 0,1 m.

► Siatka numeryczna

Zastosowano siatkę strukturalną. Długość i/lub wysokość komórki ma rozkład sinusoidalny. Przy ścianach komory oraz w obszarze wlotu i wylotu komórki mają najmniejsze rozmiary, a wraz ze wzrostem odległości od ścian przestrzeni symulacyjnej ich długość (obszar głównej komory) oraz wysokość (obszar głównej komory, wlotu i wylotu) rosną sinusoidalnie. Taki rozkład wielkości komórek wynika ze spodziewanych dużych gradientów analizowanych wielkości. W takich obszarach wymagana jest szczególnie duża dokładność obliczeń. Widok siatki w kierunku osi z przedstawiono na rys. 2.

W programie ANSYS ICEM zdefiniowano nazwy powierzchni ograniczających rozpatrywany obszar. Te nazwy zastosowano także w programie ANSYS CFX. Ogólna liczba węzłów numerycznych wynosiła 22 190, a liczba komórek – 10 820.

► Obliczenia numeryczne

Obliczenia numeryczne dotyczyły izotermicznego przepływu ustalonego powietrza o temperaturze 25°C, traktowanego jako gaz doskonały, o współczynniku lepkości dynamicznej $1,831 \cdot 10^{-5}$ Pa·s. Działanie siły grawitacji pominięto (moduł wyporności był wyłączony). Ciśnienie referencyjne w komorze wynosiło 1 atm. Warunki brzegowe na poszczególnych powierzchniach symulowanej domeny zestawiono w tabeli.

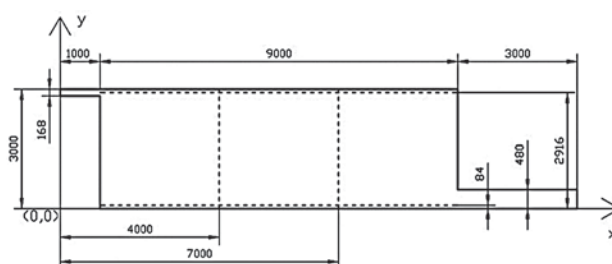
Jako kryterium zakończenia obliczeń iteracyjnych przyjęto średniokwadratową wartość znormalizowanych residuów równań bilansu masy i pędu na poziomie $1 \cdot 10^{-6}$. Warunek ten został spełniony przy najmniejszej liczbie iteracji (600) w symulacji z użyciem modelu turbulencji $k-\epsilon$. W przypadku pozostałych modeli wymagana była większa liczba iteracji: dla modelu SST – 1112, dla modelu $k-\omega$ – 1661, a dla modelu SSG Reynolds Stress – 1909.

► Wyniki obliczeń

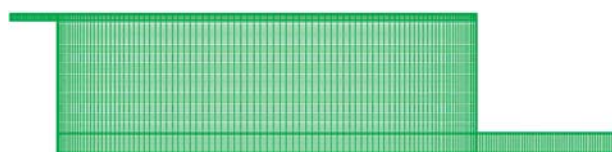
Na rys. 3–6 pokazano linie prądu, a na rys. 7–10 – pola modułu prędkości dla czterech badanych modeli turbulencji.

► Charakterystyka wirów

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że wybór modelu turbulencji ma istotny wpływ na przewidywanie zjawisk zachodzących podczas przepływu gazu przez komorę testową. Dowiedzono [5, 6], że w komorze wytworzą się trzy wiry: jeden duży o zwrocie wektorów prędkości zgodnym z ruchem wskazówek zegara (dalej okreśłany mianem prawoskrętnego) oraz dwa znacznie mniejsze, mające zwrot wektorów prędkości



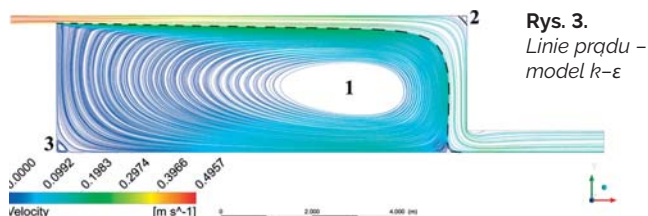
Rys. 1. Widok geometrii (z uwzględnieniem kanału wlotowego i wylotowego) wykorzystanej w symulacjach



