

Prof. dr hab. inż. Paweł Flaszyński

Gdańsk, 2026-05-11

Zakład Aerodynamiki

Instytut Maszyn Przepływowych

im. Roberta Szewalskiego

Polskiej Akademii Nauk

Tel: 58 5225 268

E-mail: pflaszyn@imp.gda.pl

Recenzja pracy doktorskiej

mgr. inż. Piotra Kamińskiego

pt.: „Numerical modeling of a turbulent boundary layer on wavy and irregular surfaces”

1. Wstęp

Recenzja pracy doktorskiej została przygotowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej nr 6/2025/2026 z dnia 26.02.2026 roku oraz pisma, nr R-WIM-BOD-511.1.2026 z dnia 19.03.2026, przesłanego przez Pana dr. hab. inż. Janusza Szmidłę, Profesora Politechniki Częstochowskiej, Prodziekana ds. Nauki Wydziału Inżynierii Mechanicznej.

Promotorem pracy doktorskiej mgr. inż. Piotra Kamińskiego jest prof. dr hab. inż. Artur Tyliszczak, a kopromotorem dr hab. inż. Paweł Niegodajew, prof. PCz.

Rozwój metod sterowania przepływem jest jednym z istotnych kierunków rozwoju współczesnej aerodynamiki. Celem zastosowania metod sterowania przepływem jest zwiększenie efektywności i osiągnięcie różnych rodzajów obiektów poruszających się w powietrzu, a także, albo nawet przede wszystkim bezpieczeństwa i trwałości projektowanych obiektów czy układów przepływowych. Początki badań nad metodami sterowania przepływem sięgają początków XX wieku, kiedy Prandtl

przewodził badania nad odsysaniem w obszarze warstwy przyściennej i opóźnienia jej oderwania. Według ogólnie znanej klasyfikacji metod sterowania przepływem, to była metoda aktywna. Rozwój metod sterowania w ubiegłym stuleciu był inspirowany wyzwaniami stojącymi przed aerodynamiką lotniczą i szeregiem rozwiązań rozwijanych później w zastosowaniach motoryzacyjnych i układach energetycznych, w tym energetyki wiatrowej był pochodną prac w lotnictwie.

Współczesne lotnictwo, motoryzacja, energetyka wiatrowa czy przemysł kosmiczny stawiają coraz większe wymagania dotyczące zmniejszenia oporów aerodynamicznych, poprawy sprawności procesów energetycznych, zwiększenia zakresu stabilnej pracy układu oraz obniżenia poziomu hałasu. Istotnym czynnikiem rozwoju tej dziedziny jest również postęp technologiczny. Rozwój metod pomiarowych, metod numerycznych, uczenia maszynowego czy sztucznej inteligencji umożliwia pogłębianie wiedzy na temat przepływów turbulentnych i projektowanie systemów sterowania przepływem ze zwiększoną skutecznością. Obecnie, istnieje szeroka gama metod sterowania przepływem, które można podzielić na dwie podstawowe grupy: metody aktywne i pasywne. Doktorant w swojej pracy koncentruje się na jednej

z metod pasywnych, których niewątpliwą zaletą jest brak niezbędnych układów zasilania, doprowadzania energii w różnej formie, celem aktywnego indukowania zmian struktury przepływu w wybranych obszarze. Jednak wadą metod pasywnych jest trudność w ich odpowiednim doborze do szerszego zakresu pracy i określenie cech charakterystycznych, najczęściej parametrów geometrycznych odpowiednio skalowanych do lokalnych warunków przepływu. Metoda pasywna nie podlega aktywowaniu w określonych warunkach przepływu i można powiedzieć, że jest aktywna w całym zakresie pracy urządzenia, a więc odpowiedni dobór charakterystycznych parametrów jest wyzwaniem projektowym i badawczym. Wobec czego, pomimo istnienia różnych metod pasywnych wciąż istnieje potrzeba pogłębiania wiedzy na temat ich funkcjonowania, aby nie tylko poprawiały sprawność procesu w warunkach wysokiego obciążenia lub pracy poza nominalnej, ale także nie obniżały sprawności w pozostałym zakresie pracy.

Doktorant w swojej pracy skoncentrował się na badaniu wpływu odpowiednio pofalowanej powierzchni opływanej ściany na redukcję oderwania turbulentnej warstwy przyściennej oraz intensyfikację wymiany ciepła w przewodzie cylindrycznym oraz kanale.

