

dr hab. inż. Piotr Strzelczyk, prof. PRz
Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Zakład Termodynamiki i Mechaniki Płynów
Al. Powstańców Warszawy 8 L33.7
35-959 Rzeszów

Rzeszów, dn. 15 lipca 2016r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Konrada Kacprzaka

pt:

„NUMERYCZNA O EKSPERYMENTALNA ANALIZA PRZEPLYWU PRZEZ TURBINY WIATROWE SAVONIUSA”

Przedstawiona do recenzji praca składa się ze 113 stron numerowanych tekstu zwartego, ułożonego w 5 numerowanych rozdziałów zawierających podrozdziały. Pracę kończy spis piśmiennictwa związanego z tematyką rozprawy. Właściwy tekst pracy poprzedzony jest spisem treści jak również spisem ważniejszych oznaczeń.. W pracy cytowanych jest 112 pozycji źródłowych. Praca ma charakter obliczeniowo-doświadczalny.

1. Trafność doboru tematyki pracy

Tendencje wzrostowa cen kopalnych nośników energii, świadomość ich ograniczonych zasobów, a w konsekwencji zależność ich cen od czynników spekulacyjnych, konieczność ochrony środowiska naturalnego oraz, w odniesieniu do energetyki jądrowej- nie zawsze uzasadniona -radiofobia przekładają się na ciągły wzrost kosztów wytwarzania energii. Jest to jedną z przyczyn stałego wzrostu kosztów produkcji i usług. Stawia to przed badaczami nowe wyzwania w kierunku poszukiwania nowych technologii pozyskiwania energii, ale również podnoszenia efektywności i sprawności już istniejących rozwiązań. Jednym z możliwych kierunków jest kwestia wykorzystania energii wiatru przez mikroinstalacje pracujące na potrzeby lokalne, pojedynczych gospodarstw, czy wręcz, jako pomocnicze źródło zasilania dla urządzeń autonomicznych w terenie. Turbiny wiatrowe dedykowane takim warunkom powinny być proste strukturalnie, konstrukcyjnie i eksploatacyjnie, a ich praca nie powinna być zależna od kierunku wiatru. Ponadto powinny dać się łatwo wkomponować w terenie zurbanizowanym.

Takie zastosowania preferują turbiny z pionową osią obrotu (VAWT). Paradoksalnie, o ile aerodynamika turbin typu Darriusa i ich

modyfikacji jest dość dobrze rozpoznana (min. dzięki wcześniejszym zasobom wiedzy dotyczącej zjawisk przeciągnięcia dynamicznego, czy oddziaływania wirów z łopataą tzw. BVI a wynikającej z badań nad wirnikami śmigłowców), o tyle zjawiska zachodzące przy opływie tzw. maszyn oporowych w rodzaju turbiny Savoniusa i pochodnych są dość słabo rozpoznane. Przepływ wokół takiego jest z definicji zagadnieniem trójwymiarowym i nieustalonym, co nastęrcza dużych trudności doświadczalnych i stanowi znaczne wyzwanie dla metod obliczeniowych.

Ta właśnie ważna i aktualna problematyka stała się obiektem zainteresowania naukowego Pana mgr inż. Konrada Kacprzaka

2. Merytoryczna treść pracy

Praca doktorska, którą przedłożono mi do recenzji zawiera problematykę dotyczącą badania i analizy pracy wirników turbin o osi pionowej typu Savoniusa i Bacha. W pracy wykonano obliczenia metodami numerycznej mechaniki płynów z wykorzystaniem komercyjnego pakietu ANSYS Fluent CFX. Wyniki rozwiązań numerycznych zostały porównane z danymi z pomiarów charakterystyk aerodynamicznych przeprowadzonych na stanowisku do badania turbin pionowych zainstalowanym na dachu budynku IMP PŁ. **Rozdział pierwszy** zatytułowany „Wstęp teoretyczny” ma charakter opisowy i obejmuje wprowadzenie do tematyki pracy poprzez krótki opis mechanizmu powstawania wiatru, jego zmienność czasową, metody opisu statystycznego wiatru. Jest to przedmiotem podrozdziałów 1.2...1.6. W dalszych podrozdziałach 1.6...1.15 podejmuje się Autor skróconego opisu zasad pracy turbin wiatrowych z podziałem na maszyny wykorzystujące siłę nośną i maszyny oporowe, stopniowo skupiając się na turbinie Savoniusa. W krótkich rozdziałach 1.16 i 1.17 Doktorant poświęca uwagę tematyce rozwiązywania zadań mechaniki płynów. Cel, motywacja oraz zakres pracy, teza pracy zostały zdefiniowane w rozdziale 1.8. Teza dysertacji (str.34) brzmi:

„Stworzenie zaawansowanego modelu numerycznego turbin wiatrowych Savoniusa, przy zastosowaniu nowoczesnych metod numerycznej mechaniki płynów, z jednoczesną weryfikacją eksperymentalną, pozwoli na wyznaczenie wpływu poszczególnych parametrów geometrycznych turbiny wiatrowej Savoniusa na jej sprawność i charakter przepływu”