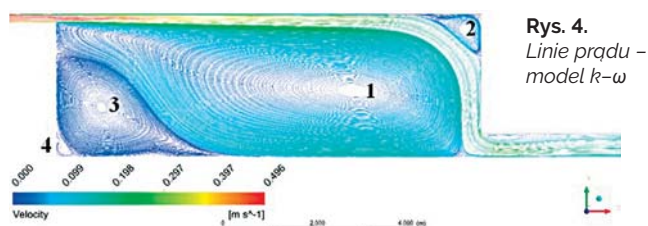
Rys. 2. Widok geometrii (z boku) z zaznaczonymi liniami siatki numerycznej

Tabela. Warunki brzegowe

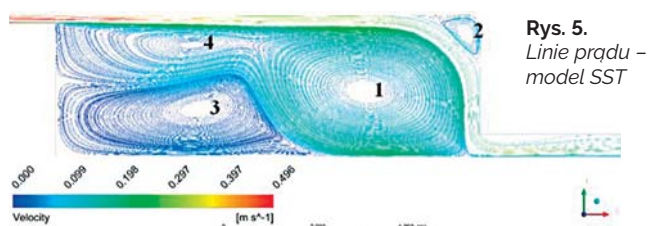
Nazwa powierzchni w CFX	Typ warunku brzegowego	Wartość	Jednostka
Inlet	Inlet, Normal Speed (u)	0,455	m/s
	Inlet, Turbulence intensity	5	%
Outlet	Outlet, Average Static Pressure	0	Pa
Wall_up	Wall, No Slip Wall, Smooth Wall	–	–
Wall_down	Wall, No Slip Wall, Smooth Wall	–	–
Symmetry_1	Symmetry	–	–
Symmetry_2	Symmetry	–	–



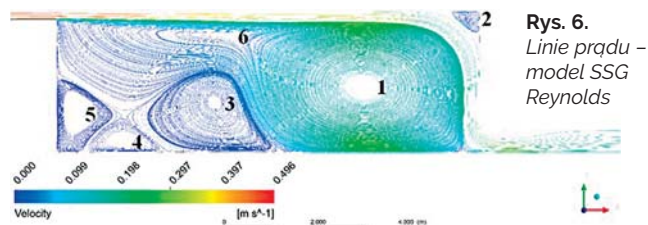
Rys. 3.
Linie prądu –
model k-ε



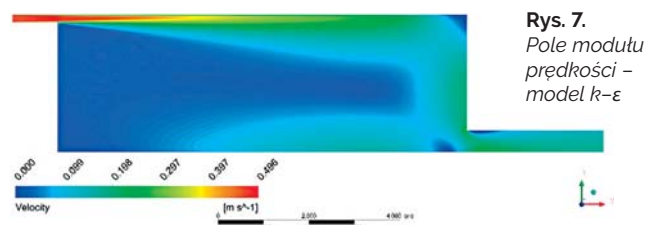
Rys. 4.
Linie prądu –
model k-ω



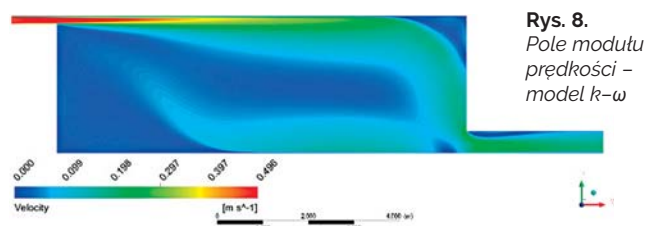
Rys. 5.
Linie prądu –
model SST



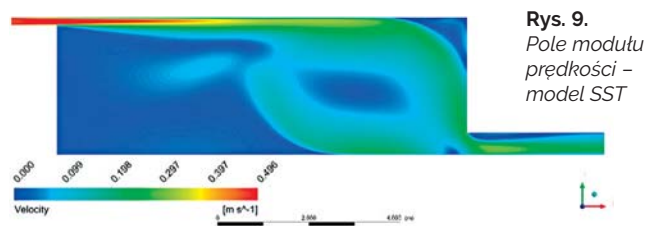
Rys. 6.
Linie prądu –
model SSG
Reynolds