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

2. Charakterystyka pracy i uwagi ogólne

Praca doktorska mgr. inż. Piotra Kamińskiego została napisana w języku angielskim i jest zredagowana na 177 stronach. Rozprawa oparta jest na pięciu artykułach (Papers 1–5) oraz jednym preprincie (Paper 6). Materiał prezentowany w pracy ujęto w 5 rozdziałach. Pierwsze dwa rozdziały zawierają przegląd literatury i opis metod badawczych. Rozdział trzeci stanowi przewodnik po serii opublikowanych artykułów, zawierający skrótowe omówienie wyników oraz podkreślający ich istotę i znaczenie w kontekście kolejnych prac. Podsumowanie zawarto w rozdziale czwartym. Ta część pracy zawarta jest na 62 stronach, a artykuły zostały zamieszczone w rozdziale piątym. Pracę zamyka spis literatury.

Należy podkreślić, że artykuły stanowiące podstawę pracy doktorskiej zostały opublikowane w wysoko notowanych czasopismach: Aerospace Science and Technology, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Energy i Physics of Fluids.

Praca została zainspirowana interesującymi wynikami wcześniejszych badań prowadzonych na Politechnice Częstochowskiej przez prof. Artura Drózdza i prof. Witolda Elsnera, które wykazały, że zastosowanie pofalowanej powierzchni może skutecznie zredukować oderwanie warstwy przyściennej przy wyższych liczbach Re . Jednak pomimo obiecujących wyników badań eksperymentalnych pozostało szereg otwartych pytań, a znalezienie odpowiedzi umożliwi wyjaśnienie mechanizmów fizycznych związanych z oddziaływaniem pofalowanej powierzchni na strukturę warstwy przyściennej.

Cele pracy doktorskiej mgr. inż. Piotra Kamińskiego sprecyzowane we wstępie pracy brzmią następująco:

- ocena wpływu lokalnego i globalnego dodatniego gradientu ciśnienia na rozwój turbulentnej warstwy przyściennej wzdłuż pofalowanej powierzchni,
- analiza ewolucji struktur przepływu wzdłuż pofalowanej powierzchni,

- badanie zależności między charakterystykami przepływu przyściennego, statystykami przepływu oraz parametrami geometrycznymi określającymi falistość,
- ocena możliwości poprawy efektywności aerodynamicznej poprzez zmianę geometrii powierzchni,
- ocena skuteczności pofałdowania powierzchni w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, np. na zakrzywionej powierzchni charakterystycznej dla profili.

Rozdział pierwszy to przegląd literatury, w którym Doktorant koncentruje się na pasywnych metodach sterowania przepływem. W pierwszej części rozdziału omówiony został rozwój pasywnych metod sterowania w zastosowaniach lotniczych, motoryzacyjnych, inżynierii środowiskowej czy energetyce. Doktorant podkreślił także, że część rozwijanych metod jest inspirowanych obserwacjami środowiska naturalnego (*bioinspired*). Do takiej grupy zalicza się metoda oparta na zastosowaniu pofalowanej powierzchni, badanej w niniejszej pracy. W ramach przeglądu literatury dotyczącego tej metody, Doktorant wymienia najważniejsze wnioski z dotychczasowych badań, wskazując wpływ parametrów geometrycznych pofalowanej powierzchni na turbulencję w warstwie przyściennej i jej oderwanie. W dalszej części rozdziału przedstawiony jest także stan badań nad zastosowaniem lokalnych zmian na powierzchni ścian celem intensyfikacji wymiany ciepła. To zagadnienie jest szczególnie ważne w zagadnieniach energetyki, czy napędów lotniczych, gdzie lokalny strumień ciepła jest szczególnie wrażliwy na zmiany lokalnych warunków przepływu w warstwie przyściennej. Na końcu rozdziału pierwszego, zostały w skrócie przedstawione możliwości zastosowania metod machine learning w poszukiwaniu optymalnych parametrów metod sterowania przepływem. Ten fragment jest wprowadzeniem do wykonanej optymalizacji wieloparametrycznej geometrii pofalowanej powierzchni.

