

Dr hab. inż. Janusz Piechna  
prof. nzw. Politechniki Warszawskiej

## **Recenzja**

pracy doktorskiej mgr inż. Macieja Majchera pt. "Numeryczna analiza trójwymiarowych przepływów w kluczowych elementach wentylatorów osiowych"

### **1. Zawartość rozprawy**

Praca liczy 275 stron. Zasadnicza część pracy zawarta jest w 6-ciu rozdziałach. Część ta poprzedzona jest wstępem i zakończona podsumowaniem. Spis literatury zawiera 75 pozycji, w tym 3 publikacje, których Doktorant jest współ-autorem i 5-ciu sprawozdań których jest autorem.

Rozdział 1, o tytule- Wprowadzenie, zawiera wstęp, przegląd metod analizy przepływów w wieńcach łopatkowych wentylatorów osiowych, aktualny stan wiedzy o zagadnieniach związanych z projektowaniem wentylatorów osiowych. We rozdziale tym Doktorant określił cel swoich działań. Sformułował tezę pracy i cel pracy.

Treść zawarta w rozdziale 2 stanowi podstawy teoretyczne dla analitycznej optymalizacji i projektowania zasadniczych elementów wentylatora osiowego.

W rozdziale 3 Doktorant przedstawia informacje o stanowisku doświadczalnym jakie zostało użyte do badań wentylatorów osiowych. Prezentuje ogólną charakterystykę stanowiska i dokładnie przedstawia metodykę wyznaczania na nim charakterystyk wentylatorów osiowych.

W rozdziale 4-tym przedstawione zostały przykłady numerycznych symulacji trójwymiarowych przepływów w kluczowych elementach wentylatorów osiowych. Omówiona tu została budowa modeli do badań na podstawie projektu gazodynamicznego.

Rozdział 5-ty poświęcony jest porównaniom wyników symulacji numerycznych z wynikami badań doświadczalnych.

Rozdział 6-ty zawiera podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań, podsumowanie oryginalnych osiągnięć w pracy.

### **2. Zasadność podjęcia tematu**

Jako cel pracy Doktorant określa opracowanie metodyki badań przepływów w kluczowych elementach konstrukcyjnych wentylatorów osiowych pozwalającej na analizę skutków niepoprawnych kształtów takich elementów powodujących niską sprawność całej konstrukcji.

Sformułowana teza pracy ma następującą postać: "Numeryczna analiza pól przepływu czynnika roboczego w kluczowych elementach wentylatorów osiowych pozwala na skuteczną eliminację obszarów niewłaściwych struktur przepływu wpływających na sprawność wentylatorów"

Tak określony cel pracy jest z jednej strony wąski, bo obejmuje jeden typ konstrukcji - wentylatory osiowe, a z drugiej szeroki, bo może występować wiele różnorodnych obszarów niewłaściwych struktur przepływu wywołanych różnymi przyczynami.

Należy uznać podjęcie takiego tematu badań za w pełni uzasadnione, a nakreślony cel pracy i hipotezę za sformułowane poprawnie.

### **3. Ocena sposobu i stopnia rozwiązania problemu.**

Doktorant do rozwiązania postawionego problemu wybrał zestaw trzech narzędzi dostarczających nieco innych informacji o analizowanym problemie. Są to analizy teoretyczne, badania doświadczalne i modelowanie numeryczne. Swoje działania zawarł w trzech grupach aktywności:

Analizy teoretyczne oparte na podstawowych prawach fizyki, z modelami eksperymentalnymi pewnych lokalnych struktur przepływu, trudnych lub niemożliwych do ujęcia analitycznego.

Badania doświadczalne dostarczające danych całościowych o przepływie przez wentylator.

Badania numeryczne pozwalające na uzyskiwanie szczegółowych informacji niedostępnych innymi metodami.

