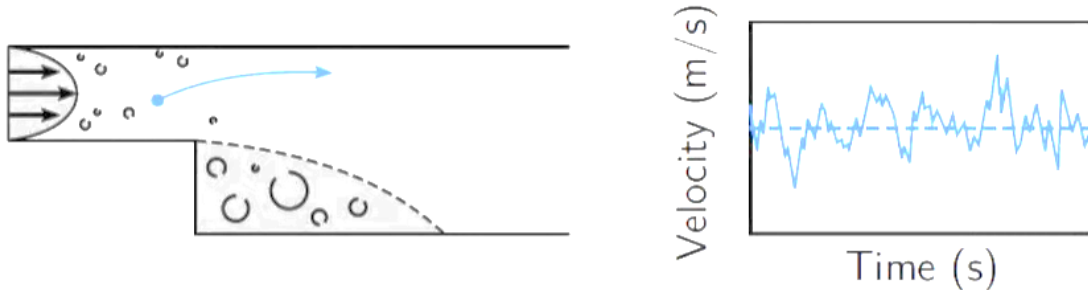


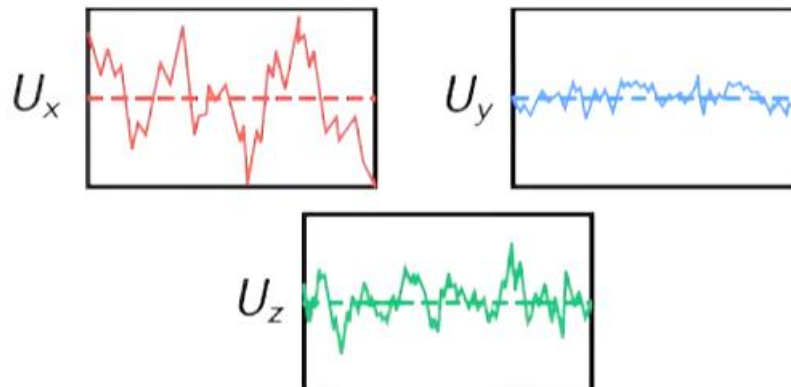
Wszystko co musisz wiedzieć o intensywności turbulencji!

Zacznijmy artykuł od fizycznego zrozumienia czym jest intensywność turbulencji.



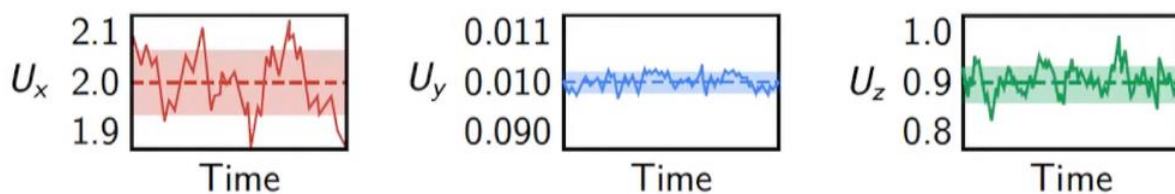
Rysunek 1 Wartość prędkości w funkcji czasu w jednym punkcie w przepływie turbulentnym

Wyobraźmy sobie dowolny turbulentny przepływ i zmierzmy prędkość w funkcji czasu w wybranym punkcie tego przepływu (Patrz Rysunek 1). Zaobserwujemy, że prędkość będzie zmieniać się w czasie, wykazując fluktuacje. Te fluktuacje będą różne dla każdej z trzech składowych prędkości w osiach x, y i z (Patrz Rysunek 2).



Rysunek 2 Składowe wartości prędkości w funkcji czasu

Aby określić wartość tych fluktuacji, należy użyć narzędzi statystycznych. Możemy obliczyć średnią wartość w czasie, skorzystać z odchylenia standardowego oraz wielu innych technik analizy statystycznej (Patrz Rysunek 3).



