

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Wasyla Sokolenko pt. „Analysis of the impact of acoustic excitation on the loss of flow stability in the boundary layer”, w postępowaniu doktorskim wszczętym w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna**

Podstawą do wykonania recenzji jest Uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej nr 43/2022/2023 z dnia 11 lipca 2023 roku, na podstawie której zostałem powołany na recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia doktora Panu mgr. Wasylowi Sokolenko.

Stronę edytorską niniejszej recenzji, na prośbę zleceniodawcy, przygotowano zgodnie z wymaganiami o zapewnieniu dostępności osobom ze szczególnymi potrzebami dostosowania (Dz.U 2019 poz. 1696).

### **1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska Pana mgr. Wasyla Sokolenko składa się z 8 rozdziałów, jednego załącznika w postaci rozdziału 9, listy rysunków i tabel oraz bibliografii, w sumie nieco ponad 120 stron tekstu. Dysertacja przygotowana została w języku angielskim. Układ rozprawy jest logiczny, treść, rysunki oraz tabele są czytelne.

Dysertacja rozpoczyna się ona od spisu oznaczeń, symboli i skrótów, następnie jest krótkie wprowadzenie do podjętego problemu badawczego, którym jest badanie wpływu jednorodnego pola akustycznego na niestabilności przepływu w obszarze laminarnej warstwy przyściennej. Badania prowadzone były w ramach grantu finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki. Kolejny, 2 rozdział zawiera kilkustronicowy przegląd literatury w

temacie rozprawy doktorskiej, który dobrze wprowadza do tematyki podjętych badań i pokazuje ich ważną rolę. Rozdział 3 przedstawia cel i zakres pracy. Dalej, w 4 rozdziale opisano stanowisko eksperymentalne, kanał testowy oraz metodykę badań, tj. użytą aparaturę i metodę prowadzenia pomiarów. W rozdziale 5 opisano sposób realizacji, użytą aparaturę oraz parametry wymuszeń akustycznych użytych do badań w przygotowanym kanale testowym. Rozdział 6 zawiera opis i analizy wyników badań dla oderwania warstwy przyściennej zachodzącego w sposób naturalny, samoistny, bez udziału wymuszeń akustycznych. Rozdział ten składa się prawie z dwudziestu stron i nie został, wzorem rozdziałów poprzednich, podzielony na podrozdziały, a moim zdaniem powinien. Rozdział 7 jest głównym rozdziałem pracy i dotyczy badań nad oceną wpływu wymuszeń akustycznych jednorodnym polem akustycznym na charakterystykę laminarnej warstwy przyściennej. Wnioski z przeprowadzonych badań przedstawiono w rozdziale 8. Rozdział 9 zawiera dodatek, w którym Doktorant przedstawił sposób, wraz z fragmentami kodu w języku Python, w jaki określał niezbędne do analizy wyników badań wielkości na podstawie danych pomiarowych, głównie chodzi tu m.in. o współczynnik intermitencji. Ten rozdział mógłby stanowić część rozdziału czwartego, np. jako ostatni podrozdział. Spis literatury zawiera ponad 100 pozycji ułożonych w porządku alfabetycznym.

Praca doktorska Pana mgr. Vasyla Sokolenko dotyczy badań eksperymentalnych z zakresu Eksperymentalnej Mechaniki Płynów, dostarcza nowych, wartościowych wyników pomiarów oderwania w warstwie przyściennej w przepływie nieściśliwym i izotermicznym powietrza, w warunkach interakcji z falami akustycznymi. Oddziaływanie pola akustycznego na warunki przepływowe jest wszechobecne w maszynach przepływowych oraz w przepływach zewnętrznych, między innymi przy opływie płata statku powietrznego (skrzydła, śmigła itd.). Dlatego tematyka podjętych przez Doktoranta badań jest aktualna i ważna. Przedstawione w pracy wyniki pomiarów wraz z ich analizą oraz zastosowane techniki pomiarowe są cenne dla badaczy zajmujących się badaniami eksperymentalnymi, numerycznymi i analitycznymi w obszarze Mechaniki Płynów i Aeroakustyki.

