

Piotr WIKLAK, Antoni SMOLNY
Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny
Instytut Maszyn Przepływowych
antoni.smolny@p.lodz.pl

ANALIZA OPŁYWU PROFILU TURBINY WIATROWEJ PRZY MAŁYCH LICZBACH REYNOLDSA

Streszczenie: Celem pracy było wykonanie obliczeń dla opływu profilu aerodynamicznego *NACA0018* stosowanego w turbinach wiatrowych małej mocy o pionowej osi obrotu. Do numerycznego modelowania przepływu został wykorzystany program *ANSYS CFX*. Wyniki obliczeń porównano z badaniami eksperymentalnymi dla określenia dokładności oraz przydatności przyjętej metody do modelowania zjawisk aerodynamicznych w zakresie małych liczb Reynoldsa. Rezultaty pracy mają określić przydatności programu *ANSYS CFX* do wyznaczenia pola przepływu wokół profilu i określenia jego charakterystyk dla pracy turbiny.

Słowa kluczowe: *NACA0018*, *ANSYS*, *Aerodynamika*, *Turbina wiatrowa*, *Turbina Darrieusa*.

ANALYSIS OF THE FLOW AROUND THE WIND TURBINE PROFILE FOR SMALL REYNOLDS NUMBER

Abstract: The purpose of this study was to calculate of flow an aerofoil *NACA0018* which is used in low-power wind turbines with a vertical axis of rotation. *ANSYS CFX* software was used for the numerical modeling of the flow. The results of calculations were compared with experimental studies to determine the accuracy and usefulness of the method for modeling aerodynamic phenomena. Results of the work may to be used for definition of the suitability of *ANSYS CFX* to determine the flow field around the airfoil and identify its performance characteristics for wind turbine.

Keywords: *NACA0018*, *ANSYS*, *Aerodynamics*, *Wind Turbine*, *VAWT*.

1. WSTĘP

Dywersyfikacja źródeł energetycznych oraz zwiększenie udziału źródeł odnawialnych w energetyce jest jednym z największych i najważniejszych wyzwań państw Unii Europejskiej i krajów rozwiniętych [1]. Jak pokazują doświadczenia ostatnich lat nie jest to zadanie proste, gdyż wraz z rozwojem technologii pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych pojawiają się problemy: techniczne, ekologiczne i ekonomiczne niewystępujące wcześniej w energetyce konwencjonalnej [2], [3], [4].

Pozyskiwanie energii z wiatru nie jest pomysłem nowym, obecnie na całym świecie prowadzone są badania nad rozwojem technologii urządzeń do pozyskiwania energii wiatrowej. Turbiny wiatrowe, gdyż o nich mowa, dzielimy na turbiny o osi pionowej i osi poziomej. Te pierwsze, prostsze w konstrukcji i teoretycznie mniej sprawne niż turbiny o osi poziomej, rozwijały się wolniej oraz przy znacznie mniejszych nakładach na ich badania.

Obecnie zainteresowanie turbinami o pionowej osi obrotu wzrasta z uwagi na fakt, że mogą one efektywnie pracować przy wietrze o często zmieniającej się prędkości i kierunku, czyli np. w terenie zabudowanym. Prace badawcze mają na celu zwiększenie ich sprawności i zapewnienie efektu samostartu. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że emitują one mniej szkodliwych dźwięków i drgań. Główną częścią badań nad tymi turbinami stanowią komputerowe symulacje opływu profili łopat w zakresie małych liczb Re . Poznanie zjawisk w tym zakresie liczb Re ma podstawowe znaczenie dla zwiększenia osiągnięć małych turbin wiatrowych.

Symulacje komputerowe pozwalają obniżyć koszty i często ograniczyć czas przeznaczony na badania eksperymentalne. Jednakże modelowanie przepływów z uwzględnieniem turbulencji oraz innych zjawisk związanych z 3D aerodynamiką przy małych liczbach Re nie należą do najprostszych. Wymagają zastosowania zaawansowanych kodów obliczeniowych typu RANS, które z uwagi na proste modelowanie turbulencji są nadal niedoskonałe [5]. Celem pracy było wykonanie obliczeń sprawdzających zdolność programu ANSYS CFX do modelowania pola przepływu wokół profilu łopatki turbiny w zakresie uwzględniającym małe liczby Reynoldsa (Re).