W rozdziale drugim Doktorant omówił metodologię badań, wskazując na dwa obszary badawcze: redukcję oderwania warstwy przyściennej i intensyfikację wymiany ciepła, odpowiednio dzieląc ten rozdział na sekcje. Obliczenia wykonano programem Ansys Fluent. W przypadku badań wpływu pofałdowania powierzchni na charakterystyki przepływu w warstwie przyściennej i redukcję oderwania wykorzystano metodę Large Eddy Simulations z modelem podsiatkowym Wall-Adapting Local Eddy-viscosity (WALE), a w przypadku wpływu zmian na powierzchni na intensyfikację wymiany ciepła obliczenia wykonano metodą RANS z modelami SST i k-epsilon. Model

numeryczny został sformułowany w oparciu o możliwości dostępne w programie Fluent, czyli wykorzystano schemat „bounded second-order central difference” dla członów konwekcyjnych, schemat second-order central difference scheme w przypadku równania zachowania masy oraz członów lepkich, a schemat niejawny drugiego rzędu dla całkowania w czasie. Natomiast, w modelowaniu RANS zastosowano schemat upwind drugiego rzędu dla członów konwekcyjnych. Ponadto w procesie optymalizacji wykorzystano technikę adaptacji siatki dostępną w ANSYS Fluent’s Dynamic Meshing.

W tym rozdziale zostały scharakteryzowane badane geometrie, dla których wyniki są analizowane w kolejnych artykułach, oraz referencyjne badania eksperymentalne wykonane wcześniej przez zespół Politechniki Częstochowskiej.

Rozdział trzeci składa się z 6 podrozdziałów, w których Doktorant omówił wyniki opublikowane w pięciu artykułach badawczych oraz jednym preprincie. Należy podkreślić, że Doktorant jest pierwszym autorem wszystkich sześciu publikacji. Cztery pierwsze prace koncentrują się na sterowaniu przepływem w turbulentnej warstwie przyściennej celem redukcji oderwania. Układ prezentowanych prac jest logiczny

i jednoznacznie wskazujący na spójność tematyczną publikowanych wyników badań. W artykule 1 przedstawiono porównanie wyników LES z wynikami pomiarów, prędkości i jej fluktuacji w wybranych trawersach nad pofalowaną powierzchnią. Porównanie jest elementem walidacji wykorzystanego modelu obliczeniowego. W oparciu o wyniki obliczeń, zarówno wartości chwilowe jak i uśrednione w czasie, przedstawiono analizę przepływu w strefie przyściennej dla przypadków z zerowym i dodatnim (adverse) gradientem ciśnienia.

Kolejne artykuły przedstawiają wyniki uzyskane w kolejnych krokach prowadzonych badań, w których wykorzystano wcześniej omówiony i walidowany model obliczeniowy. W artykule 2 omówiono wyniki analizy parametrycznej dla szerokiego zakresu zmian geometrii falistej powierzchni oraz określono wrażliwość skuteczności redukcji oderwania przepływu na te zmiany. Natomiast w artykule 3 Doktorant i współautorzy przedstawili zmienioną geometrię wprowadzając nierównomierności na pofalowanej powierzchni poprzez wprowadzenie asymetrii poszczególnych fal. Wykazano, że takie zmiany prowadzą do zwiększonej efektywności stosowanej metody niż przy zastosowaniu referencyjnego (sinusoidalnego) kształtu prezentowanego w poprzednich pracach. Efektywność danej konfiguracji jest