## **2. Ocena rozprawy doktorskiej**

Głównym celem recenzowanej rozprawy doktorskiej była eksperymentalna ocena wpływu fal akustycznych generowanych przez źródła zewnętrzne na warunki powstawania laminarnego

pęcherza oderwaniowego, będącego mechanizmem powstania przejścia laminarno-turbulentnego w warstwie przyściennej. W badaniach starano się odzwierciedlić warunki odpowiadające w przybliżeniu przepływowi w kanałach maszyn wirnikowych przy szerokopasmowym szumie różowym oraz monochromatycznym polu akustycznym dla poziomu ciśnienia akustycznego 125 i 135dB oraz liczby Reynoldsa 185k i 370k. W kanale testowym starano się odzwierciedlić rozkład ciśnienia statycznego na ścianie odpowiadający rozkładowi na powierzchni ssącej łopatki wirnika sprężarki lub wentylatora osiowego.

Dodatkowo Doktorant postanowił odpowiedzieć na 4 pytania, a mianowicie:

- Jaki jest wpływ liczby Reynoldsa na zjawisko oderwania warstwy przyściennej?
- Jak wzbudzenie akustyczne wpływa na poszczególne etapy oderwania?
- Jakie znaczenie ma częstotliwość i amplituda fal akustycznych w oddziaływaniu na proces oderwania?
- Jakie fizyczne zjawiska są odpowiedzialne za efekty turbulentne w obszarze laminarnego pęcherza oderwaniowego oraz jak akustyczne wzbudzenie może je modyfikować?

Doktorant udzielił wyczerpujących odpowiedzi na te pytania w poszczególnych rozdziałach pracy, a syntetycznie podsumował odpowiedzi we wnioskach, na końcu pracy doktorskiej. O ile pierwsze pytanie było dość oczywiste, o tyle pozostałe pytanie dotyczyły ściśle głównego problemu badawczego poruszanego w pracy.

W celu osiągnięcia swoich celów badawczych Doktorant przeprowadził szereg badań eksperymentalnych w tunelu aerodynamicznym o konfiguracji otwartej zlokalizowanym w Katedrze Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej. Tunel ten zapewniał stabilne i wyrównane parametry przepływowe na wlocie do kanału testowego o niskiej wartości poziomu turbulencji. Badania prowadzone były w ramach projektu badawczego finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki realizowanego na Politechnice Częstochowskiej we współpracy z Politechniką Warszawską, która odpowiedzialna była za część numeryczną. Badania przeprowadzone były w specjalnie zaprojektowanej komorze testowej oraz przy użyciu techniki pomiarowej bazującej na termoanemometrach stałotemperaturowych, która używana i doskonalona jest od lat w Katedrze Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej.

Należy docenić wkład Doktoranta w:

- przygotowanie kanału testowego,

- pomiary prędkości przy pomocy termoanemometrii stałotemperaturowej użyte do oceny charakterystyki warstwy przyściennej.
- zaprojektowanie i wykonanie układu generatora akustycznego, dobór elementów oraz przygotowanie oprogramowania.

Za najbardziej wartościowe rezultaty badań przedstawionych w dysertacji, które kwalifikują pracę do wyróżnienia uznałbym:

- wykazanie istotnego wpływu oddziaływania pola akustycznego na charakterystykę przepływu w obszarze warstwy przyściennej,
- identyfikację częstotliwości przejścia laminarno-turbulentnego na podstawie analizy widmowej gęstości mocy dla różnych warunków przepływowych,
- opracowanie algorytmu określania współczynnika intermitencji, opisującego stopień przejścia przepływu laminarnego w turbulentny.

### 3. Uwagi i komentarze

Praca doktorska została przygotowana dość starannie od strony edytorskiej. Rysunki mogłyby być nieco lepszej jakości. Ilość niedociągnięć edytorskich jest nieduża i nie wpływają one na czytelny odbiór przekazywanych treści przez Doktoranta. Idąc od początku pracy, w skrótach brakuje opisu *LSB*, a *SPL* bardziej nadaje się do nomenklatury niż do skrótów, jeśli *Tu* jest w procentach to we wzorze brakuje „razy 100%”. Rozdział 2 należałoby podzielić na podrozdział, tj. 2.1, 2.2 itd., tak jak to zrobiono w kolejnych rozdziałach. To samo dotyczy rozdziału 6. W rozdziale 4 rysunki 4.6, 4.7 i sporo innych oraz szereg rysunków w innych rozdziałach wymagałyby bardziej rozbudowanego opisu. Często zrozumienie sensu rysunku wymaga powrotu do lektury tekstu. Skoro rysunki są numerowane zgodnie z kolejnościami rozdziałów to wzory należałoby potraktować w podobny sposób.