Rysunek 3 Fluktuacje składowych prędkości w funkcji czasu

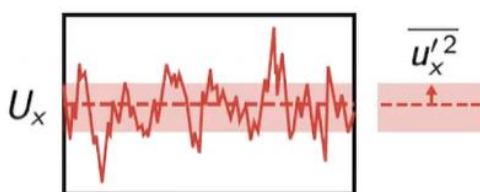
Oczywiście takie wartości statystyczne dostarczają informacji o fluktuacjach w przepływie turbulentnym, jednak pożądane jest posiadanie prostego kryterium, które upraszczałoby wszystkie statystyki. Chodzi o pojedynczą metrykę, która umożliwiłaby ocenę, czy przepływ jest silnie, średnio, czy słabo turbulentny za pomocą jednej liczby. Tym kryterium jest intensywność turbulencji. Jest ona bardzo użyteczna, ponieważ typowe wartości intensywności turbulencji są dobrze znane dla wielu popularnych zastosowań, co ułatwia ich oszacowanie w symulacjach. Klasyfikacja przepływów turbulentnych, wraz z typowymi wartościami i przykładami miejsc, gdzie zazwyczaj występują, znajduje się w poniższej tabeli.

Tabela 1 Podział przepływów turbulentnych

Kategoria	Typowy zakres wartości intensywności turbulencji	Występowanie
Słabo turbulentny	0%-1%	basen holowniczy (modelowy), tunel aerodynamiczny
Średnio turbulentny	1%-5%	Rury, kanały, samochody, samoloty
Wysoko turbulentny	>5%	Maszyny wirnikowe, przepływy przybrzeżne

Teraz, po przeanalizowaniu powyższej tabeli, warto zadać sobie pytanie: w jaki sposób wyznacza się intensywność turbulencji? Aby obliczyć intensywność turbulencji, konieczne jest wyznaczenie średniej kwadratowej fluktuacji prędkości (u_{rms}). Aby to zrobić, należy podjąć następujące kroki:

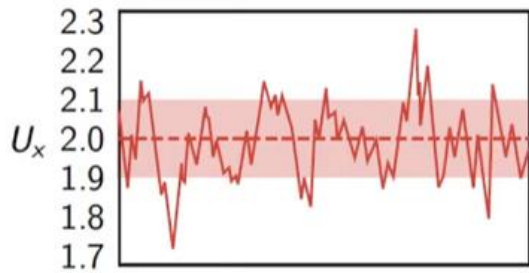
1. Wyliczyć wartość średnią prędkości w czasie
2. Odjąć średnią prędkość w czasie od prędkości chwilowej, aby obliczyć prędkość zmienną (u'_x)
3. Podnieść do kwadratu prędkość zmienną ($u_x'^2$)
4. Obliczyć średnią kwadratową prędkości wahań w czasie ($\overline{u_x'^2}$)
5. Obliczyć średnią składowych x, y i z ($\overline{u_x'^2}, \overline{u_y'^2}, \overline{u_z'^2}$)
6. Zsumować i wyciągnąć pierwiastek kwadratowy (Patrz Rysunek 4)

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{3} (\overline{u_x'^2} + \overline{u_y'^2} + \overline{u_z'^2})}$$


Rysunek 4 Wyliczenie średniej kwadratowej fluktuacji

7. Podzielić średnią kwadratową przez średnią prędkość w czasie, aby wyrazić fluktuacje jako ułamek (Patrz Rysunek 5).

Otrzymany wynik jest intensywnością turbulencji. To na co warto zwrócić uwagę to fakt, że do wyliczenia tego parametru nie stosuje się skali turbulencji czy też struktury turbulencji.