Rozdział drugi dotyczy zagadnienia modelowania przepływu przez wirnik turbiny w ujęciu płaskim (2D) Autor definiuje tu geometrię turbin które przebadal na drodze numerycznej. Następnie opisuje strukturę geometryczną siatki obliczeniowej. Ponieważ położenie wirnika ulega zmianie względem kierunku strumienia niezaburzonego, zastosowano podział domen na zewnętrzną nieruchomą i wewnętrzną. Siatka ruchoma, o cylindrycznych granicach obejmowała wirnik i część

obszaru przepływu, w którym Doktorant spodziewał się występowania masywnych struktur wirowych związanych z oderwaniami na łopatach wirnika. Siatka nieruchoma stanowi prostokątne zewnętrzne siatki nieruchomej. W obu przypadkach zastosowano siatkę heksaedralną, niestrukturalną, co wynika z własności zastosowanego środowiska obliczeniowego Ansys CFX. Do opisu turbulencji wykorzystano model Mentnera SST będącego strefowym połączeniem modeli $k-\varepsilon$ i $k-\omega$. Przejście laminarno-turbulentne było opisane z wykorzystaniem modelu przejścia L-T typu: $\gamma-\theta$ (lub: $\gamma-Re(\delta_2)$). W celu uniknięcia błędów interpolacji zastosowano, krok czasowy dobrano tak, aby uzyskać zgodność węzłów na granicy domeny ruchomej i nieruchomej. Wadą tego podejścia jest to, że zmiana prędkości przepływu niezaburzonego powoduje jednocześnie zmianę liczby Reynoldsa dla turbiny. Podobny problem występuje w przypadku badań doświadczalnych gdy dążymy do utrzymania stałej prędkości obrotowej, a zmiana współczynnika szybkości λ odbywa się za pomocą zmiany przepływu niezaburzonego. W celu spełnienia warunku CFL (Couranta-Fredrichsa-Levyego) przyjęto krok czasowy na poziomie $3 \cdot 10^{-4}$ s, co zapewniało wartość liczby Couranta poniżej 3. Przyjęty krok czasowy jest na tyle mały, że zapewnia dość dokładne odwzorowanie tworzących się struktur wirowych. W opisywanych symulacjach stosowano mieszaną metodę dyskretyzacji równań (rzędu 1 i 2) w odniesieniu do zmiennych przestrzennych i metodę upwind rzędu drugiego jeśli chodzi o dyskretyzację w czasie. Zbadany został również wpływ intensywności turbulencji na charakterystyki mocy turbiny, w zakresie od 1...10% przy czym wydaje się, że ma on znaczenie raczej marginalne (tj. poniżej 1%), dla rotoru Savoniusa. Podobnie rzecz ma się z przestrzenną skalą turbulencji. Jest to istotny wniosek z punktu widzenia weryfikacji wyników obliczeń w oparciu o dane z badań modelowych, jak i z punktu widzenia zastosowań praktycznych.

Podrozdział 2.2. Poświęcony został analizie uzyskanych wyników dla weryfikacji danych uzyskanych na drodze symulacji numerycznych w głównie w oparciu o dostępne prace Kamojiego i współpracowników. W przypadku turbiny Savoniusa nastąpiło przeszacowanie mocy o ok. 13% i niedoszacowanie o ok. 10% w przypadku turbiny Bacha. Autor słusznie zauważa, że model 2D nie uwzględnia interakcji pomiędzy warstwami przyściennymi na łopatach i płytach brzegowych które zostały zastosowane w modelu rzeczywistym. Do pełnego opisu niezbędne jest, więc niezbędne trójwymiarowe modelowanie przepływu nieustalonego, co też Doktorant uczynił dalszą częścią swej dysertacji. Podrozdział 2.2.2. poświęcono szczegółowemu opisowi zjawisk przepływowych jakie mają miejsce przy przepływie w otoczeniu wirnika Savoniusa. Ogólny opis zjawiska tu przedstawiony wydaje się być poprawny, Autor identyfikuje tu cztery typy struktur wirowych jakie powstają na skutek

oderwania wymuszonego na krawędziach o małym promieniu krzywizny, i opisuje ich rozwój w funkcji od azymutu łopat wirnika. Ta część pracy jest wartościowa z poznawczego punktu widzenia. Niestety, nie uniknął tu Autor pewnych błędów interpretacyjnych, co zostanie szerzej potraktowane w rozdziale „Uwagi krytyczne” niniejszej recenzji.

Podobna analiza wyników obliczeń pól prędkości została przeprowadzona dla bezszczelinowej turbiny Bacha. Podstawowa różnica jest taka, że występują tu trzy dające się wyróżnić struktury wirowe, co wynika z braku przepływu międzyłopatkowego, jak w przypadku turbiny Savoniusa. Rozdział powyższy zawiera również wykresy przedstawiające chwilowy (podkr. rec.) współczynnik mocy w funkcji azymutu (czy nie lepiej przedstawić tu przebiegi współczynnika momentu?)