Po lekturze dysertacji nasuwa się kilka uwag i komentarzy, które są konieczne dla lepszego zrozumienia i docenienia ogromnego wysiłku Doktoranta. Najważniejsze z nich to:

- Szkoda, że schemat sekcji testowej oraz systemu pomiarowego (rys.4.2) nie został skonfrontowany ze zdjęciem rzeczywistego układu. O ile dobrze zrozumiałem, do pomiaru prędkości w warstwie przyściennej został użyta jedna sonda termoanemometryczna? W jakim odstępie czasowym były dokonywane pomiary w

poszczególnych punktach (tab.4.1) i czy uwzględniono niestabilność położenia pęcherza oderawniowego w trakcie dokonywania pomiaru.

- Jak było mierzone i uśredniane ciśnienie całkowite na wlocie?
- Jakie metody statystyczne zostały użyte do obróbki danych pomiarowych?
- Dlaczego nie zdecydowano się na pomiar ciśnienia statycznego na dolnej ścianie kanału testowego wzdłuż współrzędnej x? Czy równoczesny pomiar ciśnienia w kilkunastu punktach wzdłuż warstwy przyściennej mogłyby wnieść ilościową informację na temat przejścia laminarno-turbulentnego?
- Czy próbowano ocenić na podstawie pomiarów fluktuacji prędkości w warstwie przyściennej poziom dźwięku (*acoustic particle velocity level*) generowanego przez laminarny pęcherz oderwaniowy (np. rys. 6.2)
- W maszynach przepływowych, wirnikowych, najistotniejszy jest hałas tonalny dla częstotliwości (i harmonicznym) wynikającej z prędkości obrotowej wirnika i liczby łopatek (tzw. Blade Passage Frequency - BPF). Czy można się spodziewać, że będzie on miał wpływ na charakterystykę warstwy przyściennej na powierzchniach łopatek oraz czy jest rekomendowane w obliczeniach CFD w kanałach międzyłopatkowych maszyn wirnikowych uwzględnianie wpływu fal akustycznych BPF?
- Czy należałoby się spodziewać mniejszego efektu oddziaływania fal akustycznych z niestabilnością Kelvina-Helmholtza w przypadku przepływów z większymi prędkościami?
- Czy rozważano użycie rezonatorów Helmholtza jako wymuszeń akustycznych w tego typu przepływach?
- W przypadku przepływów ściśliwych, a takie są zazwyczaj w sprężarkach osiowych, spośród liczb podobieństwa oprócz liczby Reynoldsa istotna jest też liczba Macha, którą w przedstawionych badaniach nie brano pod uwagę z wiadomych względów. Wartość liczby Macha w kanałach maszyn wirnikowych, czy wokół skrzydła samolotu są znacznie większe niż w przypadku prezentowanych badań, gdzie przepływ można traktować jako nieściśliwy i izotermiczny. Czy w związku z tym analogie do kanałów maszyn wirnikowych i płatów statków powietrznych są w pracy trafne, a wnioski wspólne? Czy raczej należy traktować wyniki przeprowadzonych badań raczej tylko jako benchmarkowe testy dla walidacji metod i modeli CFD?

#### **4.Wnioski końcowe**

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. Vasyla Sokolenko pt. „Analysis of the impact of acoustic excitation on the loss of flow stability in the boundary layer” spełnia warunki określone w art. 190 pkt 2 oraz art.183 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1688)*. Tym samym wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej o dopuszczenie pracy doktorskiej Pana mgr. Vasyla Sokolenko do publicznej obrony.

Ponadto, biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy przeprowadzonych badań, użycie zaawansowanych technik pomiarowych oraz wartościowe rezultaty, o których mowa była wcześniej, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr. Vasyla Sokolenko.