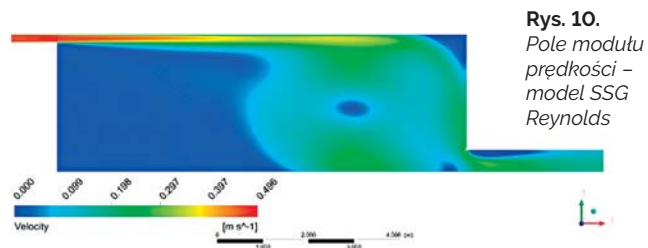
Rys. 7.
Pole modułu
prędkości –
model k-ε



Rys. 8.
Pole modułu
prędkości –
model k-ω



Rys. 9.
Pole modułu
prędkości –
model SST



Rys. 10.
Pole modułu
prędkości –
model SSG
Reynolds

przeciwny do ruchu wskazówek zegara (dalej nazywane lewoskrętnymi). Dwa mniejsze wiry to tzw. strefy recyrkulacji, zlokalizowane w lewym dolnym i w prawym górnym rogu komory. Wyniki dla standardowego modelu k-ε (rys. 3) odzwierciedlają istnienie wszystkich wirów stwierdzonych empirycznie (nr 1, 2 i 3, rys. 3), w tym wiru głównego z centrum o przybliżonych współrzędnych $(x, y) \approx (2/3L + 1, 1/2H)$ [m]. Obliczenia z wykorzystaniem pozostałych modeli turbulencji sugerują, że w komorze powstają dodatkowe wiry.

Wszystkie zastosowane modele wykazują zgodność co do położenia centrum największego wiru – w przybliżeniu na wysokości 1,5 m i w odległości ok. 6,5 m od lewej ściany głównej komory. W przypadku modelu k-ε linie prądu głównego wiru (nr 1, rys. 3) wypełniają prawie całą komorę główną, z wyjątkiem obszaru o wysokości w zakresie $h \div 3h$ przy górnej ścianie, obszaru o szerokości równej ok. t przy prawej ścianie komory oraz trójkątnego obszaru w lewej dolnej części komory (wir nr 3, rys. 3). Na rys. 3 obszar bezwiryowy oddzielono od obszarów wirowych za pomocą czarnych kreskowanych krzywych. Defektem modelu k-ε jest niedoszacowanie wielkości wirów nr 2 i 3.

W przypadku modelu k-ω (rys. 4) wyniki symulacji sugerują występowanie dodatkowego prawoskrętnego wiru (nr 4, rys. 4) w lewym dolnym rogu komory. Zajmuje on obszar o szerokości ok. 40 cm. Rozmiar wiru lewoskrętnego (nr 3, rys. 4), będącego odpowiednikiem strefy recyrkulacji nr 3 przewidzianej przez model k-ε, jest przeszacowany, ponieważ na linii $y = 0,084$ m rozciąga się on na przedział $0,4 \div 4,2$ m. Podobnie przeszacowany jest rozmiar wiru nr 2. Można stwierdzić, że model k-ω źle oddaje charakter przepływu powietrza przez lewą dolną część komory testowej.

Model SST (rys. 5) daje w wyniku cztery wiry; lewoskrętna strefa recyrkulacji nr 3 zajmuje całą lewą dolną część komory, a jej rozmiar jest przeszacowany – podobnie jak w przypadku użycia modelu k-ω. Wir nr 4 jest zlokalizowany nad wir nr 3, a jego orientacja jest taka jak wiru głównego nr 1. Wielkość i kształt obszaru zajmowanego przez wir nr 2 są zbliżone do parametrów odpowiadającego mu wiru przewidzianego przez model k-ω.

Model SSG Reynolds daje wyniki sugerujące występowanie największej liczby wirów. Na rys. 6 widać ich pięć lub sześć. Linie prądu wiru nr 1 z dala od centrum nie mają kształtu elipsoidalnego, ponieważ opływają obszar zajęty przez wiry 3, 4 i 5. Wielkość obszaru zajmowanego przez wir nr 2 w prawym górnym rogu komory jest nieco mniejsza niż w przypadku modeli SST i k-ω, ale większa niż wynikająca z modelu k-ε.