W rozdziale 2.2.4. Doktorant przeprowadza analizę wpływu szczeliny międzyłopatkowej na współczynnik mocy w funkcji wyróżnika szybkobieżności i dochodzi do interesującej konkluzji, że najwyższa sprawność turbin wzrasta w stronę dużych rosnących wartości λ i rosnącej szczeliny międzyłopatkowej. Można tu zauważyć, że dla $\lambda < 0,80$ im mniejsza szczelina tym lepsze osiągi. Dla wartości $\lambda > 0,80$ współczynnik wzrasta wraz z szerokością szczeliny względnej. Na Rys. 2.21. analizuje Autor wpływ szczeliny na chwilowe wartości współczynnika C_P (jeżeli $n = const$ to dlaczego nie lepiej operować współczynnikiem momentu C_M) Rozdział kończy Autor wizualizacjami przepływu wokół wirnika ze szczeliną i bez szczeliny. Na str. 2.22 i 2.23 Z przedstawionych wykresów i wizualizacji wynika, że największy moment obrotowy generowany jest dla kątów dodatnich zbliżonych do ok 0° . Wówczas na łopacie powracającej powstaje na stronie grzbietowej podciśnienie a na łopacie nacierającej zaś nadciśnienie, co przekłada się na dodatni moment obrotowy. Jest więc paradoksem, że, maszyna klasyfikowana jako oporowa wytwarza moment obrotowy głównie dzięki sile nośnej. Rzuca to nowe światło na działanie tego typu urządzeń (uwaga rec.) Autor tłumaczy asymetrię siły nośnej występowaniem efektu Magnusa z czym piszący te słowa się nie zgadza.

Rozdział trzeci poświęcono obliczeniom numerycznym trójwymiarowego przepływu nieustalonego (4D) Celem tego etapu obliczeń numerycznych było znalezienie geometrii turbiny optymalnej z punktu widzenia sprawności, a następnie przebadanie jej na drodze eksperymentalnej. Badania te podzielono na dwie fazy. Najpierw dokonano weryfikacji modelu numerycznego w oparciu o dane literaturowe. W drugiej, na podstawie wcześniejszych symulacji przepływu wokół wybranych konfiguracji turbin Savoniusa przeprowadzono pewien rodzaj optymalizacji cząstkowej, polegającej na określeniu wpływu poszczególnych parametrów geometrycznych

turbiny na krzywą mocy. Funkcją celu był tu współczynnik mocy wirnika. Podobnie jak w symulacjach płaskich, zastosowano podział obszaru obliczeniowego na domenę zewnętrzną nieruchomą, i wewnętrzną obracającą się razem z wirnikiem. Z uwagi na posiadanie przez wirniki płaszczyzny symetrii zastosowano „odbicie lustrzane” w celu zmniejszenia wymiaru zagadnienia obliczeniowego. Wyjątek stanowi przypadek wirnika zwichrzonego, który trzeba było modelować w całości. Zastosowano dwa rodzaje siatek: „rzadką” ok $4 \cdot 10^6$ i „gęstą” $15 \cdot 10^6$ elementów. Podobnie, jak w modelu płaskim zastosowano ujęcie oparte o reynoldsowsko uśrednione równania Naviera i Stokesa, z modelem turbulencji SST. W przypadku siatek „gęstych” zastosowano model przejścia laminarno-turbulentnego γ - θ . Na bocznych powierzchniach domeny zewnętrznej założono warunek brzegowy z poślizgiem, na łopatach warunek adhezji. Brak jest informacji nt. warunku na wylocie z domeny nieruchomej. Dokonując weryfikacji modelu numerycznego w rozdziale 3.2. Autor ponownie powołuje się na jedną z prac Kamojiego z zespołem, której przedmiotem były badania tunelowe turbin: Savoniusa i Bacha. Uzyskane rozwiązania numeryczne zawiązują wartości w stosunku do badań w tunelu aerodynamicznym, przy czym lepsze odwzorowanie krzywej mocy zapewniła siatka gęsta. Wpływ zagęszczenia siatki w obszarze warstwy przyściennej zaznacza się tu silniej niż w przypadku modelu płaskiego. Innym powodem może być również wpływ granic domeny obliczeniowej i interferencji ze ścianami tunelu aerodynamicznego, vide: uwagi krytyczne. Na podstawie obliczeń przepływu trójwymiarowego Doktorant wysnuwa ważny praktycznie wniosek (str. 65-66), że nawet uproszczone, bo nie uwzględniające przejścia laminarno-turbulentnego obliczenia przepływu trójwymiarowego (założenie w przepływie całkowicie turbulentnego), dają lepsze jakościowo wyniki niż bardziej złożone obliczenia przepływu płaskiego na gęstej siatce, z uwzględnieniem modelowania przejścia laminarno-turbulentnego. Dokładność takich obliczeń jest wystarczająca, aby móc przeprowadzić badania parametryczne wpływu różnych wielkości konstrukcyjnych na osiągi turbiny. Rozdział 3.3. poświęca Autor wizualizacji (opis dość zdawkowy) opływu trójwymiarowego wybranych przypadków opływu turbiny Savoniusa i Bacha. Obraz ten jest tu niestety zaciemniony, przez sposób prezentacji linii prądu w systemie ANSYS CFX. Bardziej klarowny obraz przedstawia natomiast wizualizacja śladu za turbiną Savoniusa dla $\lambda=0,8$, Rys. 3.12-3.13. Dla celów porównawczych oba rysunki powinny być wykonane dla tego samego azymutu łopat.