Doktorant w sposób właściwy wykorzystał mocne strony każdego z tych narzędzi. Metodami analizy teoretycznej zbudował optymalny schemat wentylatora i określił jego podstawowe cechy geometryczne na podstawie ogólnych zależności opisujących fizyczne podstawy jego działania. Wykorzystał istniejące eksperymentalne zależności korygując rozwiązanie o trudne lub niemożliwe do uzyskania inną drogą dodatkowe zjawiska występujące podczas pracy wentylatora.

Metodami eksperymentalnymi próbował weryfikować wyniki analiz teoretycznych. Metodami obliczeń numerycznych poszukiwał wyjaśnień przyczyn rozbieżności pomiędzy modelem teoretycznym a wynikami pomiarów.

Analizując wyniki przedstawione w pracy wydaje się, iż Doktorant jest w posiadaniu informacji pozwalających choć częściowo opracować charakterystyki profili łopatek w układzie profilowym.

Recenzent sugeruje rozważenie przygotowania przez Doktoranta publikacji o tej tematyce.

Przyjęty przez Doktoranta sposób rozwiązania problemu wymagał szerokiej wiedzy, ogromu pracy i doświadczenia i umiejętności w bardzo różnych dziedzinach.

### **4. Uwagi merytoryczne**

Praca jest trudna w analizie.

Praca zawiera dużo materiału, ale bardzo rozproszonego. Większość oczekiwanych przez czytelnika informacji istnieje, ale czasem potrzebny jest wysiłek celem ich odszukania. Trzeba się cofać o wiele kartek wstecz by dotrzeć do poszukiwanej informacji.

Doktorant ma tendencję do pokazywania zjawisk lokalnych w sposób globalny. Bardzo utrudnia to interpretację tak przedstawionych wyników.

Praca zawiera wiele wartościowego materiału, ale w pracy nie wykorzystano całego potencjału badawczego jakim Doktorant dysponował.

Zdaniem recenzenta (subiektywnym) wizualizacje parametrów przepływu pokazane przez Doktoranta są trudne do analizy i interpretacji.

Praktycznie wszystkie wizualizacje przepływu są trudno czytelne jeśli chodzi o szczegóły przepływu, wieloznaczne i nie wnoszą wiele do wiedzy o strukturze przepływu. Wnioski Doktoranta są poprawne, ale wydaje się, iż uzyskane nie tylko na podstawie prezentowanych wizualizacji.

Wizualizacje 3D ładnie wyglądają, ale trudno z nich wyczytać wartości liczbowe. Zdaniem recenzenta należało wykorzystać znacznie mniej widowiskowe wizualizacje typu plot\_xy umożliwiające liczbową interpretację rozkładów ciśnienia na profilach, rozkładów naprężeń stycznych dla identyfikacji obszarów oderwania, itd.

Wydaje się iż powtórzenie pewnych informacji w opisach rysunków ułatwiłoby ich interpretację.

Modele teoretyczne - charakterystyki.

W części analitycznej pracy wydaje się iż użyteczne byłyby wykresy wpływu zmian optymalizowanych parametrów. Czytelnik mógłby ocenić czy ich wpływ jest silny czy słaby. Na przykład, jak bardzo zmieniają się wartości sprawności dla analizowanych prędkości obrotowych?

Zrozumiałe jest, iż Doktorant wybrał właściwie optymalne parametry, ale czytelnik chciałby mieć własną opinię.

Pomimo przedstawienia dużego zestawu informacji o sposobie wyboru modelu płynu, modelu turbulencji, warunków brzegowych, zaprezentowany opis konkretnego modelu płynu, konkretnych warunków brzegowych, poziomu turbulencji, skali przestrzennej turbulencji, modelu turbulencji jest enigmatyczny.