Do przeprowadzenia serii testowej wybrano gruby symetryczny profil serii NACA0018, stosowany szeroko w małych turbinach wiatrowych o osi pionowej. Obliczenia wykonano dla kąta natarcia: $AOA = 0^\circ$ w zakresie liczb Reynoldsa od 150 tys. do 1 miliona, odpowiadającym zakresowi pracy turbin. Weryfikacja algorytmów obliczeniowych programu ANSYS CFX dla zerowego kąta natarcia pozwoli na przejście do obiektów i ustawień kątowych profili w zakresie pracy turbiny. Pozwoli to w następnych etapach pracy ocenić wpływ kąta natarcia oraz wpływ wirowania łopatki na pole przepływu wokół profilu. Obliczenia niestacjonarnej struktury przepływu wokół profilu mają duże znaczenie dla zrozumienia aerodynamiki opływu profilu, a także oszacowania możliwości obliczania i optymalizacji parametrów turbiny za pomocą prostszych metod obliczeniowych.

Należy podkreślić, że badania dynamicznych stanów obciążenia turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu są niezwykle istotne dla dalszej optymalizacji ich osiągnięć oraz niwelowania ubocznych negatywnych efektów.

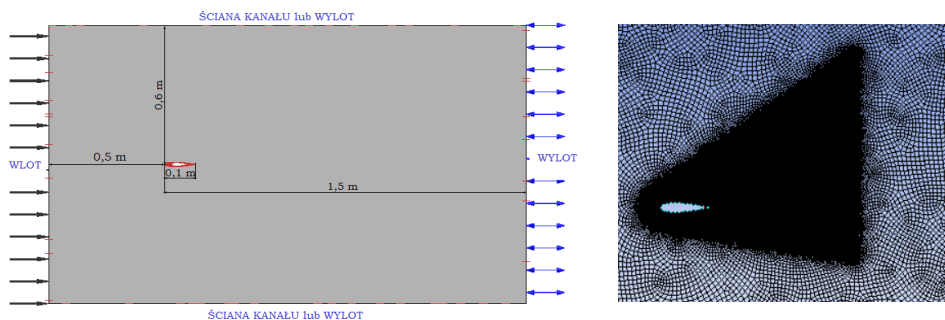
Uwzględnienie tych efektów w ich konstrukcji może pozwolić na opracowania turbin o potencjalnie znacznie większej sprawności i przydatności dla energetyki rozproszonej niż turbin o poziomej osi obrotu.

2. ALGORYTM PRZYGOTOWANIA OBIEKTU DO MODELOWANIA

Turbiny wiatrowe ze względu na swój kształt, rozmiar oraz trójwymiarowe niestacjonarne opływy profili, rozpatrywane są za pomocą metod znacznie uproszczonych, jako przypadki dwuwymiarowe. Wykorzystuje się w nich wyniki 2D badań eksperymentalnych profili. W przypadku małych turbin nie w pełni poznany zagadnieniem jest dokładność obliczeń opływu profilu dla małych liczb Reynoldsa, gdzie mogą powstawać oderwania warstwy przyściennej, zawirowania, itp., co może wpływać na zmniejszenie ich osiągnięć.

W ostatnim okresie daje się zauważyć coraz częstsze zastosowanie zaawansowanych kodów CFD: 2D i 3D, które pozwalają otrzymać bardzo precyzyjne informacje, zarówno o polu przepływu jak i charakterystykach turbiny wiatrowej. Realizację obliczeń profilu zaczyna się od przyjęcia jego geometrii i stworzenia optymalnej siatki obliczeniowej oraz nadania odpowiednich warunków brzegowych.

Wymiary i opis domeny, na której zostały prowadzone obliczenia przedstawione w pracy znajdują się na rys. 1.



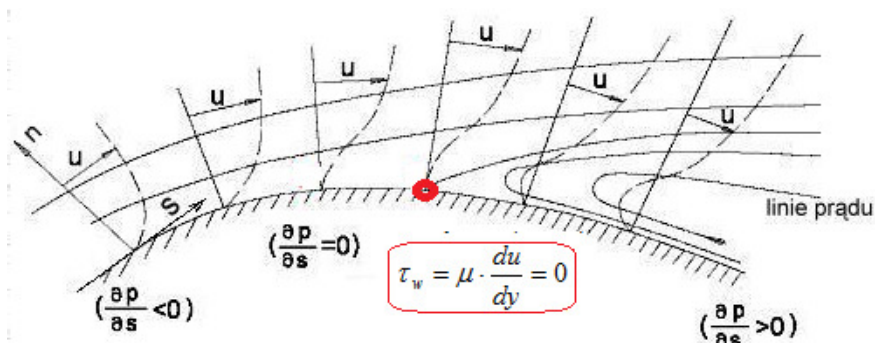
Rys. 1. Wymiary, opis i wygląd domeny obliczeniowej