Ślad jak zauważa Autor, wykazuje w obu przypadkach asymetrię. Autor skupia się na własnościach bliskiego śladu, i konstatuje, że brak symetrii wynika odrywania się wirów, głównie z łopaty powracającej. Daleki ślad turbiny tworzy quasiperiodyczną strukturę przypominającą,

jak pisze Doktorant na str. 66 ścieżkę wirową von Kármána. Dzieje się to na skutek koncentracji wirowości w jadrach wirów spływowych. Ten opis wydaje się zbyt powierzchowny (vide: uwagi krytyczne) Daleki ślad jest odchyłony w dół (rysunku), co wynika z asymetrii z podciśnienia na stronie grzbietowej i nadciśnienia na stronie wklęsłej, powodujące powstanie siły bocznej P_y , skierowanej do góry. Rozkład prędkości/ciśnienia na rys. 3.13. przypomina jakościowo rozkład na profilu samostatecznym. Istnienie siły bocznej wyjaśnia odchylenie śladu aerodynamicznego w dół rysunku, na skutek zmiany pędu.

W rozdziale 3.4.1. dokonuje Autor analizy wpływu względnej szerokości szczeliny międzyłopatkowej a/D i wysokości względnej H/D w przypadku przepływu modelowanego w ujęciu 3D najwyższą sprawność uzyskano przy $a/D=0,15$, Rys. 3.16. co jest zgodne z większością danych literaturowych. W przypadku obliczeń 2D uzyskano optymalną wartość $a/D=0$, co jest sprzeczne z większością dostępnych danych doświadczalnych. Wpływ wysokości względnej wskazuje na korzystny wpływ wydłużenia wirnika, a jednocześnie wskazuje na trójwymiarowy charakter przepływu wokół niego. Jednocześnie, na Rys. 3.18. wyraźny jest, wpływ interakcji warstw przyściennych na wirniku i płytach brzegowych na osiagi turbiny, co Autor w pracy zauważa. W rozdz. 3.4.2. przedstawił Doktorant wyniki oceny wpływu szczeliny międzyłopatkowej, wskaźnika kształtu łopaty i kąta rozwarcia na osiagi turbiny Bacha. Autor uzyskał pełną zgodność wartości optymalnego kąta rozwarcia z danymi literaturowymi. Podobna zgodność została uzyskana w przypadku szerokości szczeliny, tj. maksymalizacja osiągow była osiągana dla wirnika bezszczelinowego. Różnica występuje w przypadku współczynnika kształtu turbiny. Wg Autora dysertacji optymalną wartością jest $p/q=0,1$ podczas gdy dane literaturowe podają wartość $0,2$

Przeprowadzona została również analiza wpływu kąta zwiczenia turbiny na jej osiagi. Należy tu podkreślić, że Autor nie znalazł w dostępnej literaturze przedmiotu wyników obliczeń numerycznych dla tego rodzaju wirników. Dane dotyczące wpływu skreńca na osiagi turbiny są dosyć rozbieżne. Na podstawie obliczeń własnych Doktorant wykazał, że najbardziej korzystny kat skreńca to 90° , który zapewnia aż 10% przyrost współczynnika mocy w zakresie szybkobieżności $0,6...1,0$

W rozdziale czwartym przedstawia Autor wyniki eksperymentalnej, pełnoskalowej, weryfikacji konfiguracji turbiny wiatrowej Savoniusa i Bacha. Kształt łopat został dobrany na podstawie symulacji przedstawionych w rozdziale 3. Wyniki badań doświadczalnych pozwoliły na weryfikację wyników obliczeń poprzez ich konfrontację z wynikami zyskanymi w warunkach naturalnych.

