

Dr hab. inż. Paweł Flaszynski, prof. IMP PAN  
Zakład Aerodynamiki  
Instytut Maszyn Przepływowych  
im. Roberta Szewalskiego  
Polskiej Akademii Nauk  
Tel: 58 6995 268  
E-mail:pflaszyn@imp.gda.pl

Gdańsk, 2023-12-01

## **Recenzja pracy doktorskiej**

**mgra inż. Vasyla Sokolenki**

pt.: „ Analiza wpływu oddziaływania akustycznego na utratę stabilności  
przepływu w warstwie przyściennej”

„Analysis of the impact of acoustic excitation on the loss of flow stability in the  
boundary layer”

Recenzja pracy doktorskiej została przygotowana na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej oraz pisma, nr WIMiI-BOD-510-6/21 z dnia 16.08.2023, przesłanego przez Panią prof. dr hab. inż. Małgorzatę Klimek, Dziekan Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki.

### **1. Wstęp**

Praca doktorska Pana mgra inż. Vasyla Sokolenki została napisana w języku angielskim, a promotorem pracy jest Pan prof. dr hab. inż. Witold Elsner. Zagadnienie analizowane w pracy dotyczy rozwoju warstwy przyściennej, a w szczególności przejścia laminarno-turbulentnego, oderwania laminarnej warstwy przyściennej oraz wpływie oddziaływania akustycznego na rozpiętość obszaru oderwania. Rozwój warstwy laminarnej oraz strefy, w której ona traci stabilność a na następnie przechodzi w stan w pełni rozwiniętej warstwy turbulentnej jest zagadnieniem badanym od wielu lat. Celem prowadzonych prac jest zrozumienie nie tylko ewolucji warstwy przyściennej, ale także możliwość zastosowania metod sterowania przepływem, aby skutecznie oddziaływać na rozwijające się struktury i zapobiegać oderwaniu warstwy przyściennej lub przynajmniej je zredukować. Wraz z rozwojem metod pomiarowych i obliczeniowych istnieją coraz większe możliwości analizy szczegółów rozwijających się

struktur wirowych w warstwie i jej otoczeniu. Zagadnienie rozwoju laminarnej warstwy przyściennej, jej oderwania i indukowanego przejścia laminarno-turbulentnego jest bardzo ważnym zagadnieniem nie tylko poznawczym, ale także o dużym znaczeniu technicznym. Problem ten dotyczy np. opływu łopat turbin wiatrowych, skrzydeł samolotów, gdzie rozwijane są technologie tzw. laminaryzacji przepływu, czy układów łopatkowych maszyn wirnikowych. Należy tu wspomnieć łopatki sprężarki/wentylatora, gdzie przejście laminarno-turbulentne może wystąpić w sposób naturalny w obszarze poddźwiękowym, naddźwiękowym lub być indukowane oddziaływaniem fali uderzeniowej z warstwą przyścienną. Przejście laminarno-turbulentne jest także badanym zjawiskiem na łopatkach turbin wysokiego ciśnienia charakteryzujących się dużą ilością otworów chłodzących, gdzie pomimo wydmuchu czynnika chłodzącego, ale na skutek silnej ekspansji dochodzi do relaminaryzacji warstwy przyściennej i powtórnego przejścia laminarno-turbulentnego. Położenie przejścia ma istotny wpływ na formujące się oderwanie warstwy przyściennej lub oddziaływanie fali uderzeniowej w palisadach transonicznych, a w konsekwencji na obciążenia termiczne i charakterystyki aerodynamiczne. Grubość warstwy laminarnej we wspomnianych przypadkach jest bardzo cienka (rzędu dziesiątych części milimetra), co utrudnia analizę szczegółów rozwijającej się warstwy przyściennej nawet w warunkach laboratoryjnych. A co z kolei jest niezbędne, gdy rozważane jest zastosowanie metod sterowania przepływem w celu oddziaływania na położenie przejścia L-T lub redukcji oderwania.