Fig. 1. Dimensions, description and view of the computational domain

Wszystkie obliczenia zostały wykonane jako 2D stacjonarne RANS, użyto w nich modelu turbulencji Shear Stress Transport (SST) (Menter, Wilcox, [6], [7]). Ponadto użyto modelu przejścia laminarno-turbulentnego: $\Gamma - \Theta$, które poprawnie opisuje to zjawisko w odniesieniu do opływu profili [8]. Największa wartość Y^+ we wszystkich przypadkach nie przekracza 0,8 dla Re_{max} .

Wraz ze wzrostem liczby Reynolds'a na profilu, przepływ w warstwie przyściennej zmienia się z laminarnego na przejściowy i dalej na turbulentny [9].

Na rysunku 2 przedstawiono przewidywany mechanizm oderwania warstwy przyściennej, który wystąpi dla małych liczb Re .



Rys. 2. Mechanizm odrywania warstwy przyściennej [10]

Fig. 2. Mechanism of detachment of the boundary layer [10]

Dla opływu profilu, wraz ze spadkiem liczby Re , podatność przepływu na tworzenie się lokalnych oderwań w warstwie przyściennej na profilu wzrasta. Oznacza to, że im niższa liczba Re tym bardziej można się spodziewać: oderwań, wirów, pulsacji w przepływie, które mogą przekładać się na generowanie błędów numerycznych i wolniejszą zbieżność wyników.

Rozpatrzono następujący układ warunków brzegowych dla opływu profilu: 1) wlot strumienia otwarty do otoczenia, tzw. „opening”, 2) wlot strumienia do kanału w którym znajduje się rozpatrywany profil, tzw. „wall-outlet”, 3) wlot strumienia do kanału z możliwością wlotu i wylotu strugi na wylocie z kanału, tzw. „wall-opening”. Różnica pomiędzy warunkami 2 i 3 jest taka, że (wall-opening) dopuszcza kierunek strugi na wylocie w obie strony, a (wall-outlet) tylko w jedną stronę, jako wypływ, rys. 1.

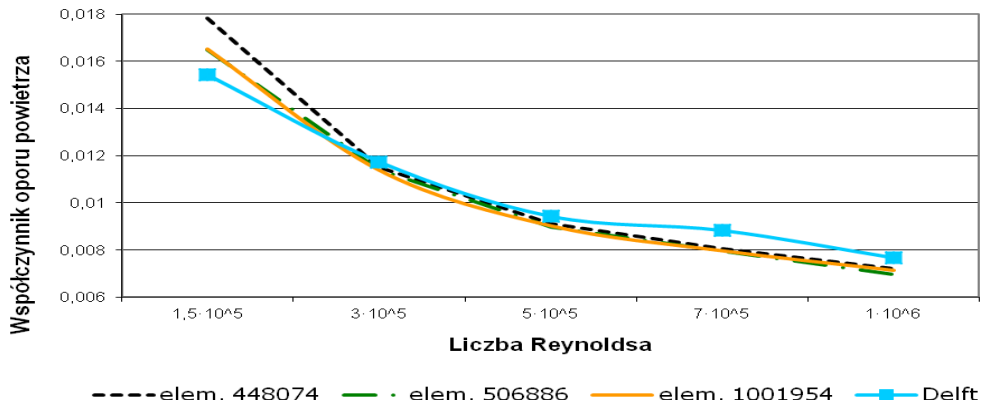
Obliczenia wykonano dla turbulencji wejściowej (T_u) w zakresie $T_u = 1\%$ (domyślne ustawienie), 5% oraz 10% . Oszacowano jej wpływ na dokładność obliczeń.

3. WPŁYW ROZMIARU SIATKI NA DOKŁADNOŚĆ OBLICZEŃ

W obliczeniach numerycznych, ze względu na sposób wykonywania obliczeń bardzo dużą rolę odgrywa wielkość stworzonej domeny oraz liczba elementów siatki obliczeniowej. W każdym z tych przypadków należy znaleźć kompromis, ponieważ zbyt mała domena i mała liczba elementów siatki będzie miała wpływ na dokładność obliczeń, w szczególności również na ujawnienie pewnych zjawisk, np. lokalnych zamkniętych oderwań przepływu wewnątrz warstwy przyściennej.

