

Częstochowa, 06.12.2024

Prof. dr hab. inż. Andrzej Bogusławski
Katedra Maszyn Ciepłych
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Politechnika Częstochowska

**Ocena osiągnięcia naukowego zatytułowanego
„Symetrie i skalowanie w turbulencji: od analiz teoretycznych do zastosowań
w badaniach przepływów atmosferycznych”
oraz aktywności naukowej, dydaktycznej i organizacyjnej
doktor inżynier Marty Waclawczyk
ubiegającej się o stopień doktora habilitowanego**

Przedstawiona ocena została opracowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne w Uniwersytecie Warszawskim z dn. 14.10.2024 r. w sprawie powołania składu Komisji Habilitacyjnej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne dr Marcie Waclawczyk. Dziekan Wydziału Fizyki prof. dr hab. Wojciech Satuła - Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne w Uniwersytecie Warszawskim przedstawił następujące dokumenty:

- kopię dyplomu uzyskania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie mechanika,
- autoreferat,
- cykl artykułów naukowych powiązanych tematycznie pt. „Symetrie i skalowanie w turbulencji: od analiz teoretycznych do zastosowań w badaniach przepływów atmosferycznych”,
- wykaz osiągnięć naukowych stanowiących znaczny wkład w rozwój dyscypliny,
- wykaz nagród i stypendiów.

[KMC >**Katedra Maszyn Ciepłych - Wydział Inżynierii Mechanicznej****Politechnika Częstochowska**

ul. Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa

tel. +48 34 325 05 07, e-mail: sekretariat.kmc@pcz.pl

1. CHARAKTERYSTYKA SYLWETKI NAUKOWEJ HABILITANTKI

Kandydatka ukończyła studia magisterskie w roku 2001 na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej. Stopień doktora nauk technicznych uzyskała broniąc w roku 2007 rozprawę pt.: „Modeling of near-wall turbulence by means of probability and filtered density function methods” w Instytucie Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku. Promotorem rozprawy był Prof. dr hab. inż. Jacek Pozorski.

1.1. BADANIA I DOROBEK PUBLIKACYJNY

Tematyka prac badawczych, którymi w głównej mierze zajmowała się Habilitantka od czasu uzyskania stopnia doktora w roku 2007, dotyczy matematycznego opisu przepływów turbulentnych, w szczególności uniwersalnych praw skalowania dla wielkości średnich oraz problemu symetrii równań opisujących ruch płynu. Habilitantka jest współautorką 9. publikacji stanowiących oceniane osiągnięcie naukowe oraz 12. publikacji w czasopismach z listy JCR poświęconych innym problemom badawczym, choć niektóre z nich są związane z głównym problemem skalowania i symetrii. Zainteresowania Habilitantki, poza głównym nurtem badawczym przedstawionym w cyklu publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego, obejmują opis przepływu przy pomocy modeli zredukowanego rzędu, modelowanie przepływów dwufazowych, modelowanie podsiatkowe dla metody LES-Large Eddy Simulation. Na podkreślenie zasługuje również bardzo duża liczba wystąpień konferencyjnych Habilitantki na prestiżowych międzynarodowych konferencjach naukowych, w tym również w formie wykładów zaproszonych.

Liczba cytowań publikacji Habilitantki, bez autocytowań, oraz indeks H według bazy Web of Science wynoszą odpowiednio 205 i 10.