Stanowisko zostało zainstalowane na dachu budynku IMP PŁ, w terenie silnie zurbanizowanym. W skład stanowiska wchodziły system do pomiaru prędkości wiatru wykorzystujący dwa 3,5 m maszty i wyposażony w anemometry czasowe LB-747 z wbudowanym kierunkomierzem. Dobór położenia stanowiska został na tyle szczęśliwie dobrany, że jest ono wyeksponowane na przeważające w tym miejscu wiatry zachodnie, gdyż na kierunku południowym S i południe-południowy wschód SSE mamy wysokie przeszkody w postaci Instytutu Papiernictwa i Poligrafii PŁ, Biblioteki, a na kierunku północnym Wydział Fizyki. W kierunku zachodnim dwa wysokie budynki (10 pięter) znajdujące się w odległości 200 m (pierzeja Al. Politechniki). , zatem ich wpływ powinien być odczuwalny, aczkolwiek nie tak silny jak bezpośredniego sąsiedztwa. Widać to na róży wiatrów, rys.4.3.: deficyt prędkości w kierunku zachodnim, i dwa prawie symetryczne maksima prędkości na kierunkach WSW i WNW W rozdziale tym Autor analizuje warunki wiatrowe na stanowisku pomiarowym. W rozdziale 4.2.1. Na podstawie uzyskanych danych wnioskuje, że najlepiej widmową gęstość mocy rozkładów prędkości oddaje rozkład Weibulla, wyznaczany z błędem ok. 6,5% W rozdziale 4.2.3. opisane zostało stanowisko doświadczalne do badania turbin o osi pionowej. Stanowisko umieszczono na ramie stalowej o wysokość ok. 2500 mm. Obciążenie zadawane było poprzez silnik bezszczotkowy prądu stałego (BLDC) pracujący w charakterze hamulca elektromechanicznego. W celu stabilizacji obrotów silnik wpięty w układ sprzężenia zwrotnego. Zastosowanie silnika zamiast np. generatora elektrycznego jest rozwiązaniem jak najbardziej celowym, z uwagi na łatwość sterowania obciążeniem. Pomiar momentu obrotowego odbywał się za pomocą optoelektronicznego przetwornika momentu obrotowego zainstalowanego między wirnikiem turbiny a silnikiem-obciążeniem.

W rozdziale tym Autor przedstawił również schemat algorytmu poszukiwania punktu pracy zespołu turbina-obciążenie. W rozdz. 4.3.1. i 4.3.2. Autor zaprezentował wybrane przykłady z kampanii pomiarowych dla turbin Savoniusa i Bacha.

W rozdziale 4.4. Doktorant porównuje wyniki zebrane w trakcie pomiarów w warunkach rzeczywistych z wynikami modelowania numerycznego. Kształt przebiegu $C_p(\lambda)$ jest poprawie odwzorowany włącznie z położeniami punktu maksymalnej sprawności wirnika. Widać natomiast, że obliczenia CFD zawyżają wartość współczynnika mocy o ok. 18-20%. Doktorant tłumaczy to efektem przesłonięcia tunelu, jaki występuje w domenie obliczeniowej, analogicznie do sytuacji w rzeczywistym tunelu aerodynamicznym (w obu przypadkach obowiązuje zasada zachowania masy) Przesłonięcie domeny obliczeniowej, wynosi 10%. W celu uwzględnienia strat mocy na łożyskach Autor pracy przeprowadził oszacowanie tej mocy w oparciu o ogólnodostępne źródła

literaturowe z zakresu konstrukcji maszyn. W celu oszacowania wpływu blokowania obszaru obliczeniowego przeprowadzona została symulacja dla przesłonięcia 1%. Po uwzględnieniu wpływu oporów łożyskowania oraz zmniejszeniu przesłonięcia domeny obliczeniowej, różnica między wartościami obliczonej nie przekraczała 4%. Zdaniem recenzenta istotny wpływ może mieć niejednorodność rozkładu prędkości wywołana oderwaniem przepływu na krawędzi dachu budynku. Wysoka zgodność wyników obliczeń z pomiarami może świadczyć również o dużej niewrażliwości turbin typu Savoniusa, na jakość napływającego strumienia.

Rozdział piąty stanowi zapis wniosków z przeprowadzonych badań, oraz plany dalszych badań. Autor uznaje też, że uzyskane wyniki w pełni potwierdzają tezę pracy. Wyciągnięte przez Dotkorant wnioski nie budzą zastrzeżeń.

3. Uwagi krytyczne

3.1. Strona merytoryczna pracy

Praca napisana jest na ogół poprawnie od strony merytorycznej i jest wartościowa. O wartości pracy stanowią przede wszystkim rozdziały 2,3,4 w których przedstawiono i opracowano wyniki obliczeń i dane doświadczalne zebrane przez Autora, oraz rozdział 5 w którym przedstawiono wnioski i spostrzeżenia i koncepcje rozwoju badań nad wirnikami typu Savoniusa. Praca mogła by się świetnie obyć bez rozdziału 1 w jego obecnej postaci.

Na str. X pojawia się „ y^+ bezwymiarowa odległość pierwszego węzła siatki od ścianki” Gwoli ścisłości ta wielkość jest bezwymiarową współrzędną mającą nb., charakter liczby Reynoldsa: $y^+ = yu^+/\nu$ gdzie: u^+ tzw prędkość dynamiczna, $u^+ = \sqrt{\tau_0/\rho}$. Dla turbulentnej warstwy przyściennej bez gradientu ciśnienia grubość podwarstwy laminarnej wynosi $y^+=5$ chcąc opisać poprawnie warstwę przyścienną musimy mieć wysokość pierwszej komórki rzędu $y^+\approx 1$ lub mniej.