Problem wpływu ilości elementów siatki dla warstwy przyściennej. Jest informacja o ilości warstw (stale 5). Brak informacji jak warstwy są rozłożone, jaki był współczynnik przyrostu grubości kolejnych warstw, jaka jest wielkość pierwszej komórki, jaką wartość ma parametr  $y^+$ ? Całkowita liczba elementów o niczym nie informuje. Istotna jest ilość warstw i ich struktura, współczynnik przyrostu i wysokość pierwszej komórki. Nie wiadomo jak siatka była modyfikowana. Liczba komórek różna, a ciągle jest 5 warstw.

Problem wpływu globalnej ilości elementów.  
Nie wiadomo jak siatka była modyfikowana. Gdzie gęstość siatki rosła?

W obu problemach porównywane są wyniki obliczeń z wynikami eksperymentu. Te same geometrie ze szczeliną wierzchołkową identyczną jak w eksperymencie. Przy porównaniu z danymi eksperymentalnymi zmiana wydatku tylko o 10%. Co odpowiada zmianie kąta natarcia o nieco ponad 2 stopnie. Niewiele, i nie wiadomo dla jakiego kąta natarcia.

Rozproszone są informacje o uzyskanych parametrach przepływu dla kilku kątów ustawień łopatek.

Odczuwa się brak jednego wykresu ilustrującego wpływ kąta ustawienia łopatek (30, 35, 45 stopni).

W pewnym momencie Doktorant podejmuje rozważania o optymalnym stosunku współczynnika siły nośnej i oporu w oparciu o model palisady prostoliniowej. Numerycznie kosztowne. OK. Ale dlaczego nie pokazać tych wartości dla wyników obliczeń Doktoranta?

## 5. Uwagi szczegółowe

Rozdz. 2 Model analityczny, Rys. 2.1 str. 84.

Dla profili współrzędne podaje się sposób bezwymiarowy. Przelicza się dalej na konkretne realizacje.

Jest tylko jeden wykres charakterystyk aerodynamicznych profili łopat. (rys. 1.8) pochodzący z obcego źródła.

W pracy znajdują się tylko trzy rysunki (rys. 1.4 i rys. 1.6 i 1.7) z trójkątami prędkości. Przy stałej prędkości obrotowej wirnika wentylatora i zmiennym w dość szerokim zakresie wydatku, czytelnik nie wie w jakim zakresie kątów natarcia pracują łopaty wentylatora.

Rozdział 4. Doktorant przedstawia trzy profile:

GA(W)-1

NACA 65-810

Multiwing

Brak szczegółowych informacji o ich kształcie. Są tylko zdjęcia.

Doktorant ocenia, iż dokładność wyników obliczeń spada ze wzrostem dławienia. Co oznacza, iż wyniki tracą dokładność ze wzrostem kąta natarcia. Brak informacji jakie są te kąty natarcia.

Jak daleko jest od potencjalnego oderwania przepływu.

Wpływ szczeliny.

Zagadnienie dość złożone.

Rozważane są dwie geometrie wentylatorów zasadniczo różniące się parametrami.

W jednym przypadku maksymalna szczelina to 5mm w drugim to 3.5mm. Dlaczego?

Żeby sprawdzić stosunek wielkości szczeliny do długości łopaty należy się cofnąć do strony 87 i odczytać średnice wirnika (710, 355mm) czyli 177.5mm, czyli max o 2.8% (5mm).

W kolejnym przypadku należy się cofnąć do strony 103 i odczytać średnice wirnika (700, 462mm) czyli 119 czyli max o 2.9% (3.5mm).

Zatem należy domniemywać, iż Doktorant chciał porównać wpływ szczelin o tej samej względnej wysokości. Ale powyższe poszukiwania danych i przeliczenia powinien zrobić Doktorant.

Zestawienie wentylatorów o przyrostach ciśnienia 400 Pa i 3300 Pa.

Przyrosty ciśnienia różnią się ponad 8 razy.

Zatem przecieki powietrza przez szczelinę o takiej samej wysokości, w wartościach bezwzględnych, będą 2.8 razy większe. Czyli względnie mniejsze.