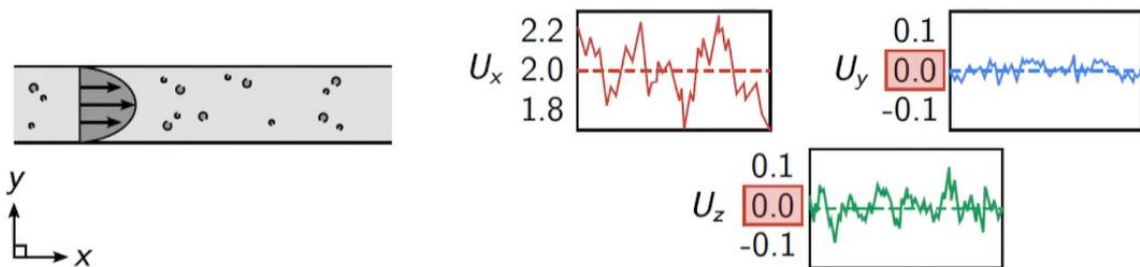


$$\frac{\text{Średnia kwadratowa}}{\text{Średnia wartość w czasie}} = \frac{0.1}{2.0} = 0.05 = 5\%$$

Rysunek 5 Wyliczenie intensywności turbulencji w kierunku X

Dodatkowo warto zaznaczyć, że wartości prędkości w każdym z trzech komponentów U_x , U_y , i U_z mają różne wartości średnie. Czasami bywa tak, że ta średnia jest równa zero. W związku z tym, definicja intensywności turbulencji wykorzystuje wielkość prędkości $|U|$ niż średnią z poszczególnych składowych prędkości (Patrz Rysunek 6).

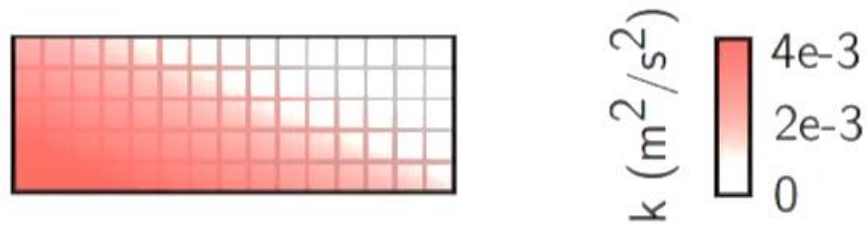
$$I = \frac{u_{rms}}{|U|}$$



Rysunek 6 Wyliczenie intensywności turbulencji wynikowej

Intensywność turbulencji w solverach RANS

Solvery korzystające z uśrednionych równań Naviera-Stokesa nie posiadają możliwości wyliczenia fluktuacji składowych prędkości u'_x, u'_y, u'_z . Jednakże większość modeli turbulencji, tj. $k-\varepsilon$ (który jest wykorzystywany w SOLIDWORKS FLOW Simulation), czy też $k-\omega$ posiadają parametr k , który definiuje turbulentną energię kinetyczną. Wizualizacja tego parametru pozwala zobrazować, jak wyglądałaby fluktuacja prędkości (Patrz Rysunek 7). Istnieją jednak pewne wyzwania związane z interpretacją turbulentnej energii kinetycznej.

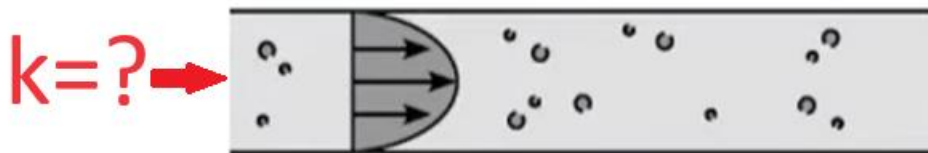


Rysunek 7 Wykres turbulentnej energii kinetycznej

Pierwszym problemem jest trudność w ocenie, czy dana wartość k (np. $k=4e-3 \text{ m}^2/\text{s}^2$) jest duża czy mała. Brak jednoznacznego punktu odniesienia sprawia, że porównanie wartości k między różnymi przypadkami jest nietrywialne.