Na str. 3. tytuł punktu „uskok wiatru-warstwa przyścienna” jest niezupełnie zrozumiały „wind shear” –uskok wiatru „shear layer” czyli warstwa tarciowa, to termin czasem używany w meteorologii dla warstwy przyściennej. Nastąpiło tu pomieszanie pojęć.

Str. 4.”Z uwagi na efekt warstwy przyziemnej prędkość wiatru zmienia się wraz z wysokością w sposób logarytmiczny”. Nie jest to jedyny sposób opisu profilu wiatru w strefie tarciowej. Stosuje się też profil potęgowy, co więcej, na kształt profilu prędkości wiatru wpływ ma również adiabatyyczny rozkład temperatury w warstwie przyziemnej. Profil w

południe lepiej przebiega zgodnie z formułą logarytmiczną, podczas gdy rano i wieczorem są lepiej dostosowane się do prawa potęgowego, vide np. [R.H. Thuillier, U.O. Lappe, "Wind and temperature profile characteristic from observations on a 1400ft tower" *J. of Appl. Met.*, Vol. 3, June 1964 pp.299-306, Q.S. Li, Lunhai Zhi, Fei Hu, *Boundary layer wind structure from observations on a 325 m tower, J. of Wind Eng. and Ind. Aerodyn.*.. Vol. 98 (2010) pp. 818–832]

Str.6. "Turbulencje" nazbyt potoczny tytuł punktu. Opisany wcześniej profil logarytmiczny dotyczy uśrednionego w czasie ruchu turbulentnego. Profil prędkości w warstwie przyziemnej jest zawsze turbulentny. W przypadku przeszkód w rodzaju budynków mamy powinniśmy mówić prędzej o zaburzeniach spowodowanych przeszkodami niż o „turbulencjach”

Rys. 1.6. jest zbyt uproszczony: przy dużych kątach zbcza (kilkanaście stopni) pojawiają się u podnóża przepływy zwrotne, po stronie zawietrznej mamy oderwanie przepływu.

Rozdział 1.6. „Energia zawarta w wietrze” z treści podrozdziału i samej pracy wynika, że dokonujemy konwersji energii kinetycznej wiatru (możliwe są też przypadki, gdy wykorzystujemy energię wewnętrzną jak np. H. Grassmann, et al. „A partially static turbine-first experimental results”, *Renewable Energy* 28 (2003)). Czy nie lepiej, zatem zatytułować ten rozdział po prostu: „Energia kinetyczna wiatru”? Rys. 1.8 jest zbyt uproszczony: Przedstawia schematycznie sytuację, w której turbina...nie ma. Turbina odbierająca energię ze strugi swobodnej powoduje bowiem ekspansję tejże strugi za wirnikiem. Tym większą im większe jest obciążenie kręgu roboczego turbiny. Co więcej, średnica strugi biorącej udział w konwersji energii ze wzrostem obciążenia ulega zwężeniu w przepływie daleko przed turbiną. Wynika to z jednowymiarowego równania ciągłości.

Str. 12 wykładniczy wzór barometryczny (1.27) stosuje się do małych różnic wysokości, lub dla izotermicznych warstw atmosfery w której panuje temperatura T . (vide: PN-78/N-03100 „Atmosfera wzorcowa”) W troposferze (stały ujemny gradient ciśnienia) zależność ta jest potęgowa.

Wzór 1.29. czym jest wielkość H w tym wzorze? Pozostaje się domyślać, że chodzi o wysokość turbiny pionowej zakreślającej pole prostokąta HD , a ramię referencyjne wynosi $D/2$. Wtedy struktura tego wzoru ma sens. Symbol T dla momentu jest mylący („torque?”, „thrust?”). Czy nie lepiej użyć M i C_M ?

Str. 13, wiersze 9...15 Ten akapit jest nie do końca zrozumiały: wirnik turbiny zawsze oddziałuje z przepływem, nawet gdy jest nieruchomy. Możemy co najwyżej mówić o małych lub dużych prędkościach

indukowanych, małych lub dużych zaburzeniach związanych z obciążeniem kręgu roboczego turbiny.

Nie jest dla mnie zrozumiałe co oznacza sformułowanie „(...)struga powietrza może zostać odbita od łopat wirnika, a energia zostanie utracona w wyniku powstających turbulencji i oderwania.”

Str. 15. Wiersz 8: „(...)przekrój łopaty (profil lotniczy) poruszający się ruchem posuwistym o prędkości v .” Czy nie lepiej napisać o ruchu unoszenia? W przypadku turbiny będzie to $v = \Omega r$ Ponadto w przypadku turbiny osiowej (ale również płata nośnego) pojawia się, w trójkącie prędkości składowe prędkości indukowanej. W przypadku wirnika: osiowa (wyhamowanie strugi) i obwodowa (zawirowanie) co wynika z zasady pędu i momentu pędu (np. P. Strzelczyk, *Wybrane zagadnienia aerodynamiki śmigieł*, OW PRz, Rzeszów 2009/2011 str. 83-90).