Doktorant nie podjął tematu względnie niższych wartości wydatków przez takie same szczeliny.

Płyty krawędziowe rozszerzenie obszaru statecznej pracy. OK.

Wpływ grubości krawędzi spływu.

Dlaczego powiększono grubość krawędzi spływu po tronie wypukłej profilu a nie wklęsłej? Pytanie to wiąże się ze stosowaną w różnych innych rozwiązaniach płytką Gurney'a lokowaną na ciśnieniowej stronie krawędzi spływu istotnie zwiększającą siłę nośną kosztem wzrostu oporu aerodynamicznego.

Niestety obrazy przedstawione na rys. 4.74 -4.77 są nieczytelne. Maksymalna prędkość ma kolor czerwony czy żółty?

Z tego co można wywnioskować z rys.4.74 to to, iż występuje pogrubienie warstwy przyściennej.

Widoczny jest obszar oderwania.

Podobne problemy interpretacyjne można zauważyć na rys. 4.78-4.81 i rys. 4.85 i 4.87.

Rozdział 5.3. Porównania - numeryka a analityka bez szczeliny wierzchołkowej.

Rys. 5.29 i 5.30. Skala wykresów (cały wirnik) nie pozwala na ich pełną interpretację.

Ich interpretacja przez Doktoranta jest poprawna (str. 254).

Wykresy rozkładów ciśnienia w trzech przekrojach pojedynczej łopaty, na różnych promieniach, byłaby jednoznacznym dowodem.

Rysunki zawierają całkowicie niespójną wizualizację rozkładów prędkości.

Na tym samym rysunku, w identycznych obszarach pomiędzy łopatkami wirnika, kolory reprezentujące te same prędkości są inne. Które są poprawne?

W tak dużej pracy zawsze można znaleźć elementy kontrowersyjne. Pracę jako całość oceniam bardzo wysoko, uważam że przedstawione wyżej uwagi krytyczne nie umniejszają jej oceny. Są tylko sugestią dla Doktoranta by zwracał baczniejszą uwagę na fizyczne aspekty swoich działań i przedstawiał argumenty dla obrony swoich tez i wniosków udokumentowane liczbami, a nie kolorami.

## 6. Wartość i znaczenie rozprawy

Doktorant podjął się rozwiązania z jednej strony prostego a jednak w szczegółach bardzo złożonego zagadnienia.

Główną wartością pracy jest pokazanie i możliwości, i konieczności powiązania trzech aspektów procesu projektowania efektywnego urządzenia przepływowego. Użycie modelu analitycznego z poprawkami empirycznymi do optymalizacji podstawowych parametrów geometrycznych konstrukcji, budowa prototypu i jego badań eksperymentalnych celem wykrycia jego niedoskonałości i poszukiwanie ich przyczyn poprzez modelowanie numeryczne.

Analiza analityczna jest szybka, umożliwia przebadanie wielu wariantów, lecz może nie uwzględniać wszystkich zjawisk fizycznych towarzyszących przepływowi płynu przez analizowane urządzenie.

Badania doświadczalne dostarczają głównie informacji o integralnych parametrach działania urządzenia. Są i czasochłonne i kosztowne a uzyskiwanie informacji o szczegółach przepływu zwykle jest utrudnione i tylko cząstkowe.

Badania numeryczne są w pewnym sensie podobne do badań eksperymentalnych, gdyż wymagają budowy modelu geometrycznego, zwykle są dość czasochłonne i kosztowne, ale umożliwiają uzyskiwanie znacznie większej ilości informacji szczegółowych, niedostępnych do uzyskania innymi metodami.

Doktorant zręcznie powiązał te aspekty projektowania w jeden algorytm pokazując jego skuteczność w rozwiązaniu praktycznego problemu. Uzyskał znaczące podniesienie sprawności finalnej wersji wentylatora w warunkach jego użytkowania, w otoczeniu zawierającym więcej elementów zakłócających jego pracę, jak obecność pyłu, wilgoci.