1.2. UZNANIE W ŚRODOWISKU NAUKOWYM

Habilitantka jest znana w krajowym i międzynarodowym środowisku naukowym, czego dowodem są liczne recenzje publikacji w czasopismach o zasięgu międzynarodowym, takich jak *Physics of Fluids*, *Journal of Fluid Mechanics*, *Boundary Layer Meteorology*, *Proceedings of the Royal Society*, wymieniając tylko najważniejsze czasopisma. Innym istotnym wskaźnikiem świadczącym o wysokiej pozycji Habilitantki w środowiskach naukowych jest wygłoszenie 4. wykładów zaproszonych na prestiżowych konferencjach naukowych w Polsce, Włoszech, Niemczech i Francji. W latach 2008-2009 Habilitantka odbyła staż podoktorski w grupie prof. Martina Oberlacka (Chair of Fluid Dynamics, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Darmstadt) w Darmstadt, uzyskując stypendium Alexandra von Humboldta, który następnie był kontynuowany w latach 2010-2011 w ramach stypendium TU Darmstadt Wiedereinstieg Stipendium. Praca w tym, znanym w świecie zespole naukowym, umocniła rozpoznawalność Habilitantki w środowisku naukowym o zasięgu światowym. Miarą poziomu naukowego Habilitantki reprezentowanego w ramach stażu podoktorskiego jest Jej zatrudnienie w ramach programu kierowanego przez Prof. C. Tropeę na Uniwersytecie Technicznym w Darmstadt, w ramach projektu indywidualnego: „Modelling of the interface tracking in turbulent multiphase flows”. Zatrudnienie zostało następnie przedłużone w zespole Prof. M. Oberlacka, w ramach projektu DFG, kierowanego przez Habilitantkę, pt: „Modelling of turbulence-interface interaction in two fluid systems”. Praca badawcza prowadzona na Uniwersytecie w Darmstadt określiła główne kierunki badawcze Habilitantki, umocniła Jej rozpoznawalność w środowisku naukowym oraz przyczyniła się do nawiązania licznych kontaktów międzynarodowych.

1.4. FUNDUSZE BADAWCZE, KIEROWANIE ZESPOŁAMI BADAWCZYMI

Habilitantka ma znaczący dorobek w zakresie kierowania projektami badawczymi. Począwszy od projektu zrealizowanego na Uniwersytecie w Darmstadt w latach 2012-2014, następnie projekt w ramach konkursu OPUS 15, po obecnie realizowany projekt OPUS 37 Narodowego Centrum Nauki. Zakończone sukcesem projekty badawcze, którymi kierowała Habilitantka świadczą, nie tylko o Jej kompetencjach naukowych, ale również o zdolnościach kierowania zespołem badawczym. Niemniej ważny jest udział w projektach badawczych, który pozwala na rozwijanie umiejętności pracy w zespole. Habilitantka pełniła rolę wykonawcy w krajowych projektach OPUS i SONATINA oraz w projekcie międzynarodowym w ramach programu HORIZON 2020 pt.: „Next Generation Earth Modelling Systems (NextGEMS)”, w którym uczestniczyło 26 zespołów badawczych. To szczególnie istotne doświadczenie pracy badawczej w dużych zespołach międzynarodowych realizujących zintegrowane zadania.

1.5. OSIĄGNIĘCIA DYDAKTYCZNE I ORGANIZACYJNE

Zakres tematyczny zajęć dydaktycznych prowadzonych przez Habilitantkę na Uniwersytecie w Darmstadt oraz Uniwersytecie Warszawskim jest imponujący. Wykład w języku angielskim pt.: „Turbulence and atmospheric boundary layer” jest bliski zainteresowaniom badawczym Habilitantki. Prowadziła jednak również zajęcia laboratoryjne i ćwiczenia audytoryjne z wielu innych przedmiotów, w tym z matematyki, fizyki statystycznej, termodynamiki, geofizyki, co świadczy o wszechstronnym przygotowaniu, pozwalającym podejmować wyzwania z różnych dziedzin, w tym również interdyscyplinarne. Bardzo istotny jest również dorobek w zakresie kształcenia kadry naukowej. Habilitantka była promotorem lub promotorem pomocniczym w 4. pracach magisterskich na Politechnice Gdańskiej, Uniwersytecie w Darmstadt oraz Uniwersytecie Warszawskim oraz promotorem pomocniczym w pracy doktorskiej na Uniwersytecie Warszawskim. Na uwagę zasługuje różnorodność tematyki prac, którymi opiekowała się Habilitantka. O pozycji w międzynarodowym środowisku naukowym świadczy również powołanie Jej na recenzentkę w przewodzie doktorskim na Politechnice w Mediolanie. Dzięki międzynarodowej pozycji Habilitantki została powołana do komitetu organizacyjnego Interdisciplinary Turbulence Conference (iT_i), Bertinoro/Italy, 2014 oraz 3rd Workshop of COMPLETE (Cloud-MicroPhysicsTurbulence-Telemetry) ITN - ETN Network, 2019. Jest członkiem Rady Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w latach 2020-2024. Pełniła również funkcję członka komisji kwalifikacyjnej do Szkoły Doktorskiej Nauk Ścisłych i Przyrodniczych w roku 2022. Była członkiem komitetu doradczego bardzo prestiżowej konferencji International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP) w latach 2019 i 2022.