Kolejną trudnością jest wybór odpowiedniej wartości k na wlocie do symulacji. Czy wartość $k=4e-3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ jest właściwa, czy może lepiej byłoby przyjąć $k=2e-3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ lub $k=1e-3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (Patrz Rysunek 8)? Brak jasnych wytycznych co do wyboru tej wartości może prowadzić do niepewności w interpretacji wyników symulacji.

Dodatkowym wyzwaniem jest określenie, w jaki sposób wartość k zmienia się w zależności od innych parametrów. Na przykład, jeśli prędkość na wlocie zwiększy się dwukrotnie, jak powinna zmienić się wartość k ? Ponadto, zmiana geometrii przepływu może znacząco wpłynąć na rozkład turbulentnej energii kinetycznej, co utrudnia precyzyjne przewidywanie zmian w tym parametrze w różnych obszarach przepływu.



Rysunek 8 Określenie wartości turbulentnej energii kinetycznej

Wnioskiem z powyższych trudności jest konieczność ostrożnego podejścia do interpretacji i ustawień parametrów dotyczących turbulentnej energii kinetycznej w analizach CFD. Stąd też pojawia się pytanie, czy możliwe byłoby wykorzystanie intensywności turbulencji zamiast turbulentnej energii kinetycznej?

Oczywiście jest taka możliwość. W celu przekonwertowania jednego parametru na drugi, należy przypomnieć definicję turbulentnej energii kinetycznej, która jest opisana poniższym równaniem:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u_x'^2} + \overline{u_y'^2} + \overline{u_z'^2})$$

W tym miejscu warto przypomnieć sobie równanie opisujące fluktuacje prędkości u_{rms}

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{3} (\overline{u_x'^2} + \overline{u_y'^2} + \overline{u_z'^2})}$$

Po przekształceniu uzyskuje się:

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{2}{3}k}$$

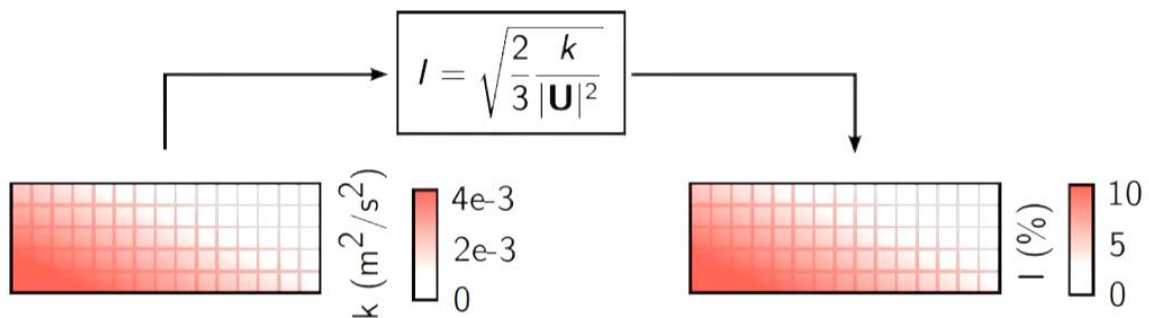
Stąd też wzór na intensywność turbulencji wygląda następująco:

$$I = \frac{u_{rms}}{|U|} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{|U|} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{k}{|U|^2}}$$

Dzięki temu równaniu możliwe jest wyświetlanie intensywności turbulencji zamiast turbulentnej energii kinetycznej (Patrz Rysunek 9).