Przykładowo na rys. 3 przedstawiono wpływ gęstości siatki na dokładność obliczeń współczynnika oporu powietrza. Dane obliczeniowe opływu profilu NACA0018 z turbulencją strugi $T_u = 1\%$ zostały zestawione z wartościami z badań eksperymentalnych z Delft University of Technology (Timmer [11]).

Wpływ gęstości siatki jest widoczny szczególnie dla małych liczb Re . Obliczenia wykonane na zbyt rzadkiej siatce nie dadzą dokładnych wyników, poza tym mogą pominąć ważne lokalne zjawiska istotne dla badanego zagadnienia.



Rys. 3. Zmiany dokładności obliczeń w zależności od ilości użytych elementów w siatce
 Fig. 3. Variations of the calculations accuracy based on the number of elements used in the grid

Przed obliczeniami głównymi należy zatem przeprowadzić obliczenia doboru optymalnej wielkości domeny i rozmiaru siatki.

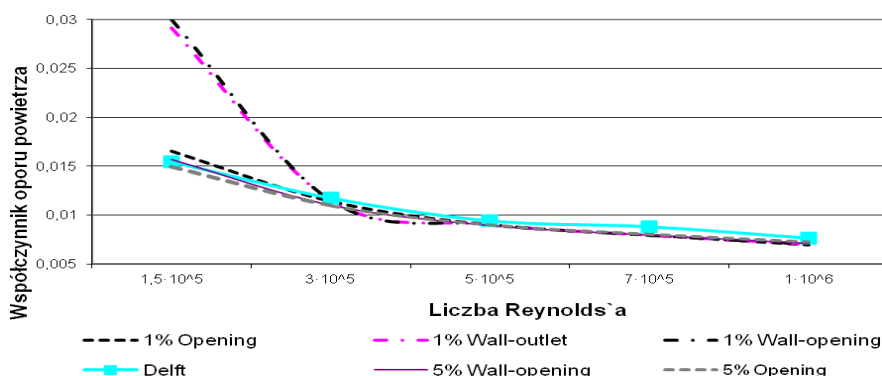
W szczególności optymalna siatka dla całej domeny powinna zapewnić odpowiednie zagęszczenie w charakterystycznych miejscach warstwy przyściennej, np. w miejscu lokalnych oderwań przepływu.

4. WPŁYW WARUNKÓW BRZEGOWYCH NA DOKŁADNOŚĆ OBLICZEŃ

Jednym z ważniejszych zagadnień w modelowaniu pola przepływu jest zadanie odpowiednich warunków brzegowych, rys. 1. W zależności od sposobu zadania tych warunków program stosuje odpowiednie założenia matematyczne i stosowane algorytmy, które mogą wpływać na wyniki obliczeń.

Na rysunku 4 zestawiono wyniki obliczeń numerycznych z eksperymentem współczynnika oporu profilu C_d , dla trzech rodzajów warunków brzegowych pokazanych na rys. 1. Liczba elementów siatki wynosiła 506886, turbulencja na wlocie odpowiednio: 1% i 5%. Z analizy badań eksperymentalnych [12] wynikało, że turbulencja na wlocie do tunelu aerodynamicznego, wynosiła ok. 1%.

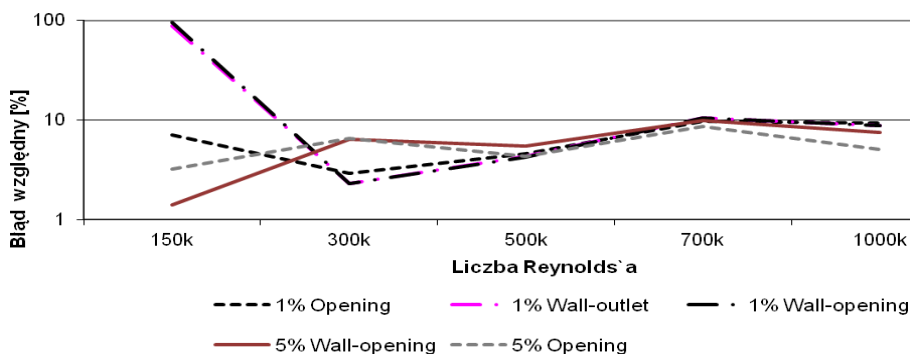
Z rysunku 4 wynika, że obliczenia dla niskiego stopnia turbulencji są wrażliwe na rodzaj zastosowanych warunków brzegowych. Znaczące różnice w obliczeniach dla małych Re obserwowano przy zmianach warunków na ściankach bocznych (obecność ścianek lub ich brak). Natomiast zmiana kryteriów przepływu na wlocie praktycznie nie wpływa na obliczoną wartość współczynnika oporu C_d . Oznacza to, że obliczenia dla małych liczb Re , *lepiej wykonywać bez oddziaływania na obecność ścianek, podobnie jak ścianki podczas badań eksperymentalnych w tunelu nie powinny oddziaływać na model.* Tylko dla takich ustawień można uzyskać wartościową informację o przepływie w warstwie przyściennej na profilu i zgodność z eksperymentem dla współczynnika oporu C_d . Natomiast dla stopnia turbulencji $T_u = 5\%$ nie obserwowano istotnego wpływu warunków brzegowych na wartość C_d .