oceniana w oparciu o rozkład naprężeń stycznych. W tym przypadku Doktorant nie prezentuje wpływu bezpośrednio na oderwanie. Obszar obliczeniowy został skrócony w stosunku do przestrzeni pomiarowej i z tego powodu oderwanie nie występuje w analizowanym obszarze. Wpływ badanej metody sterowania został przedstawiony w artykule 4, gdzie oderwanie jest indukowane na zakrzywionej powierzchni. Powierzchnia ma kształt profilu NACA 4412, a analizowane wyniki wskazują możliwość redukcji oderwania. Doktorant omawia także wpływ liczby Reynoldsa na skuteczność metody i wskazuje na konieczność kontynuacji prac w zakresie wyższych liczb Reynoldsa. W artykule przedstawiono interesujące wyniki, ale przyznam, że tytuł „Turbulent separation control on an airfoil surface using a wavy wall” budzi moje wątpliwości. Pomimo tego, że artykuł został opublikowany i z pewnością komentowany przez recenzentów. Kształt odwzorowuje geometrię profilu, ale oderwanie na zakrzywionej powierzchni oddziałuje ze ścianą w strefie tzw. compression corner, a nie z klasycznym śladem za profilem. Taka sytuacja może zmienić zachowanie się oderwania, zakres pulsacji i częstotliwości, bo oderwanie stanowi zamkniętą strefę, ograniczoną punktem/linią przylgnięcia poza „profilem”. Ostatnie dwa artykuły zawierają wyniki prac, których celem jest analiza wpływu falistości powierzchni na intensyfikację wymiany ciepła przy jednoczesnej minimalizacji oporów przepływu i strat ciśnienia. W tym celu wykonano obliczenia metoda RANS, a poszukiwanie optymalnego rozwiązania wykonano w oparciu o optymalizację bayesowską (Bayesian optimisation). To ważne poznawczo zagadnienie i niezwykle istotne z praktycznego punktu widzenia. Przedstawiona metoda poszukiwania optymalnego rozwiązania jest wartościowa, a zakres analizowanych parametrów jest szeroki. Zakres zmian kształtu powierzchni nasuwa pewne wątpliwości, czy przy tak dużych zmianach geometrii widocznych na rys. 3.22 (co dotyczy artykułu 5) warunek stałego strumienia ciepła jest odpowiedni dla wszystkich przypadków. Wątpliwość dodatkowo podsyca zakres temperatur pokazany na rysunku 3.23, co Doktorant określa jako „worst wall shape”. Tak duża koncentracja temperatury prawdopodobnie zmieniałaby się jeśli uwzględnić określoną grubość ściany i transport ciepła w tym obszarze. To oczywiście nie jest celem pracy i leży poza jej zakresem, natomiast ten przypadek wskazuje na trudności jakie mogą występować w trakcie optymalizacji przy dużym zakresie zmian parametrów geometrycznych w obszarze przyściennym w przypadku zagadnień związanych z wymianą ciepła.

Wnioski z przedstawionych prac badawczych, a w zasadzie wybrane najważniejsze wnioski będące podsumowaniem wszystkich artykułów zamieszczono w rozdziale 4. Doktorant podkreśla, że odpowiednio zaprojektowana falistość powierzchni stanowi skuteczne narzędzie do sterowania przepływem w turbulentnej warstwie przyściennej, a dzięki odpowiednio wykonanej optymalizacji można uzyskać poprawę charakterystyk aerodynamicznych oraz skutecznie wpływać na wymianę ciepła.

3. Uwagi szczegółowe

Praca jest napisana w sposób jasny i komunikatywny, a materiał graficzny jest opracowany starannie. Wszystkie wyniki przedstawione w pracy zostały wcześniej opublikowane, co zdecydowanie wpłynęło na jakość opracowanego i zamieszczonego materiału.

Wyniki przedstawione w pracy doktorskiej skłaniają do sformułowania poniższych pytań.

1. W sekcji 2.2.3 został przedstawiony układ równań wykorzystywany w rozwiązaniu metodą RANS. Proszę o komentarz czy siła masowa będąca efektem grawitacji była uwzględniana w obliczeniach, jak wskazuje Równanie 2.10?
2. Na rys. 3.4 pokazano naprężenia styczne dla czterech przypadków. Jak podkreśla Doktorant wpływ wprowadzonych zmian na powierzchni widać tylko w przypadku dodatniego gradientu ciśnienia (APG). W artykule zamieszczono szereg interesujących porównań w obszarze pofalowanej powierzchni, ale brak jest informacji jak wygląda profil prędkości i fluktuacje poza tym obszarem. Czy można pokazać takie porównanie poza zmodyfikowaną ścianą, np. bliżej wylotu obszaru obliczeniowego? Jaką wartość przyjmuje „boundary layer shape factor H” w wybranym przekroju bliżej wylotu dla tych przypadków?
3. Amplituda pofalowanej powierzchni lub długość fali jest odnoszona do grubości warstwy przyściennej, przy czym grubość traktowana jako referencja w różnych miejscach pracy jest np. wartością średnią na wybranym odcinku dla płaskiej ściany lub grubością na pierwszej wypukłości. Odwołując się do pracy Dróżdź et al. (2021a), Doktorant pisze (artykuł 2, strona 3), że amplituda sięga wartości tak, aby górne położenie fali sięgało granicy warstwy przyściennej. Nie znalazłem w pracy, ani

w artykułach w jakim zakresie zmieniała się amplituda A w odniesieniu do grubości warstwy lub grubości straty przekroju przed pofalowaną ścianą. Proszę o komentarz.