Ważnym uzupełnieniem dorobku organizacyjnego jest zaangażowanie Habilitantki w popularyzację nauki poprzez aktywny udział w Festiwalu Nauki na Uniwersytecie Warszawskim w latach 2017, 2019-2022 oraz popularnonaukowe publikacje w czasopiśmie Fizyka w Szkole.

1.6. STYPENDIA I NAGRODY

Habilitantka uzyskała trzy stypendia w Niemczech:

- Stypendium Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD) 2003-2004
- Stypendium Alexandra von Humboldta, 2008-2009,
- TU Darmstadt Wiedereinstiegsstipendium, 2010-2011.

Bardzo istotnym wyróżnieniem dla młodych pracowników nauki jest również stypendium Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej, które uzyskała w roku 2005. Praca doktorska Habilitantki została wyróżniona Nagrodą Prezesa Rady Ministrów.

2. OCENA OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

Osiągnięciem naukowym przedstawionym do oceny jest cykl publikacji poświęconych zagadnieniom symetrii i skalowania w opisie przepływów turbulentnych. W osiągnięciu naukowym przedstawiono analizy teoretyczne oraz przykłady zastosowań w badaniach przepływów atmosferycznych. W skład cyklu publikacji wchodzi 9 artykułów w czasopiśmie z listy JCR. Wszystkie prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego to prace współautorskie. Warto podkreślić, że Habilitantka jest pierwszą autorką w 7. pracach wchodzących w skład osiągnięcia naukowego.

Rozpoczynając ocenę osiągnięcia naukowego, należy podkreślić, że charakterystyka prac wchodzących w jego skład opisana przez Habilitantkę w autoreferacie jest przedstawiona w sposób wyjątkowo przejrzysty, zrozumiały i interesujący, co potwierdza gruntowne i wszechstronne przygotowanie dydaktyczne Habilitantki, wymienione już w poprzedniej części niniejszej recenzji.

Pomimo wielu lat badań teoretycznych, eksperymentalnych i numerycznych nie udało się sformułować jednolitej i uniwersalnej teorii turbulencji przypominającej na przykład kinetyczną teorię gazów, w której uśrednienie losowego ruchu molekuł pozwoliło uzyskać statystyczny model średnich wartości funkcji stanu. Wszelkie wysiłki sformułowania układu równań różniczkowych opisujących ewolucję momentów statystycznych parametrów przepływu, wychodząc od równań Naviera-Stokesa, prowadziły do pojawienia się nowych niewiadomych, których nie można w sposób ścisły powiązać z wielkościami średnimi. Formułowanie tego typu związków na podstawie analogii z dynamiką molekularną, czy wyników eksperymentalnych, to przedmiot modelowania turbulencji. Nie udało się sformułować uniwersalnego modelu turbulencji dla różnych rodzajów przepływów, i w zastosowaniach praktycznych, korzysta się z odpowiednich modeli dla wybranych typów przepływów, co wymaga specjalistycznej wiedzy, doświadczenia oraz walidacji wyników symulacji numerycznych wiarygodnymi danymi eksperymentalnymi. W porównaniu z klasycznym modelowaniem turbulencji, w którym równania Naviera-Stokesa są uśredniane w czasie (RANS-Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations) lub grupowo (URANS-Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations), znacznie większą uniwersalność uzyskano w przypadku metody LES-Large Eddy Simulation, zgodnie z którą równania Naviera-Stokesa są filtrowane filtrem dolnopasmowym. Filtracja wprowadza jednak również nieznaną korelację, które ujmują wpływ najdrobniejszych skal, których nie uwzględniono na siatce numerycznej. Zgodnie z hipotezą Kolmogorowa drobne skale są statystycznie niezależne od dynamiki struktur gruboskalowych, co ułatwia sformułowanie uniwersalnego modelu podsiatkowego dla różnych typów przepływów. Rozwój w dziedzinie klasycznego modelowania turbulencji jak i modelowania podsiatkowego dla metody LES ciągle trwa, pojawiają się nowe modele lub rozwijane już istniejące, testowane w coraz bardziej złożonych zastosowaniach technicznych, w których turbulencja oddziałuje z przepływami wielofazowymi, przemianami fazowymi czy reakcjami chemicznymi. Interakcja pomiędzy fazami, czy reakcje chemiczne w dużym stopniu odbywają się w obrębie struktur drobnoskalowych, stąd wiarygodność interakcji tych skal z przepływem średnim ma kluczowe znaczenie w praktycznych zastosowaniach modeli matematycznych. Klasyczne modele turbulencji i podsiatkowe metody LES opisują nieznaną korelację, które są sformułowane na podstawie ścisłych równań ruchu. Same modele jednak