Rys. 4. Zmiany dokładności obliczeń w zależności od użytych warunków brzegowych
 Fig. 4. Variations of the calculations accuracy based on the boundary conditions used

Dodatkowo na rysunku 5 przedstawiono wykresy względnych błędów w skali logarytmicznej w zależności od przyjętych w obliczeniach warunków brzegowych i stopnia turbulencji T_U na wlocie modelowanego obiektu.

Dla serii obliczeń z niską liczbą $Re = 1,5 \cdot 10^5$ rodzaj warunków brzegowych, tj. obecność ścianek bocznych kanału przy niskiej turbulencji na jego wlocie, powoduje powstanie błędu w stosunku do zmierzonej wartości współczynnika oporu C_d wynoszącej 100% jego wartości. Dodatkowo w tym przypadku powoduje również powstanie przepływu niesymetrycznego, co dla kąta natarcia równego 0° jest anomalią. Może ona wynikać, właśnie z oddziaływania ścianek na model. Nie wykluczone również jest to, że nierównomierny rozkład ciśnień jest wywołany niesymetryczną dystrybucją elementów siatki (rys. 1).



Rys. 5. Zmiany niepewności względnego dla danych warunków brzegowych
 Fig. 5. Variations of the relative uncertainty for given data of the boundary conditions

Porównując, dla takiego samego okanałowanego modelu, tylko ze zwiększoną (5%) wstępną turbulencją, takie zjawisko nie powstaje. Sturbulizowanie przepływu poprawia stateczność strugi, powodując jej

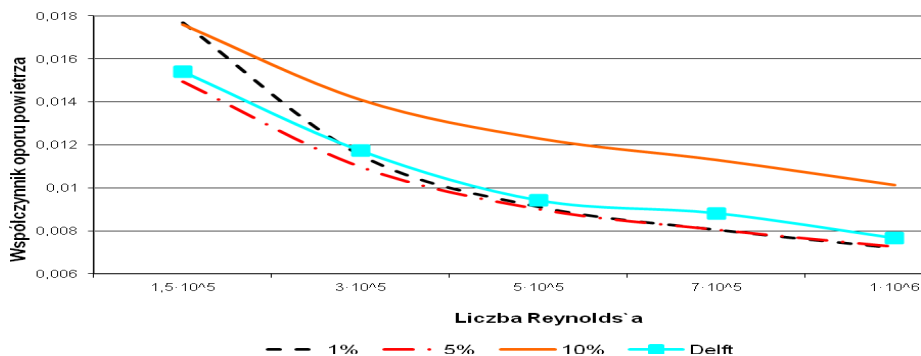
„przyklejenie” się do profilu, co widoczne jest na rysunkach przedstawionych w tab. 1. Pokazano tam rozkład naprężenia stycznego na ścianie profilu. Oderwanie w warstwie przyściennej dla małej wartości Re i jego redukcja ze wzrostem turbulencji napływającego strumienia są bardzo dobrze widoczne.

5. WPŁYW UWZGLĘDNIENIA TURBULENCJI NA WLOCIE NA DOKŁADNOŚĆ OBLICZENIA WSPÓŁCZYNNIKA OPORU

Małe turbiny pracują zwykle w strefie bardzo porywistych i silnie sturbulizowanych wiatrów. Uwzględnienie tych warunków ich pracy będzie miało duże znaczenie dla wybrania odpowiednich profili zapewniających wysoką sprawność turbin w tych warunkach. Celem obliczeń było oszacowanie wpływu liczby Re i stopnia turbulencji strugi T_U na straty profilu, tj. współczynnika oporu.

W celu określenia wpływu turbulencji na opływ profilu, w szczególności na współczynnik C_d przeprowadzono dodatkowe obliczenia z wyższymi stopniami turbulencji na wlocie odpowiadającymi zakresowi pracy turbiny.