Doktorant w swojej pracy koncentruje się na analizie rozwoju warstwy laminarnej w pobliżu jej oderwania, utraty stabilności i przejścia laminarno-turbulentnego, a także ocenie wpływu oddziaływania akustycznego na jej stabilność, a w konsekwencji na rozpiętość oderwania warstwy. Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych uzyskano dla niskich prędkości przepływu, co umożliwiło szczegółową analizę warstwy przyściennej.

**Wobec powyższego można jednoznacznie stwierdzić, że wybrana tematyka badawcza ma istotne znaczenie poznawcze i aplikacyjne oraz spełnia kryteria prac w ramach dyscypliny „inżynieria mechaniczna”.**

## **2. Charakterystyka pracy i uwagi ogólne**

Praca doktorska Pana mgr inż. Vasyła Sokolenki została zredagowana na 124 stronach. Materiał diskutowany w pracy ujęto w 10 rozdziałach, gdzie ostatnie dwa zawierają spis rysunków, tabel oraz literatury.

W ramach przeglądu literatury Doktorant bardzo dobrze przedstawia charakterystykę dotychczas prowadzonych prac koncentrujących się na przejściu laminarno-turbulentnym indukowanym w obszarze oderwania warstwy laminarnej, aktywnych i pasywnych metod redukcji oderwania ze szczególnym uwzględnieniem możliwości wykorzystania źródeł akustycznych.

W ramach swojej pracy Doktorant przeprowadził badania eksperymentalne w tunelu aerodynamicznym z obiegiem otwartym i sekcją pomiarową zaprojektowaną i wykonaną w tym celu. Głównym elementem sekcji pomiarowej jest płaska płyta, na której rozwija się badana warstwa przyścienna oraz górna ściana, której kształt umożliwił uzyskanie wzdłużnego gradientu ciśnienia reprezentującego warunki na łopatkach sprężarki osiowej. Badania wykonano dla dwóch liczb Reynoldsa  $1.85 \cdot 10^5$  i  $3.7 \cdot 10^5$ . Wprawdzie liczba Macha jest bardzo niska w przeprowadzonych badaniach, ale liczba Reynoldsa odpowiada wartościom charakterystycznym dla parametrów pracy sprężarki lotniczej na wysokości tzw. przelotowej, gdzie przejście laminarno-turbulentne jest zjawiskiem istotnie wpływającym na charakterystyki aerodynamiczne i sprawność procesu sprężania. W tunelu został zainstalowany generator fal akustycznych do wytwarzania szumu szerokopasmowego i wzbudzeń harmonicznym o dwóch poziomach ciśnienia akustycznego, 125 dB i 135 dB. Charakterystyka całego układu pomiarowego została szczegółowo omówiona w rozdziale 4.

Wybór zakresu badanych parametrów pozwolił odpowiedzieć na pytania stawiane na początku pracy:

- (1) Jaki jest wpływ liczby Reynoldsa na obszar warstw ścinających w otoczeniu oderwania?
- (2) Jaki jest wpływ oddziaływania akustycznego na ewolucję warstwy przyściennej w strefie oderwania?
- (3) Jaki jest wpływ częstotliwości i amplitudy fal akustycznych na charakterystyki warstwy przyściennej w strefie oderwania?
- (4) Jaki fizyczny mechanizm wpływa na rozwój turbulencji w obszarze oderwania laminarnej warstwy przyściennej i jaki jest efekt oddziaływania akustycznego?

Rozdział 4 zawiera wyniki pomiarów prędkości oraz jej fluktuacji, co umożliwia ocenę równomierności przepływu w zaprojektowanej komorze pomiarowej oraz analizę podobieństwa przepływu i charakterystyk turbulencji w badanym zakresie liczb Reynoldsa.