Strona 32. Wśród metod obliczeniowych warto by było zauważyć metody wirów dyskretnych dających (np. *D. Afungchui, et al., Vortical structures in the wake of the Savonius wind turbine by the discrete vortex method, Ren. Energy. Vol. 69, Sept. 2014 pp.174–179; T. Ogawa, Theoretical Study on the Flow About Savonius Rotor. J. of Fluids Eng. 106(1), pp. 85-91 Mar. 1984*) dające całkiem zadowalające wyniki, niskim kosztem obliczeniowym.

Strona 39: ta sama uwaga co do y^+ ze strony X.

Strona 42: brak jest określenia warunków brzegowych na wylocie z domeny obliczeniowej, ta sama uwaga odnosi się do Rys.3.6. str. 63.

Rys. 2.14...2.17. dobrze byłoby uzupełnić o kontury wirowości.

Na rys. 2.15 i 2.21 opis powinien być uzupełniony o przymiotnik „chwilowy” (współczynnik mocy). Czy nie lepiej byłoby po prostu przedstawić przebieg momentu obrotowego w funkcji azymutu łopaty? („pozycji katowej”)

Strona 42. Stwierdzenie, że: „Tworzenie się warstwy przyściennej na tych ściankach (tj. bocznych ściankach domeny, przyp. Rec.) nie wpływa na pracę wirnika(...)” W tunelach aerodynamicznych z zamkniętą przestrzenią pomiarową narastanie warstwyprzysciennej prowadzi to do pojawienia się poziomego gradientu ciśnienia i w konsekwencji do tzw. „wyporu poziomego”

Str. 47. „W położeniu A obserwuje się przyspieszenie czynnika na wypukłej części łopatki nacierającej(...) z uwagi na pojawienie się efektu Coandy.” Piszącemu niniejsze słowa wydaje się, że zjawisko to przypomina „typowe” przyspieszanie strumienia na stronie ssącej profilu i raczej nie ma związku ze zjawiskiem opisanym przez H. Coandă

Str 64. Porównania obliczeń własnych dla przepływu trójwymiarowego przy przesłonięciu domeny 10% porównuje Autor z wynikami uzyskanego przez zespół Kamoji. W pracy tej wykorzystano jednak tunel aerodynamiczny z otwartą przestrzenią pomiarową 400x400 mm przy wirniku o średnicy 195 mm i o dość znacznym i zmiennym (w zależności od stosunku $H/D=0,6...1,0$) przesłonięciu przestrzeni pomiarowej 14...24%, co w połączeniu z przyblokowaniem śladem, może prowadzić do dużych różnic pomiędzy eksperymentem a obliczeniami. Warunkiem brzegowym w takim przypadku powinno być stałe ciśnienie na granicy strugi, a nie warunek z poślizgiem. To może również tłumaczyć spore rozbieżności między eksperymentem a obliczeniami.

Str. 67. *„Można zauważyć, że przepływ posiada profil delikatnie odgięty ku górze. Shigetomi i in. sugerują że może to być związane z efektem Magnusa który pojawia się z uwagi na obracanie się łopat”*. Efekt Magnusa dotyczy raczej brył obrotowych (walce, kule, elipsoidy obrotowe, etc.) Optym S-kształtnego wirnika jest o wiele bardziej skomplikowany niż dla np. walca. Dla $\lambda < 1$ mamy oderwanie na krawędzi spływu łopaty powracającej: wir który się tam tworzy, Rys. 2.22. i 2.33 oraz 3.12. i 3.13. wytwarza podciśnienie na stronie wypukłej łopaty powracającej, co odpowiada za powstawanie momentu obrotowego (łoaata nacierając działa hamująco). Rozkład ciśnienia sugeruje siłę boczną skierowaną w górę rysunku co zgadza się z kierunkiem odchylenia śladu wirowego w dół (zasada zmiany pędu) rysunku (a nie w górę jak pisze Autor)

Str. 81. Rys. 4..2.: Zwyczajowo na szkicach sytuacyjnych, mapach kierunek północny jest na górze rysunku. Tu jest odwrotnie.

Str. 107. Czytamy: *„(...) potwierdzenie trendów określanych przez wyniki symulacji w warunkach rzeczywistych. Dotychczas badania tego typu były niezwykle rzadkością i zdecydowanie przeważają w tym zakresie badania w tunelach aerodynamicznych, które są niewątpliwie obarczone błędem wynikających ze sztucznego tego tworzenia warunków nieistniejących w rzeczywistości”*. Trudno zgodzić się z takim ujęciem sprawy: eksperyment w tunelu jest prowadzony w warunkach kontrolowanych, w odróżnieniu od prób poligonowych, gdzie wpływ czynnika losowego jest dość znaczny. W tym przypadku bliżej jest eksperymentowi tunelowemu do symulacji numerycznej, owego „wirtualnego tunelu aerodynamicznego” W tunelu jesteśmy w stanie utrzymać intensywność turbulencji poniżej 1% . Podobnie jak w CFD istnieje możliwość kontrolowania profilu prędkości strumienia niezaburzonego. Zwykle dąży się do jego wyrównania, jakkolwiek są badania gdzie symuluje się obecność warstwę przyziemnej, (np.: A. Woźniak, *„Proces konwersji energii kinetycznej wiatru na energię*

elektryczną w zmiennych warunkach atmosferycznych”, Praca doktorska, Rzeszów 2015)

