

Prof. dr hab. inż. Witold ELSNER
Katedra Maszyn Ciepłych
Politechnika Częstochowska
ul. Armii Krajowej 21; 42-200 Częstochowa
tel.: (034) 3250507; e-mail: witold.elsner@pcz.pl

Częstochowa, 03.08.2026

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Ahmeda H. Hanfy:

„Surface roughness effect on shock wave boundary layer interaction on transonic compressor profile”

Recenzja została opracowana na zlecenie z-cy Dyrektora ds. naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego, Polskiej Akademii Nauk, dr hab. inż. Grzegorza Żywicy prof. IMP PAN w piśmie RN.520.1.2026 z dnia 19 maja 2026 r.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska została przygotowana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Pawła Flaszyńskiego. Promotorem pomocniczym był dr inż. Piotr Kaczyński. Praca została napisana w języku angielskim, zawiera 131 stron i jest podzielona na 7 głównych rozdziałów. Na początku pracy zamieszczono streszczenia w języku angielskim i polskim, spis publikacji doktoranta związanych z tematyką pracy, podziękowania oraz spis rysunków i tabel. Zestawienia uzupełniają bardzo szczegółowa nomenklatura oraz lista algorytmów przygotowana przez doktoranta. Rozprawę kończy spis pozycji literaturowych związanych z jej tematyką. W pracy umieszczone zostały również załączniki prezentujące kolejno schemat sekcji pomiarowej (Załącznik A), dane liczbowe dotyczące pomiarów chropowatości powierzchni testowanych łopatek (Załącznik B), przygotowane algorytmy (Załącznik C), pełne dane pomiarowe warstwy przyściennej (Załącznik D) oraz opis struktury przepływu przyściennego wraz z interpretacją interakcji fali uderzeniowej z warstwą.

Praca była realizowana w ramach programu Unii Europejskiej Marie Skłodowska-Curie Actions (MSCA), nr 860909 – TEAMAero.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy.

Tematyka rozprawy dotyczy zagadnień oddziaływania fali uderzeniowej z warstwą przyścienną na powierzchni ssącej łopatki sprężarki transonicznej, z uwzględnieniem wpływu chropowatości tej powierzchni. Doktorant skupia swoją uwagę na warunkach przepływowych, które wymuszają oderwanie laminarnej warstwy przyściennej, gdzie dodatkowo w wyniku wystąpienia fali uderzeniowej następuje jego intensyfikacja. Negatywnym efektem tego zjawiska jest wzrost strat przepływowych, zawężenie pola przepływu w kanale łopatkowym lub nawet całkowite zablokowanie przepływu (ang. choking), co w konsekwencji prowadzi do obniżenia sprawności sprężarki. Tego typu warunki nasilają się przy nieoptymalnych kątach napływu, które często występują przy pozaprojektowych warunkach pracy urządzenia. Charakterystyczną cechą oddziaływania fali uderzeniowej z warstwą przyścienną jest dodatkowo niskoczęstotliwościowa niestabilność wynikająca z dynamiki pęcherza oderwaniowego, nazwana w literaturze „breathing”. W celu zmniejszenia oddziaływania tych niekorzystnych zjawisk stosuje się różne metody kontroli przepływu, zarówno aktywne, jak i pasywne. Doktorant koncentruje się na metodach pasywnych z wykorzystaniem chropowatości powierzchni. Prowadząc badania eksperymentalne, postanowił zbadać, jak chropowatość o różnych parametrach (zasadniczo analizuje wpływ wysokości chropowatości) wpływa na pęcherz oderwania laminarnego i czy taka modyfikacja powierzchni pozwoli ograniczyć straty aerodynamiczne sprężarki transonicznej. Co więcej, Doktorant postanowił lepiej poznać fizyczny mechanizm odpowiedzialny za dynamikę odrywania się warstwy

przysięciennej, niestabilność fali uderzeniowej oraz zmiany tych mechanizmów wynikające ze stosowania chropowatości powierzchni. Główną tezę pracy jest więc założenie, że chropowatość powierzchni łopatki sprężarki transonicznej o odpowiednich parametrach wpływa na oscylacje fali uderzeniowej i ogranicza rozmiar oderwania przepływu wywołanego falą uderzeniową.