Charakterystyki akustyczne w obszarze sekcji pomiarowej zostały przedstawione w rozdziale 6. Pomiary wykonane mikrofonem umieszczonym w kilku punktach przestrzeni przepływowej wskazują na homogeniczność pola akustycznego. Nasuwa się pytanie, czy bez uruchomionego przepływu ten sygnał w różnych lokalizacjach byłby podobny? Czy mikrofony zainstalowane w przepływie są w stanie zarejestrować ewentualne różnice wynikające z interferencji fal akustycznych na skutek interakcji ze ścianami stanowiska i jak różni się sygnał generowany i mierzony w wybranych lokalizacjach?

Z kolei pomiar przy pomocy mikrofonów zainstalowanych w płytce, na której rozwija się warstwa przyścienna wskazuje na pewne różnice analizowanego sygnału. Dotyczy to głównie pomiaru w położeniu oderwania warstwy przyściennej. Na wykresie 5.2 przedstawiono widmo mocy dla prędkości przepływu 10 m/s wskazujące na wpływ oderwania w wybranym punkcie pomiarowym. Szkoda, że nie pokazano wyników pomiaru dla prędkości 5 m/s, co umożliwiłoby ocenę wpływu prędkości przepływu lub jego brak. Dobór tonalnych wymuszeń akustycznych został przeprowadzony w oparciu o pomiary prędkości w wybranych punktach i analizę jej fluktuacji. Na rys. 5.4 przedstawiono fluktuację prędkości w funkcji częstotliwości wymuszeń tonalnych. Doktorant zwraca uwagę na istnienie charakterystycznych maksimów związanych z częstotliwością wymuszeń, ale na wykresie zabrakło zaznaczonej dokładności pomiaru, aby jednoznacznie ocenić wartość prezentowanych ekstremów. Bardzo interesujący wynik został zamieszczony na rys. 5.5, gdzie wyraźnie widać wpływ narastającej częstotliwości wymuszeń na rejestrowaną prędkość przepływu.

W rozdziale 6 została przedstawiona analiza warstwy przyściennej w obszarze oderwania bez wymuszeń akustycznych. Doktorant wykonał pomiary oraz wizualizację przepływu, które umożliwiły porównanie profili prędkości, fluktuacji prędkości oraz parametrów warstwy przyściennej: grubość, grubość straty przekroju, grubość straty pędu i parametr kształtu. Ponadto zostały wyznaczone takie wielkości jak współczynnik tarcia, czy współczynnik intermitencji. W oparciu o dostępne dane Doktorant przeprowadził interesującą analizę i interpretację wyników wiążąc prezentowane rozkłady parametrów z rozwojem niestabilności Klebanoffa i Kelvina-Helmhotza. Problem lokalizacji oderwania został omówiony w dalszej części rozdziału, a parametry oderwania wyznaczone w oparciu o różne kryteria zamieszczono w Tabeli 6.2. Wyniki wskazują na redukcję oderwania w przypadku większej liczby Reynoldsa. Należy podkreślić dużą wartość tego materiału, gdyż może być wykorzystany do walidacji modelu obliczeniowego, a w połączeniu z wynikami obliczeń umożliwiającą analizę struktur turbulentnych (LES lub

DNS), wykorzystany do szczegółowej analizy zjawiska oderwania laminarnej warstwy przyściennej.

W drugiej części pracy, zawartej w rozdziale 7, Doktorant skoncentrował się na analizie wpływu wzbudzenia akustycznego na oderwaną warstwę przyścienną. Zbadano dwa poziomy ciśnienia akustycznego i porównano wpływ szumu różowego i wzbudzenia monoharmonicznego.

Na rys. 7.1 przedstawiono rozkład prędkości wzdłuż przepływu dla przypadku bez oderwania warstwy, z oderwaniem poddanym oddziaływaniu akustycznemu i bez takiego oddziaływania. Nie wyjaśniono jednak, czy przypadek bez oderwania uzyskano dla zmienionego gradientu ciśnienia, czy zastosowano jakąś inną zmianę na stanowisku.