Na rys. 10 widać, że obszar występowania dość szybkiego przepływu (wartość prędkości powyżej 0,1 m/s) jest ograniczony do prawej połowy komory, a prędkość w obszarze wirów 3, 4 i 5 jest bardzo mała. Ponadto można stwierdzić, że model SSG Reynolds przewiduje szybszy ruch wirowy cieczy wokół głównego wiru (nr 1) niż pozostałe modele turbulencji (rys. 7–9).

► Składowe wektora prędkości

Uzyskane profile składowej poziomej u prędkości płynu podzielonej przez wartość prędkości wlotowej u_0 , pochodzące z symulacji wykorzystujących różne modele turbulencji, porównano z danymi eksperymentalnymi. Okazało się, że standardowy model turbulencji k-ε najlepiej opisuje przepływ gazu przez analizowaną komorę – profile prędkości wzdłuż wybranych linii są najbardziej zbliżone do punktów eksperymentalnych. Wyjątkami są tu dwie strefy: w prawym górnym (x od 9,4 do 10,0 m) oraz w lewym dolnym rogu komory (x od 1,15 do 2,1 m). W pierwszej z nich wraz ze wzrostem współrzędnej x składowa pozioma prędkości u maleje po wartościach dodatnich aż do zera, co jest niezgodne z danymi doświadczalnymi, które wskazują na ujemną wartość składowej u w przedziale $9,4 \div 10,0$ m. W drugiej ze stref model k-ε sugeruje, że składowa u jest ujemna, czyli że jest to obszar głównego prawoskrętnego wiru, z doświadczenia wynika zaś, że występuje tam strefa lewoskrętna

recyrkulacji. Przyczyną tych niezgodności jest błąd modelu k- ϵ , polegający na niedoszacowaniu wielkości wirów nr 2 i 3. W prawym górnym rogu komory testowej najlepsze wyniki daje model SSG Reynolds, gdyż szerokość wiru Δx jest bardzo bliska wartości eksperymentalnej. Wadą rozwiązania numerycznego jest niedoszacowanie wartości prędkości w obszarze małego wiru. Stosunek u/u_0 nie spada tam poniżej $-0,04$, natomiast z eksperymentu wynika, że minimum wynosi $-0,20$ dla $x = 9,59$ m.

Centrum głównego prawoskrętnego wiru jest zlokalizowane na prawo od linii wyznaczającej $2/3$ długości komory. Wynika to z tego, że dla $x = 7$ m składowa v jest dodatnia dla $y = 1,5$ m, czyli płyn przemieszcza się w górę komory, opływając od lewej strony centrum wiru. Wartość bezwzględna składowej pionowej prędkości nie przekracza ok. $0,093$ m/s (model SSG Reynolds, linia $x = 7$ m, $y = 1,3$ m), podczas gdy wartości bezwzględne składowej poziomej osiągnęły ok. $0,50$ m/s (modele SST i k- ω , linia $y = 2,916$ m, $x = 1,0$ m). Wynika to z połączenia dwóch faktów: z prawa zachowania masy oraz z tego, że pole przekroju komory w płaszczyźnie poziomej jest trzykrotnie większe od pola przekroju w płaszczyźnie pionowej.

Wnioski

Wybór modelu turbulencji stosowanego przez solver w programach CFD ma wpływ na wyniki symulacji. Nieodpowiedni dobór tego modelu może prowadzić do błędnych wyników, wyraźnie odbiegających od rzeczywistego charakteru przepływu, który można poznać tylko na drodze eksperymentu. Prawdopodobną przyczyną występowania największej liczby wirów w symulacji z użyciem modelu SSG Reynolds jest to, że korzysta ona

bezpośrednio z tensora naprężeń Reynoldsa bez uproszczeń. Umożliwia on opis wirów o małej intensywności, np. zanikających, a jednocześnie jest podatny na lokalne, chwilowe zmiany wartości jego składowych. To może prowadzić do obliczenia cyrkulujących pól prędkości tam, gdzie w rzeczywistości one nie występują. W przypadku symulowanej geometrii (prostokątnej komory) zastosowanie modelu SSG Reynolds powoduje nadprodukcję wirowości.