Na rys. 6 przedstawiono porównanie eksperymentu z wynikami obliczeń dla wybranych warunków brzegowych, tj. wylotu otwartego (Opening, rys. 1). Obliczenia wykonano na siatce składającej się z 506886 elementów oraz dla turbulencji na wlocie równej odpowiednio 1%, 5% i 10%. Widoczne jest, że numeryczne podniesienie parametru turbulencji do $T_U=5\%$ wpływa na wyrównanie strugi i obniżenie współczynnik oporu C_d . Co zasadniczo poprawia zgodność z badaniami eksperymentalnymi w zakresie małych liczb Re . Natomiast dopiero wysoka intensywność turbulencji z $T_U=10\%$ znacząco wpływa na wzrost współczynnika oporu C_d w całym zakresie rozpatrywanych liczb Re .



Rys. 6. Zmiany dokładności obliczeń od wartości turbulencji na wlocie

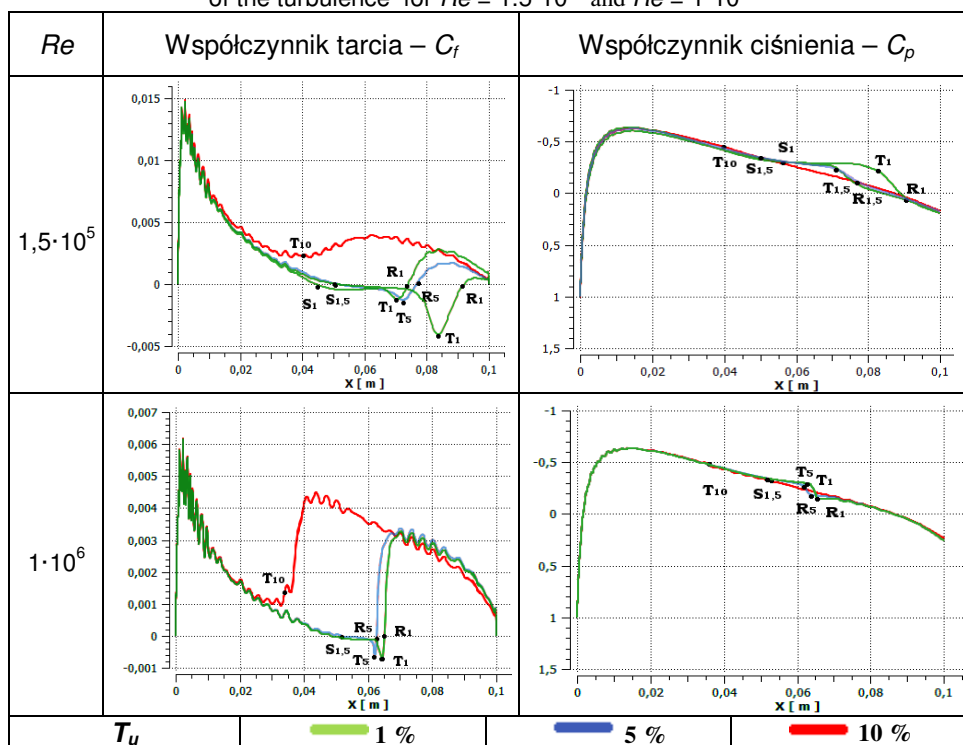
Fig. 6. Variation of calculations accuracy based on the used inlet turbulence

W celu pełniejszej analizy zmian zachodzących w warstwie przyściennej rozwijającej się na profilu w tab. 1 pokazano przebiegi współczynników tarcia C_f oraz współczynników ciśnienia C_p w zależności od stopnia turbulencji dla najniższej i najwyższej rozpatrywanych w pracy liczb Re . Na wykresach opisano kolejno punkty: oderwania warstwy przyściennej (S – separation), początku przejścia laminarno-turbulentnego (T – transition) oraz ponownego przyklejenie warstwy przyściennej (R – reattachment).

Widoczne w tabeli 1 rozkłady C_f i C_p dla 1% turbulencji dla rozważanych skrajnych liczb Re występowanie lokalnego oderwania w warstwie przyściennej. W przypadku małej liczby Re równej 150 tysięcy występują zjawiska oderwania S, przejścia laminarno turbulentnego T i ponownego przyklejenia się przepływu R niesymetrycznie po obu stronach przepływu.