Dodatkowo możliwe jest użycie intensywności turbulencji w celu zdefiniowania turbulentnej energii kinetycznej jako jeden z parametrów wejściowych warunku brzegowego na wlocie:

$$k = \frac{3}{2} I^2 |U|^2$$



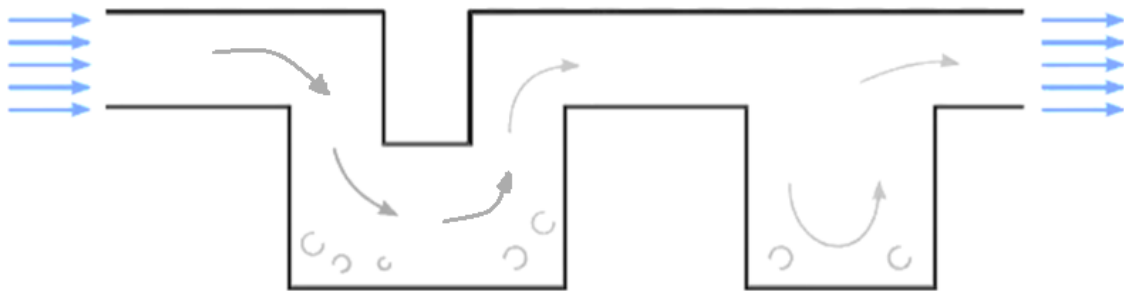
Rysunek 9 Przekonwertowanie wykresu turbulentnej energii kinetycznej na intensywność turbulencji

Prędkość referencyjna

Prędkość w definicji intensywności turbulencji jest często określana jako prędkość referencyjna. Bywa tak, że czasami bardziej przydatne jest użycie stałej prędkości referencyjnej, która nie zmienia się w domenie, a czasami użycie zmiennej prędkości referencyjnej.

$$I = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{k}{|U|^2}} \rightarrow I = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{k}{U_{ref}^2}}$$

Dlaczego użycie stałej prędkości referencyjnej może być lepsze w niektórych przypadkach? Postaram się to przedstawić na poniższym przykładzie, gdzie domena posiada złożony kształt, w której prędkość znacznie się zmienia (Patrz Rysunek 10):

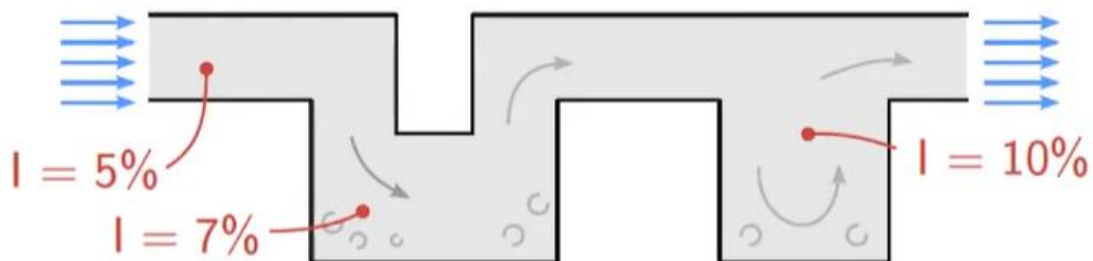


Rysunek 10 Badany przykład

W takiej geometrii istnieją strefy recyrkulacji czy miejsca separacji przepływu, a także obszary, gdzie nie dzieje się nic niespodziewanego i przepływ jest ustalony. Jeśli przyjmujemy stałą prędkość odniesienia, intensywność turbulencji bezpośrednio odzwierciedla fluktuacje prędkości, które można monitorować w każdym punkcie przepływu. To z kolei umożliwia nam dokładne zrozumienie dynamiki przepływu oraz jego właściwości w różnych jego częściach. Samą zależność opisuje równanie:

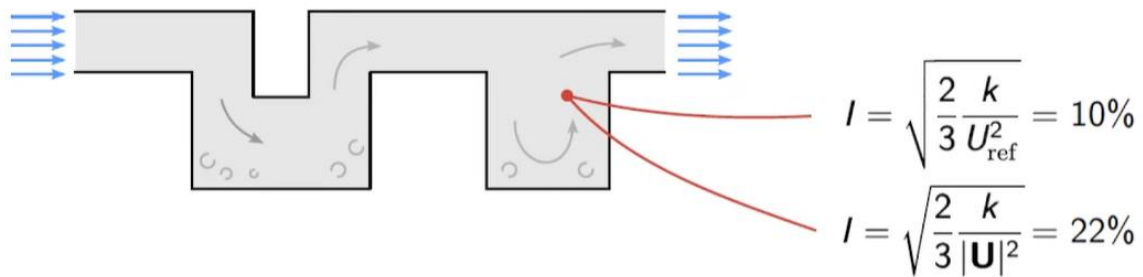
$$u_{rms} = IU_{ref}$$

Przykładowo, jeżeli przyjmie się $U_{ref}=2.0$ m/s, a intensywność turbulencji będzie równa $I=5\%$, to fluktuacje będą równe $u'=0.1$ m/s (Patrz Rysunek 11).



Rysunek 11 Przedstawienie intensywności turbulencji za pomocą stałej wartości prędkości

Jeśli jednak chcielibyśmy porównać lokalną siłę turbulencji z innymi typowymi typami przepływu, bardziej przydatna jest zmienna prędkość odniesienia. Przykładowo $|U|$ jest niższe niż U_{ref} w obszarze recyrkulacji. W związku z tym rzeczywista siła turbulencji jest znacznie wyższa niż 10% (Patrz Rysunek 12).

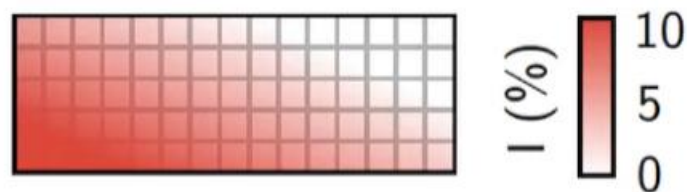


Rysunek 12 Przedstawienie intensywności turbulencji za pomocą wartości lokalnej prędkości

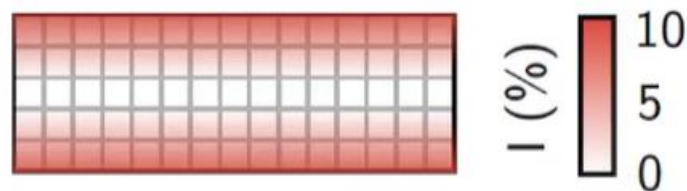
Stąd też należy wyciągnąć następujący wniosek:

Jeśli celem wizualizacji intensywności turbulencji jest wskazanie lokalnych fluktuacji prędkości, bardziej przydatna jest stała prędkość odniesienia. Natomiast jeżeli celem jest porównanie siły turbulencji z innymi obszarami, bardziej przydatna jest wielkość prędkości lokalnej.

Z powodu istnienia dwóch możliwych definicji intensywności turbulencji zawsze należy podać informację, z którego równania skorzystano. Dodatkowo trzeba zdawać sobie sprawę, że wykres intensywności turbulencji będzie różnie wyglądać dla różnych definicji. Przykład przedstawiono poniżej (Patrz Rysunek 13 i Rysunek 14).



Rysunek 13 Kontury intensywności turbulencji w odniesieniu do stałej prędkości odniesienia 2 m/s



Rysunek 14 Kontury intensywności turbulencji. Prędkość odniesienia jest przyjmowana jako prędkość lokalna


Różnica w wyglądzie obu przypadków wynika stąd, że w drugim przykładzie intensywność turbulencji zależy od prędkości lokalnej. Stąd też wartość tego parametru jest wysoka w miejscach, gdzie prędkość lokalna maleje (czyli w pobliżu ścianek).

Mając na wglądzie powyższy przykład warto jest sprawdzić definicje tego parametru w dokumentacji programu. SOLIDWORKS Flow Simulation korzysta z definicji, gdzie intensywność turbulencji zależy od prędkości lokalnej.

Jednakże, żeby mieć pewność, z której definicji się korzysta, zaleca się stworzenie swojego wykresu konturowego, gdzie samemu definiuje się równanie (taką możliwość oczywiście zapewni SOLIDWORKS FLOW Simulation).