Oprócz aspektów praktycznych swojej działalności uzyskał także wiele informacji mających znaczenie czysto naukowe.

Interesujące są udane wizualizacje struktury przepływu w okolicy szczelin pomiędzy końcami łopat i obudową.

Interesujący, choć nie całkowicie wykorzystany, jest zestaw informacji o wpływie ustawienia łopat wentylatora pracującego ze stałą prędkością obrotową

Interesująca jest zależność sprawności wentylatora od grubości profilu łopat szczególnie dla wersji generującej duży spręż.

Cienkie łopatki kierownic wydawałyby się niesprawne przy zmianach kierunku napływu na nie. Wyniki uzyskane przez Doktoranta sugerują, iż ze względu na dużą składową obwodową prędkości w stosunku do osiowej, zmiany kąta natarcia są małe i rozwiązanie takie jest skuteczne.

## **7. Uwagi redakcyjne**

Praca jest bardzo obszerna. Istotne informacje poszukiwane przez czytelnika istnieją ale są rozproszone.

Także wnioski i konkluzje są w pracy bardzo rozproszone.

Co to jest "skończą liczbę dyfuzji numerycznej"?

Błędy literowe strony: 9, 66, 145, 198, 214.

Błędne oznaczenia na rys. 4.114 i 4.115.

## **8. Ocena doktoranta**

Przedstawione wcześniej krytyczne uwagi recenzenta wynikają raczej z jego własnych doświadczeń i spowodowanego tym innego sposobu patrzenia na analizowane problemy.

Doktorant konsekwentnie korzystał ze sposobu jaki mu odpowiadał i jaki wybrał. Recenzent całkowicie zgadza się z większością wniosków Doktoranta, tyle że dowodzenie ich poprawności przeprowadziłby inaczej. Uwagi te nie umniejszają osiągnięć i nie negują żadnych wyników pracy Doktoranta.

Tematyka podjęta przez Doktoranta jest wystarczająco szeroka by objąć i połączyć klasyczne metody analityczne z najnowszymi osiągnięciami metod numerycznych i metodami eksperymentalnymi.

W pracy widoczna jest chęć zachowania równowagi pomiędzy tymi metodami, tak by wykorzystać ich mocne strony i zneutralizować słabe tworząc spójny obraz całego zagadnienia.

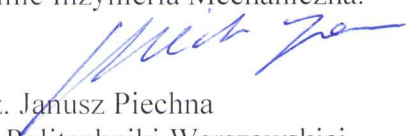
Doktorant wykazał się umiejętnością skutecznej analizy i optymalizacji metodami analitycznymi, umiejętności zbudowania i oprzyrządowania stanowiska do eksperymentów i ich wykonania, złożoną wiedzą na temat metod numerycznych, modelowania turbulencji, budowania siatek obliczeniowych i prezentowania wyników obliczeń.

Doktorant jest współ-autorem 3 publikacji i autorem 5-ciu sprawozdań.

## 9. Konkluzja

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Majchera pt. "Numeryczna analiza trójwymiarowych przepływów w kluczowych elementach w kluczowych elementach wentylatorów osiowych" stanowi oryginalne i samodzielne rozwiązanie złożonego problemu naukowego oraz świadczy o szerokim zakresie wiedzy Doktoranta w tym zakresie. Tym samym spełnia ona wymagania jakie formułuje w stosunku do prac doktorskich Ustawa z dnia 14.03.2003r. "O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki" (Dz.U. 65/2003 z późn. zm.)

Stawiam wniosek o dopuszczenie pracy do publicznej obrony celem nadania jej autorowi - mgr inż. Maciejowi Majcherowi - stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.



dr hab. inż. Janusz Piechna  
prof. nzw. Politechniki Warszawskiej