Na rys. 7.3 pokazano profile fluktuacji prędkości, gdzie widać wpływ wymuszeń akustycznych, zarówno w obszarze warstwy i poza warstwą. W przypadku wymuszeń o najwyższym poziomie energii ta różnica jest widoczna także wysoko nad warstwą przyścienną. Doktorant wyjaśnia, że prawdopodobną przyczyną może być wpływ intensywnych fal akustycznych na chłodzenie sondy termoanemometrycznej. Natomiast ten wpływ w obszarze warstwy jest pomijalny. Tu nasuwa się wątpliwość, z czego wynika taki wniosek. Czy były rozważane, albo podejmowane próby pomiaru sondą w sekcji pomiarowej tylko pod wpływem fal akustycznych, bez uruchomionego przepływu? Czy w tej sytuacji pomiar sondą wskazałby na istnienie jakiegoś sygnału będącego efektem fal akustycznych?

Przedstawione wyniki wyraźnie wskazują na wpływ wymuszeń akustycznych na redukcję rozpiętości pęcherza oderwaniowego w obu przypadkach liczb Reynoldsa, a nawet całkowitej jego eliminacji przy jej wyższej wartości i zastosowaniu bardziej intensywnego wymuszenia akustycznego (135 dB). Taki wniosek można sformułować w oparciu o wyznaczone parametry warstwy przyściennej i współczynnik tarcia.

Wyjaśnienie mechanizmu odpowiedzialnego za obserwowaną redukcję oderwania Doktorant zamieścił w ostatniej części pracy. To zamykający i bardzo wartościowy element pracy doktorskiej. Doktorant wyjaśnia, że zastosowanie wymuszeń akustycznych głównie wpływa na niestabilności Kelvina-Helmhotza w tylnej części oderwania. Natomiast ich wpływ w przedniej strefie, gdzie wykryto niestabilności Klebanoffa, jest znikomy. Nie zaobserwowano także wpływu wymuszeń na położenie początku strefy oderwania. Dyskusja wyników jest wzbogacona odniesieniami do wyników prac opublikowanych przez innych autorów, co dodatkowo podkreśla wartość prezentowanej pracy i wypełnioną lukę w poznaniu i rozumieniu tego zjawiska.

Pozostaje otwarte pytanie, na które prawdopodobnie trudno w tej chwili odpowiedzieć, czy w przypadku większych prędkości przepływu należałoby zwiększyć energię wymuszeń akustycznych, aby uzyskać podobny efekt jak w zakresie prędkości badanych przez Doktoranta. Czy też „wystarczyłoby” odpowiednio dobrać zakres częstotliwości wymuszeń tonalnych do zakresu niestabilności Kelvina-Helmoltza?

Przedstawiona praca doktorska jest napisana w jasny sposób, układ pracy jest logiczny i zawartość poszczególnych rozdziałów nie budzi wątpliwości. Nie udało się Doktorantowi uniknąć błędów i pomyłek edytorskich lub pomyłkowych odwołań do rysunków, albo pomyłek na rysunkach (np. legenda na rys. 7.1), ale one nie obniżają wartości merytorycznej pracy.

### **3. Uwagi szczegółowe**

Poza ogólnymi uwagami i komentarzami w pierwszej części recenzji nasuwają się poniższe spostrzeżenia i pytania.