4. W Artykułach 1–3 oderwanie przepływu nie występuje ze względu na ograniczoną długość domeny obliczeniowej, a wnioski dotyczące skuteczności sterowania przepływem i ewentualnej redukcji oderwania warstwy wyciągane są na podstawie naprężenia stycznego przy ścianie. Proszę o komentarz czy to jest wystarczający warunek, czy warto byłoby dodatkowo analizować współczynnik kształtu warstwy przyściennej („boundary layer shape factor H ”).

5. Podając zakres liczb Re_{τ} 1200 - 2500 dla przypadku z profile Doktorant pisze („representing the variability in inflow conditions typically encountered in real-world scenarios”), że są one reprezentatywne dla turbin wiatrowych. Proszę o podanie przykładów jakich przypadków to może dotyczyć.

6. (dot. Artykułu 4) Czy analizowany był wpływ konfiguracji (pofalowania powierzchni) na fluktuacje położenia oderwania, amplitudę i częstotliwość? Czy obserwowany był wpływ na zakres częstotliwości i skale struktur wirowych w oderwaniu? Jeśli tak to w jakim zakresie obserwowano zmiany.

7. Nawiązując do komentarza w poprzedniej części recenzji dotyczącej geometrii „profilu” i efektu typu compression corner. Amplituda oscylacji oderwania i częstotliwość może być inna niż w typowym opływie profilu ze swobodnym śladem. Proszę o komentarz, czy były wykonane obliczenia dla profilu albo jakieś analizy wskazujące na podobieństwa lub różnice takich konfiguracji?

8. Przypadki zmian geometrii ściany będące efektem optymalizacji (artykuł 5 i 6) wskazują na szeroki zakres zmian pofalowania powierzchni i bogactwo wyników. Widać także, że te geometrie indukują silne zmiany w rozkładzie naprężeń i lokalnie temperatury. Obliczenia wykonano metodą RANS i modelami turbulencji, co jest oczywiste ze względu na ilość analizowanych przypadków. Ogólnie wiadomo, że modele turbulencji sprawiają trudności w poprawnym przewidywaniu współczynnika wymiany ciepła, co może mieć szczególnie miejsce w przypadku silnie zmiennej lokalnie geometrii. Czy wykonano jakieś porównanie dla wybranej konfiguracji z obliczeniami LES. Proszę o komentarz.

4. Podsumowanie

Praca wpisuje się w aktualne trendy badań i rozwoju metod sterowania przepływem. Doktorant wykonał szereg obliczeń metodą LES, a wyniki obliczeń umożliwiły analizę wpływu pofalowania powierzchni na rozwój turbulentnej warstwy przyściennej przy zerowym i dodatnim gradiencie ciśnienia. Przeprowadził szczegółową analizę struktur przepływu oraz wybranych wielkości charakteryzujących zmiany w warstwie przyściennej. Określił wpływ parametrów geometrycznych ściany na możliwość redukcji oderwania w kanale z prostą ścianą z wprowadzonym pofalowaniem oraz na zakrzywionej ścianie, reprezentującej krzywiznę profilu. W oparciu o te doświadczenia, Doktorant wykonał obliczenia metodą RANS oraz przeprowadził optymalizację, której celem był intensyfikacja wymiany ciepła oraz redukcja strat ciśnienia. Podsumowując, uważam, że Pan mgr inż. Piotr Kamiński w pełni zrealizował założone cele.

Uważam, że praca doktorska Pana mgr. inż. Piotra Kamińskiego pt.: „Numerical modeling of a turbulent boundary layer on wavy and irregular surfaces” spełnia wymagania określone w ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Praca doktorska Pana mgr. inż. Piotra Kamińskiego prezentuje ponadprzeciętny poziom naukowy, wysoki poziom wykonanej analizy struktury przepływu oraz interpretacji wyników. Wyniki zostały opublikowane w 6 artykułach, z czego 4 w renomowanych czasopismach. We wszystkich Doktorant jest pierwszym autorem. Wobec powyższego wnioskuję o wyróżnienie pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Piotra Kamińskiego.