nie są już sformułowane na podstawie ścisłych praw fizyki, a wynikają z analogii z innymi zjawiskami lub obserwacji eksperymentalnych. Ważne jest jednak by modele tego typu w jak najwyższym stopniu odzwierciedlały własności równań, z których wyprowadzono obiekty podlegające modelowaniu.

Turbulencja w sensie statystycznym może być opisana poprzez bezpośrednio uśredniane równań Naviera-Stokesa, co prowadzi do nieskończonego układu równań dla momentów statystycznych kolejnych rzędów, określanego jako układ równań Friedmanna-Kellera. Alternatywnie, z równań Naviera-Stokesa można wyprowadzić równania transportu funkcji gęstości prawdopodobieństwa prędkości, w których pojawiają się nieznanne funkcje wielopunktowe. W obydwu przypadkach uzyskuje się nieskończony układ równań i lepsze poznanie struktury kolejnych poziomów opisu turbulencji prowadzi do głębszego zrozumienia zjawiska turbulencji, nawet jeśli rozwiązywanie układów wielu równań różniczkowych jest niemożliwe ze względu na koszty obliczeniowe czy ograniczenia pamięci współczesnych komputerów.

Przedmiotem zainteresowania pracy badawczej Habilitantki, wyniki której zostały przedstawione w dwóch pierwszych pracach H1 i H2, wchodzących w skład osiągnięcia naukowego, była analiza równań transportu funkcji gęstości prawdopodobieństwa określanych jako nieskończony układ równań transportu Lundgren-Monina-Novikova (LMN). W pracy tej poszukiwano symetrii tego układu równań analogicznych do tych sformułowanych wcześniej w odniesieniu do układu równań Friedmanna-Kellera przez współautorów pracy H1, M. Oberlacka i A. Rostecka. Habilitantka wyprowadziła przekształcenia odpowiadające statystycznym transformacjom translacji i skalowania równań Friedmanna-Kellera dla układu równań Lundgren-Monina-Novikova (LMN). Dla transformacji funkcji gęstości prawdopodobieństwa przedstawiono interesującą interpretację fizyczną, na przykładzie przepływu w kanale płaskim, opisu współczynnika intermitencji w tego typu przepływie. Zarówno wyprowadzenie statystycznych symetrii równań LMN jak i połączenie tych symetrii z opisem intermitencji jest samodzielnym osiągnięciem Habilitantki.

Problematyka symetrii równań LMN kontynuowana była w kolejnej pracy H2, w której Habilitantka we współpracy z V. N. Grebenevem oraz M. Oberlackiem dowiodła, że pierwsze z równań hierarchii LMN nie ma dodatkowych symetrii w stosunku do równań Naviera-Stokesa oraz znanych już z pracy H1.