Najlepszą zgodność wyników symulacji z danymi eksperymentalnymi daje standardowy model k- ϵ .

Pełna wersja artykułu jest dostępna na blogu MESco.

LITERATURA

1. www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_modeling (dostęp: 07.01.2019 r.).
2. Jaworski Z. „Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej”. Warszawa: AOW EXIT, 2005.
3. Wilcox D.C. “Turbulence modeling for CFD”. Wyd. 2. Anaheim, Kalifornia: DCW Industries, Inc., 1998.
4. Lemaire A.D. (red.). “Room Air and Contaminant Flow, Evaluation of Computational Methods. Subtask-1 Summary Report”. Wyd. 2. Delft (Holandia), grudzień 1993.
5. Nielsen P.V. “Specification of a two-dimensional test case”. Listopad 1990, ISSN 0902-7513 R9040.
6. http://homes.civil.aau.dk/pvn/cfd-benchmarks/two_d_benchmark_test (dostęp: 07.02.2019 r.).

Projekt pakietu aerodynamicznego bolidu Formuły Student

Marcin Kołodziejczak • PUT Motorsport • marcin.j.kolodziejczak@student.put.poznan.pl

Na początku warto sobie zadać pytanie, w jakim celu stosować pakiet aerodynamiczny w samochodzie Formuły Student? Te bolidy poruszają się z relatywnie niskimi prędkościami, przez co siły aerodynamiczne generowane przez skrzydła są nieporównywalne z tymi występującymi w bolidach F1 – tu siła docisku generowana przez pakiet wyraża się w tonach. Docisk to jednak nie wszystko. Pakiet musi wspomóc dynamikę samochodu podczas wszelkich manewrów na torze, takich jak hamowanie czy szybka zmiana kierunku jazdy. Odpowiednia aerodynamika bolidu Formuły Student pomaga również w chłodzeniu jednostki napędowej – tu możemy mówić o aucie zarówno z napędem spalinowym, jak i elektrycznym. W tym drugim przypadku takie elementy, jak silnik elektryczny, są chłodzone cieczą, której temperatura musi zostać zredukowana w toku przepływu przez chłodnicę.

Podczas projektowania pakietu aerodynamicznego należy wziąć pod uwagę balans aerodynamiczny samochodu. Jak wiadomo, siły wytworzone przez skrzydła są przenoszone na opony, czyli układ zawieszenia samochodu. Zbyt duży procentowy udział nacisku np. na tylne opony spowoduje, że kierowca podczas jazdy będzie się zmagał z podsterownym zachowaniem samochodu. Proces projektowania pakietu to również praca z kierowcą bolidu, gdyż – wbrew logice – auto wyposażone w skrzydła będzie w stanie pokonać zakręty według pożądanej linii przejazdu tylko z prędkością wyższą w porównaniu z prędkością auta bez pakietu.

Proces projektowania pakietu

Proces projektowania ma swój początek w wyborze oprogramowania do symulacji CFD. Dzięki wsparciu firmy MESco zespół wyścigowy Politechniki Poznańskiej – PUT Motorsport – otrzymał dostęp do wiodącego na rynku oprogramowania komercyjnego, jakim jest ANSYS z dodatkiem Fluent.

Kolejnym krokiem jest przyjęcie założeń dotyczących pakietu aerodynamicznego, które należy spełnić w toku projektowym. Dla najnowszego bolidu były one następujące:

- osiągnięcie docisku rzędu 550 N przy 15 m/s,

- możliwie niski opór powietrza, nie wyższy niż 250 N przy 15 m/s,
- odseparowanie turbulencji, zwłaszcza z kół przednich,
- odpowiedni przepływ na chłodnicę,
- balans aerodynamiczny $45:55$ (F:R).

Najpierw należało dobrać profile lotnicze, które zostaną użyte w skrzydłach. Podobnie jak w poprzednich latach na tylne skrzydło wybrano profil Seilig S1223, który charakteryzuje się stosunkowo dobrymi współczynnikami C_L dla niewielkich kątów natarcia skrzydła. Na przednie skrzydło zastosowano profil MH 115, który jednak zmodyfikowano w celu uzyskania wymaganych sił oraz