Tabela 1. Wykresy współczynnika tarcia i współczynnika ciśnienia w funkcji turbulencji dla $Re = 1.5 \cdot 10^5$ i $Re = 1 \cdot 10^6$

Table 1. Graphs of friction coefficient and the pressure coefficient as a function of the turbulence for $Re = 1.5 \cdot 10^5$ and $Re = 1 \cdot 10^6$

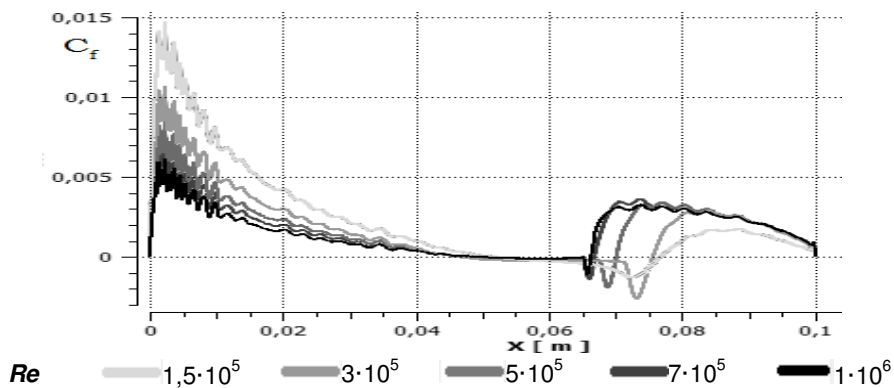


Na jednej stronie oderwanie jest większe niż na drugiej stronie. Prawdopodobnie wyniknęło to z przyczyn omówionych wcześniej w pkt. 4. Spowodowało to również zmiany w rozkładzie ciśnienia, które różnią się po obu stronach profilu w strefie oderwania warstwy przyściennej. Widoczne jest, że niska turbulencja (do 5%) powoduje zmiany w tylnej części lokalnego oderwania przepływu; przesuwa punkt przyklejenia przepływu R w górę profilu, tj. w kierunku krawędzi natarcia. Dla obu rozpatrywanych liczb Re przy turbulencji $T_u = 5\%$, przepływ jest symetryczny z wyraźnie zarysowanymi punktami (S, T, R). Turbulencja $T_u = 10\%$ całkowicie eliminuje oderwania przepływu i przesuwa strefę przejścia laminarno-turbulentnego w górę przepływu, czyli w kierunku krawędzi natarcia.

Dla dużej liczby Re samo oderwanie i jego zmiany są niewielkie, stąd wpływ turbulencji na współczynnik oporu jest pomijalny. Natomiast dla dużej

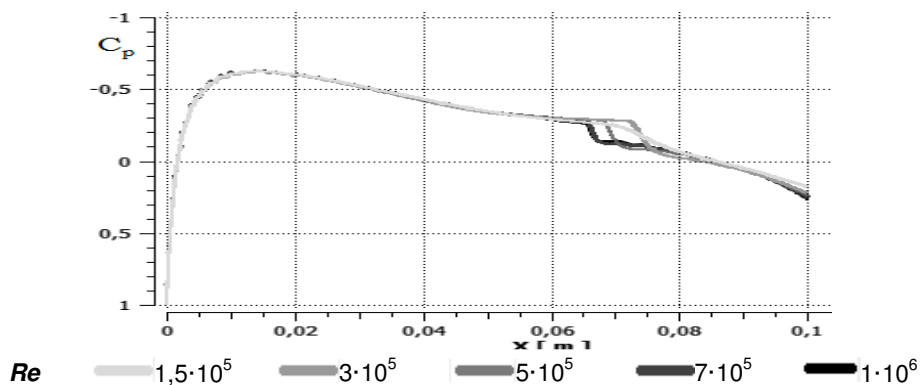
liczby Re duża turbulencja ($T_u = 10\%$) wpływa na przesunięcie strefy przejścia w górę przepływu. Zmienia się ona gwałtownie w warstwę turbulentną, okupującą znacznie większą część powierzchni profilu niż dla niskiej turbulencji. Stąd wartość współczynnika oporu C_d wzrasta znacząco w tym przypadku.

Współczynnik tarcia C_f oraz współczynnik oporu C_d zmieniają się nie tylko w funkcji turbulencji wejściowej, ale również w funkcji liczby Re .