Kolejny kierunek badawczy został wyznaczony poprzez wyniki współautorskiej pracy Habilitantki z V. N. Grebenevem oraz M. Oberlackiem, która nie została wykazana w cyklu prac wchodzących w skład osiągnięcia badawczego. W pracy tej analizowano zagadnienia symetrii równania transportu funkcji gęstości prawdopodobieństwa wirowości w przypadku turbulencji dwuwymiarowej. Turbulencja dwuwymiarowa, w której dynamika struktur wirowych jest bardzo odmienna od zjawisk obserwowanych w przepływach trójwymiarowych, stanowi pewne przybliżenie przepływów geofizycznych, które są kolejnym kierunkiem prac badawczych Habilitantki. W pracy H5 pokazano że pierwsze równanie LMN jest niezmiennicze względem transformacji konforemnych. W pracy H6 natomiast pokazano, że niezmienniczość względem transformacji konforemnych oznacza, że pewne statystyki niehomogenicznego pola wirowości można otrzymać w wyniku transformacji statystyk wyznaczonych dla pola homogenicznego, bez konieczności ponownego rozwiązywania równań, co było samodzielnym osiągnięciem Habilitantki. Prace H5 i H6 wnoszą wkład do zrozumienia struktury równań opisujących turbulencję dwuwymiarową, jednak interpretacja fizyczna wyników tej analizy nie jest oczywista.

Kolejne prace dotyczą analizy symetrii równań opisujących atmosferyczną warstwę graniczną (AWG). Punktem wyjścia do opisu tego typu przepływu w pracy H8 była teoria Monina-Obuchowa, zakładająca stałość strumieni pędu i ciepła, pozwalająca uzyskać profile prędkości i temperatury w bliskiej odległości ziemi. W pracy H8 wyprowadzone zostały rozwiązania niezmiennicze dla prędkości, temperatury oraz strumieni pędu i ciepła dla warstwy neutralnej, gdy temperatura jest pasywnym skalarem oraz w przypadku, gdy temperatura wpływa na transport pędu pokazując, że przy założeniu stałych wartości strumieni pędu i ciepła superpozycja tych rozwiązań daje profile Monina-Obuchowa. Jednocześnie pokazano, na podstawie analizy symetrii równań, że nie jest możliwe utrzymanie założenia o homogeniczności strumieni pędu i ciepła wraz z wysokością. Konieczne jest założenie liniowej lub kwadratowej zmienności tych strumieni w funkcji wysokości dla zachowania symetrii analizowanych równań. Omawiana praca to również efekt współpracy międzynarodowej, w której samodzielnym udziałem Habilitantki było opracowanie metodyki badań oraz sformułowanie rozwiązania.

Kolejna praca jest kontynuacją badań atmosferycznej warstwy granicznej. W pracy tej habilitantka wyprowadziła lokalną teorię podobieństwa, która polegała na uwzględnieniu zmienności strumieni i zmienności skali Obuchowa z wysokością. Obie prace H8 i H9 stanowią istotny wkład w zrozumienie mechanizmów transportu pędu i ciepła w stratyfikowanej atmosferycznej warstwie granicznej.