W przypadku eksperymentu polowego pojawia się na zmienność kierunku wiatru, profil prędkości w warstwie przyziemnej czy zaburzenia od przeszkód terenowych (budynki, drzewa, etc.) których nigdy nie jesteśmy w stanie w pełni uwzględnić. Przeprowadzone przez Doktoranta badania i ich porównanie z badaniami numerycznymi sugerują, na znaczną niewrażliwość turbin typu Savoniusa na pionowy profil prędkości, co predestynuje tę układ konstrukcyjny do wykorzystania w terenie zurbanizowanym.

3.2. Układ pracy

Układ pracy nie budzi zastrzeżeń

3.3. Styl pracy

Styl pracy jest dobry, praca napisana jest bardzo dobrą polszczyzną, choć Doktorant nie ustrzegł się niestety błędów stylistyczno-kompozycyjnych, które psują nieco wrażenie ogólne, aczkolwiek nie umniejszają wartości pracy. Razi np. tytuł rozdziału 1 „Wstęp teoretyczny” Rozdział ten w znacznej części charakter przeglądowo-opisowy. Lepszym tytułem byłoby np. „Wprowadzenie” Zdaniem piszącego te słowa można by z większej części tego rozdziału zrezygnować.

Na str. Str.. IX a_i , b_i „stałe w zależności między mocą a prędkością wiatru” sformułowanie to jest nieprecyzyjne, nie wyjaśnia nic. Str. X symbol T używany zamiennie dla temperatury i momentu obrotowego (torque?). Dla momentu mamy literę M. Podobnie, str. X sugerowałbym, użycie jednoznacznego, ogólnie przyjętego, symbolu dla szybkoobrotowości λ zamiast lub TSR (tip-speed ratio).

Str 31. Wiersz 15 od dołu Niezbyt szczęśliwe sformułowanie: „(...) że komputery nie są w stanie rozwiązywać funkcji ciągłych jak te przedstawione w formie różniczkowej.”

Tytuł rozdziału na str. 36. „Analiza numeryczna 2D” czy nie lepiej byłoby napisać „Numeryczna obliczenia przepływu w przybliżeniu płaskim”

Str. 36 i 59. Podobnie sugerowałbym zmienić tytuł podrozdziału „2.1. i 3.1. Definicja symulacji”

Str. 59. Tytuł rozdziału 3: czy nie lepiej byłoby przedstawić w formie np. „Numeryczne obliczenia przepływu trójwymiarowego”

W rozdziale 4. Pożądana byłaby analiza niepewności pomiarowej.

3.4. Literówki

W pracy występują bardzo nieliczne literówki, niewpływające na zrozumiałość wywodu.

4. Podsumowanie

Reasumując, praca przedstawiona przez Pana mgr inż. Konrada Kacprzaka nosi znamiona oryginalności, wnosi istotny wkład w wiedzę na temat turbin typu Savoniusa. Systematycznie przeprowadzone symulacje numeryczne pozwoliły na wyselekcjonowanie najbardziej obiecujących konfiguracji geometrycznych do dalszych badań doświadczalnych. Praca w zwłaszcza w kontekście przeprowadzonych symulacji numerycznych, rzuca nowe światło na obraz mechanizmu fizycznego pracy turbin wiatrowych Savoniusa czy Bacha, klasyfikowanych zwyczajowo jako „maszyny oporowe”. Autor wykazał się również dobrą znajomością metod pomiarowych, zaprojektował stanowisko umożliwiające badanie turbin przy stałej prędkości obrotowej wirnika przy równoczesnym pomiarze parametrów wiatru. Doktorant zaplanował i przeprowadził kampanię pomiarową w warunkach naturalnych. Udało mu się również pozytywnie potwierdzić trendy z symulacji numerycznej w oparciu o wyniki badań warunkach rzeczywistych. Jest to niewątpliwie osiągnięcie o dużych walorach praktycznych.

Wnioski i spostrzeżenia prezentowane pod koniec pracy są na ogół poprawne. Pewne niedociągnięcia w tekście pracy, jak i niestety, pojawiające się błędny stylistyczne w niczym nie umniejszają jej wartości. Pracę postrzegam za bardzo wartościową zarówno z punktu widzenia poznawczego jak i użytecznego.

5. Stanowisko końcowe

Uważam, że przedstawiona do recenzji praca Pana mgr inż. Konrada Kacprzaka pt. „*Numeryczna i eksperymentalna analiz przepływu przez turbiny wiatrowe Savoniusa*” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę „*Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*” z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z p. zm.) i proponuję dopuszczenie dysertacji do publicznej obrony. Jednocześnie oczekuję pisemnej odpowiedzi Autora na przedstawione w treści recenzji wątpliwości.

Droty Stachurski
15 lipca 2016