Rys. 7. Zmiany współczynnika tarcia dla $T_u = 1\%$ w zależności od liczby Reynoldsa
Fig. 7. Variation of the friction coefficient for $T_u = 1\%$ depending on the Reynolds number

Rysunek 7 pokazuje jak, wraz ze wzrostem liczby Re , zmienia się rozkład współczynnika tarcia. Miejsce separacji przesuwają się w kierunku krawędzi natarcia, zawężając miejsce przejścia laminarno-turbulentnego oraz ponownego przyklejenia, przez co warstwa przyścienna występuje na większej powierzchni profilu.



Rys. 8. Zmiany współczynnika ciśnienia dla $T_u = 1\%$ w zależności od liczby Reynoldsa
Fig. 8. Variation of the pressure coefficient for $T_u = 1\%$ depending on the Re number

Można zauważyć, że podwyższenie turbulencji (T_u) w granicach do 5%, ma podobny skutek jak nieznaczne zwiększenie liczby Re , czyli przesunięcie wykresów współczynnika tarcia w kierunku krawędzi natarcia łopatki i zmniejszenie oderwania. Nie powoduje to jednak wzrostu współczynnika tarcia.

Zmiany współczynnika ciśnienia C_p w zależności od liczby Re przedstawiono na rys. 8. Zmiany ciśnienia na profilu mają charakter lokalny w postaci płaskiego rozkładu, tzw. *strefa plateau*; jest ona bardzo dobrze widoczna dla wszystkich liczb Re tuż przed przejściem laminarno-turbulentnym (T). Długość tego obszaru zmniejsza się wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa.

6. PODSUMOWANIE

Wykonane w pracy obliczenia i porównanie z badaniami eksperymentalnymi pokazują, iż obliczenia parametrów przepływowych dla profili takich jak *NACA0018* są stosunkowo wiarygodne również w zakresie relatywnie małych liczb Reynoldsa. Programy typu *RANS* poprawnie obliczają współczynnik oporu C_d również w zakresie małych liczb Reynoldsa, gdy na profilu powstają oderwania w warstwie przyściennej. Przy czym należy zwrócić uwagę na warunki brzegowe, które nie powinny mieć wpływu na obliczany model. Uzyskana dokładność obliczeń dla małych Re mieści się w paśmie 10%.

Dla małego Re turbulencja strumienia opływającego profil może nawet obniżyć współczynnik strat C_d . Jest to wynikiem likwidacji oderwania i przesunięcia początku strefy oderwania w górę przepływu. Stąd stosowanie grubych profili i profili wysoko obciążonych w małych turbinach wiatrowych wydaje się jak najbardziej właściwe.

Dla dokładniejszej weryfikacji modelu turbulencji i przejścia laminarno-turbulentnego należy wykonać pełną analizę porównawczą dla przepływu z zastosowaniem symetrycznej siatki w szerokim zakresie liczb Re szczególnie dla liczb $Re \leq 150\,000$ oraz różnych od 0° kątów napływu na profil. Pozwoli to zebrać bardzo cenną informację o zachowaniu się profilu przy zmianie jego kąтового położenia, co ma bardzo duże znaczenie dla właściwości, tzw. samostartu turbiny.

LITERATURA

- [1] Boczar T.: *Wykorzystanie energii wiatru*, Wydawnictwo PAK, Warszawa, 2010.
- [2] Lewandowski M.L.: *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2007.
- [3] Gaj P., Błaszczak J.R.: *Pomiary drgań przy użyciu niestacjonarnego systemu monitoringu turbin wiatrowych*. CMP/Turbomachinery, No. 144, 2013, ss. 23-32.
- [4] Nolbrzak I., Błaszczak J.: *Wind Turbine as a Potential Energy Source for Households – Lodz region case*. CMP/Turbomachinery, No. 137, 2010, ss. 79-90.
- [5] www.fluid.ippt.pan.pl/papers/Drobniak_Kowalewski_MechanikaPlynow2010
- [6] Wilcox, D.C.: *Multiscale model for turbulent flows*, AIAA 24th Aerospace Sciences Meeting. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1986.
- [7] Menter F.R.: *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*, AIAA-Journal., 32(8), 1994, pp. 1598-1605.
- [8] ANSYS help 14.5, Modeling Guide/ 4.1 Turbulence models/ 4.1.10 CFX Transition Model.
- [9] Smolny A., Błaszczak J.R.: *Boundary Layer and Loss studies on Highly Loaded Turbine Cascade*, AGARD CP571, 1996.
- [10] www.imc.pczest.pl/instytut/pl/3/3.8/www/von_karman/teoria.html
- [11] Timmer W.A.: *Two-dimensional low-Reynolds number wind tunnel results for airfoil NACA 0018*, Wind Engineering, 2008, Vol. 32, No. 6.