1. Proszę o wyjaśnienie według jakiego kryterium został wyznaczony kształt górnej ściany zapewniający dodatni gradient ciśnienia indukujący oderwanie warstwy przyściennej. Czy w oparciu o obliczenia dla wybranej palisady łopatkowej, czy w oparciu o wcześniejsze prace badawcze?
2. Czy wyznaczane były fluktuacje prędkości w obszarze oderwania, np. w przedniej i tylnej części pęcherza oderwaniowego? Jeśli tak to jaki jest zakres częstotliwości i czy zaobserwowano różnicę w różnych lokalizacjach oderwania i różnych liczb  $Re$ ? Czy wewnątrz oderwania zaobserwowano wpływ wymuszeń akustycznych, np. zmianę częstotliwości fluktuacji?
3. Doktorant stwierdził, że wyniki pomiarów fluktuacji prędkości poza warstwą przyścienną mogą być obarczone wpływem fal akustycznych. Czy były rozważane, albo podejmowane próby pomiaru sondą w sekcji pomiarowej tylko pod wpływem fal akustycznych, bez uruchomionego przepływu? Czy w tej sytuacji pomiar sonda wskazała istnienie jakiegoś sygnału będącego efektem fal akustycznych?
4. Badania przedstawione w pracy doktorskiej dotyczą prędkości odpowiadającym bardzo niskim liczbom Macha. Proszę o komentarz dotyczący wpływu wymuszeń akustycznych na oderwanie warstwy laminarnej w przypadku większych prędkości przepływu. Czy efekt byłby podobny, czy należałoby zmodyfikować wymuszenia

akustyczne, aby można było zaobserwować wpływ na niestabilności Kelvina-Helmholtza i uzyskać redukcję warstwy przyściennej.

5. Czy generowane fale akustyczne powodowały drgania konstrukcji? Czy one mogły lub mogłyby wpływać na lokalizację i rozpiętość oderwania?

6. Proszę o wyjaśnienie czym spowodowana jest różnica rozkładu  $U/U_e$  w  $x=500$  dla przypadku wymuszenia 135 dB (Rys.7.11- b) w porównaniu z pozostałymi przypadkami: bez wymuszenia i z wymuszeniem 125 dB. Przedstawiony poziom wartości jest wyraźnie niższy niż dla pozostałych przypadków.

#### 4. Podsumowanie

Podsumowując recenzowaną pracę uważam, że Pan mgr inż. Vasyl Sokolenko przedstawił interesujące i wartościowe wyniki, istotne dla rozwoju badań nad zagadnieniami przepływu warstwie przyściennej. Badania wykazały wpływ wzbudzenia akustycznego na położenie przejścia-laminarno turbulentnego. Doktorant wykazał, że zastosowanie wyższego poziomu ciśnienia akustycznego prowadzi do szybszej utraty stabilności, czego efektem jest redukcja strefy oderwania warstwy przyściennej. Efekt oddziaływania akustycznego obserwuje się w tylnej części pęcherza oderwaniowego, co Doktorant uzasadnia interakcją fal akustycznych ze strukturami w strefie niestabilności Kelvina-Helmholtza.

Wobec powyższego stwierdzam, że Doktorant osiągnął założone cele pracy, a przedstawione wyniki są nie tylko inspiracją do dalszych badań nad prezentowanymi zagadnieniami, ale także mają istotne znaczenie użytkowe.

Uważam, że praca Pana mgr inż. Vasyla Sokolenki pt.: „Analiza wpływu oddziaływania akustycznego na utratę stabilności przepływu w warstwie przyściennej” (*Analysis of the impact of acoustic excitation on the loss of flow stability in the boundary layer*) odpowiada warunkom określonym w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz.1668 z późniejszymi zmianami) i wnoszę o dopuszczenie **jej do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.**

Ponadto, stwierdzam, że wyniki przedstawione w pracy doktorskiej wyraźnie wskazują na ponadprzeciętny poziom naukowy. Biorąc pod uwagę złożoność przedstawionego zagadnienia, opracowane stanowisko pomiarowe, wykonane pomiary, ich interesującą

analizę, a także potencjalną możliwość wykorzystania wyników do walidacji modeli obliczeniowych w zagadnieniach przejścia laminarno-turbulentnego, wnioskuje o wyróżnienie pracy doktorskiej Pana mgr inż. Vasyla Sokolenki.