Prędkość na wlocie

Przy definiowaniu warunku brzegowego, gdzie określa się prędkość na wlocie, turbulentna energia kinetyczna jest wyliczana na podstawie intensywności turbulentnej i lokalnej wartości prędkości (Patrz Rysunek 15).

$$k = \frac{3}{2} I^2 |U|^2$$


Rysunek 15 Definicja turbulentnej energii kinetycznej na wlocie

Przy definiowaniu turbulentnej energii kinetycznej dla przepływów wewnętrznych należy zdawać sobie sprawę z warstwy przyściennej (Patrz Rysunek 16). W przypadku przepływów wewnętrznych na ścianach zaczynają tworzyć się warstwy graniczne, które zamaskowują przypisaną turbulentną energię kinetyczną. Aby poradzić sobie z tym problemem można: zwiększyć długość odcinka dolotowego, aby umożliwić całkowity wzrost warstwy granicznej (Patrz Rysunek 17) lub zastosować profile U, k, ε, które są w pełni rozwinięte.



Rysunek 16 Turbulentna energia kinetyczna, a warstwa przyścienna



Rysunek 17 Rozwiązanie problemu, polegające na wydłużeniu odcinka dolotowego

Podsumowanie

Intensywność turbulencji

Intensywność turbulencji jest kluczowym parametrem w analizach komputerowej dynamiki płynów (CFD). Jest to miara, która opisuje poziom fluktuacji prędkości w turbulentnym przepływie. Definiuje się ją jako pierwiastek ze średniej kwadratowej fluktuacji prędkości w stosunku do prędkości średniej w czasie. Wyrażenie to można przedstawić matematycznie jako:

$$I = \frac{u_{rms}}{|U|}$$

gdzie I to intensywność turbulencji, u_{rms} to średnia kwadratowa fluktuacji prędkości, a $|U|$ to średnia prędkość przepływu.

Łatwość interpretacji intensywności turbulencji

Intensywność turbulencji jest łatwiejsza do interpretacji niż turbulentna energia kinetyczna, ponieważ dostarcza bezpośrednich informacji o fluktuacjach prędkości, które są bardziej intuicyjne. Typowe wartości intensywności turbulencji są dobrze znane w literaturze i praktyce inżynierskiej, co ułatwia ocenę warunków przepływu:

- 0,5% oznacza słabą turbulencję,
- 3% oznacza średnią turbulencję,
- wartości powyżej 5% są uważane za silną turbulencję.

Wybór prędkości referencyjnej

Prędkość referencyjna jest kluczowa dla prawidłowego obliczenia intensywności turbulencji. Można ją przyjąć jako wartość stałą lub jako prędkość lokalną, w zależności od specyfiki badanego problemu i metodologii stosowanej w kodzie CFD. Stała prędkość referencyjna jest stosowana w sytuacjach, gdzie chcemy poznać wartości fluktuacji prędkości. Natomiast jeżeli celem jest porównanie siły turbulencji z innymi obszarami, bardziej przydatna jest wielkość prędkości lokalnej.

Sprawdzanie prędkości referencyjnej w kodzie CFD

Przed rozpoczęciem analizy, istotne jest sprawdzenie, jakiej prędkości referencyjnej używa wykorzystywany kod CFD. Informacja ta powinna być podana w dokumentacji lub wynikach obliczeń (wykresach/tabelach). Niezrozumienie lub niewłaściwe założenie dotyczące prędkości referencyjnej może prowadzić do błędnych interpretacji wyników symulacji.

Podsumowując, poprawne określenie i interpretacja intensywności turbulencji jest kluczowe w analizach CFD. Przemyślany wybór prędkości referencyjnej oraz uwzględnienie jej w interpretacji wyników pozwala na dokładniejsze i bardziej wiarygodne modelowanie turbulentnych przepływów.