Kolejne trzy prace H3, H4 i H7 reprezentują inny kierunek badań, który oczywiście mieści się w tematyce osiągnięcia naukowego, dotyczy bowiem bardzo praktycznych zastosowań praw skalowania w przepływach turbulentnych w metrologii atmosferycznej warstwy granicznej. W pracy H3 zaproponowano dwie różne metody pomiaru szybkości dyssypacji energii kinetycznej turbulencji na podstawie tzw. przybliżenia telegraficznego fluktuacji prędkości zmierzonych z niską rozdzielczością. Metodyka ta została samodzielnie opracowana przez Habilitantkę. Druga metoda polegająca na rekonstrukcji części widma energii turbulencji charakteryzującej drobnoskalową turbulencję na podstawie pierwszej hipotezy Kołmogorowa została opracowana przez współautorów publikacji z udziałem Habilitantki. Zaproponowane metody zostały zastosowane do wyznaczenia szybkości dyssypacji w numerycznie symulowanej atmosferycznej warstwie granicznej i porównane z klasycznymi metodami opartymi na analizie widma energii turbulencji oraz funkcji struktury w pracy H4, pokazując użyteczność zaproponowanych metod pomiarowych. Nowa metodyka pomiarowa szybkości dyssypacji kinetycznej energii turbulencji została również wykorzystana do analizy wyników badań eksperymentalnych w atmosferycznej warstwie granicznej przeprowadzonej nad obszarem północnego Atlantyku. Pomiar przeprowadzone w atmosferycznej warstwie granicznej z dwoma rodzajami chmur typu stratocumulus z silną wymianą ciepła i pary wodnej z powierzchnią oceanu wykazały obecność silnie nierównowagowej turbulencji oraz stref intermitencji. Badania eksperymentalne szybkości dyssypacji w atmosferycznej warstwie granicznej pozwoliły na nawiązanie współpracy naukowej z prof. J. C. Vassilicosem z Uniwersytetu w Lille. W ramach współpracy przeprowadzone zostaną badania efektów sił wyporu na funkcję struktury prędkości.

Podsumowując, przedstawione do oceny osiągnięcie naukowe obejmujące cykl 9. artykułów opublikowanych w prestiżowych czasopismach o zasięgu międzynarodowym wnoszą istotny wkład do charakterystyki struktury równań opisujących turbulencję w sensie statystycznym, a tym samym do zrozumienia mechanizmów transportu pędu i ciepła w przepływach turbulentnych w szczególności w przepływach geofizycznych i atmosferycznej

warstwie granicznej. Cennym uzupełnieniem prac teoretycznych jest wykorzystanie tej teorii w metrologii turbulencji w atmosferycznej warstwie granicznej.

3. UWAGI KRYTYCZNE I Dyskusyjne

Jedyną krytyczną uwagą, którą można sformułować w odniesieniu do ocenianego dorobku naukowego może być brak publikacji samodzielnych. Kariera naukowa Habilitantki po doktoracie rozwijała się jednak od początku w zespole na Uniwersytecie w Darmstadt i wcześniejsze osiągnięcia tego zespołu określiły w pewnym stopniu kierunek pracy badawczej Habilitantki na kolejne lata, co uzasadnia współautorski charakter publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego. Ponadto istotność samodzielnego wkładu Habilitantki we wszystkich publikacjach, potwierdzona przez wszystkich współautorów kompensuje z nadmiarem brak publikacji samodzielnych.

4. OCENA ISTOTNEJ AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ

Habilitantka od czasu uzyskania stopnia doktora prowadzi bardzo aktywną działalność naukową, dydaktyczną i organizacyjną. Legitymuje się bardzo istotnym dorobkiem publikacyjnym, którego parametry bibliometryczne uzasadniają ubieganie się o stopień doktora habilitowanego. Jest uznanym ekspertem w międzynarodowym środowisku naukowym, czego dowodem są wspólne publikacje oraz praca w międzynarodowych zespołach badawczych. Wykazała się również umiejętnością kierowania zespołami badawczymi pełniąc rolę liderki kilku projektów badawczych w Polsce i w Niemczech. Legitymuje się znaczącym dorobkiem w zakresie dydaktyki oraz rozwoju kadry naukowej. Była członkiem komitetów naukowych ważnych konferencji naukowych. Jest aktywna w zakresie popularyzacji nauki.

5. WNIOSEK KOŃCOWY

Prace badawcze dr inż. Marty Waclawczyk wnoszą istotny wkład do rozwoju dyscypliny nauki fizyczne, w szczególności w teorii turbulencji w atmosferycznej warstwie granicznej. Przedstawione osiągnięcia naukowe, dorobek publikacyjny, działalność dydaktyczna i organizacyjna uprawniają Ją w zupełności do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego. Dorobek ten pod każdym względem należy uznać za wyróżniający

Podsumowując, stwierdzam, że spełnione są z nadmiarem ustawowe warunki wymagane do dopuszczenia dr inż. Marty Waclawczyk do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego i wnioskuję o takie dopuszczenie.