Tak sformułowane tezę i cele rozprawy doktorskiej uznają za ambitne, a dzięki pogłębionemu przeglądowi literaturowemu również za prawidłowo uzasadnione. Tematyka badań oraz ich zakres zostały właściwie nakreślone i mogą stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej. Należy również stwierdzić, że tytuł rozprawy jest dobrze dobrany i właściwie oddaje jej treść. Z formalnego punktu widzenia i obecnej klasyfikacji dyscyplin naukowych rozprawa, sytuuje się w **dyscyplinie inżynierii mechanicznej**.

2. Ocena szczegółowa.

W **rozdziale 1** Doktorant na wstępie umiejscawia swój problem badawczy w szerszym kontekście globalnej polityki klimatycznej, w tym zwłaszcza konieczności redukcji emisji CO₂ oraz zwiększenia sprawności energetycznej w transporcie lotniczym. Następnie charakteryzuje zagadnienia projektowe i eksploatacyjne wentylatorów i sprężarek lotniczych. Szczegółowo omawia problematykę interakcji fali uderzeniowej z laminarną warstwą przysięcinną, a następnie przedstawia aktualny stan wiedzy na temat wykorzystania chropowatości powierzchni jako jednej z metod kontroli przepływu. Ten obszerny przegląd literaturowy pozwala mu sformułować zakres i główny cel pracy. W tym miejscu chciałbym zwrócić uwagę, że wedle Ustawy rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, sformułowane w oparciu o krytyczny przegląd literatury, i ten wymóg został tutaj spełniony. Wysoko oceniam zarówno trafność doboru analizowanych zagadnień, jak i logiczną kolejność ich prezentacji.

Rozdział 2 poświęcony jest omówieniu stanowiska badawczego oraz zastosowanych metod pomiarowych. Opis zaczyna się od charakterystyki transonicznego tunelu aerodynamicznego o otwartym obiegu typu Eiffla będącego na wyposażeniu IMP PAN w Gdańsku. Tunel ten pracuje w trybie przerywanym, a zbiorniki próżniowe znajdujące się na wyposażeniu stanowiska zapewniają do 20 sekund ciągłej pracy przy liczbie Macha $Ma = 2.5$. Najważniejszym elementem, „sercem”, tunelu jest sekcja pomiarowa zaprojektowana i wykonana w ramach projektu europejskiego TFAST. W sekcji o wymiarach 100 x 100 mm zainstalowano dwa dwuwymiarowe (2D) profile wentylatora silnika lotniczego tworzące kanał łopatkowy. Ponieważ w dalszej części rozprawy Doktorant zamieszcza wyniki badań, w których dostosowuje ustawienia geometrii sekcji pomiarowej do wymagań przepływowych, dodatkowy komentarz i uwagi szczegółowe zamieszcze również w kolejnej części recenzji.

Ze względu na prędkości okołodźwiękowe, stosunkowo krótki czas pomiaru, jak również chęć uzyskania kompleksowej oceny struktury przepływu, niezbędne jest zastosowanie wybranych technik pomiarowych. W kolejnej części rozdziału znajduje się opis technik i aparatury zastosowanej przez Doktoranta. W celu scharakteryzowania warunków wlotowych i przepływowych w całej sekcji zastosowano system pomiaru ciśnienia. Szczególne znaczenie w pomiarach, w tym w lokalizacji fali uderzeniowej w obszarze przysięcinnym odegrała grupa czujników powierzchniowych rozmieszczonych wzdłuż dolnego profilu łopatkowego. W celu jakościowej oceny stanu warstwy przysięciennej, identyfikacji, lokalizacji oraz wizualnej analizy kluczowych zjawisk, w tym obszaru oderwania zastosowano metodę wizualizacji olejowej. Natomiast pełny, nieinwazyjny wgląd w to, co dzieje się wewnątrz całego kanału pomiarowego, daje dopiero połączenie wizualizacji olejowej z systemem optycznym Schlierena. Doktorant z pełną wiedzą i świadomością wykorzystywał ten system. Pozwolił mu on na analizę średniego położenia fali uderzeniowej w kanale oraz jej kształtu. Dodatkowo rejestracja obrazów z wysoką częstotliwością pozwoliła mu, co jest omówione szczegółowo w zasadniczej części pracy (rozdział 6), uchwycić niestacjonarność fali i zmianę tej niestacjonarności pod

wpływem chropowatości powierzchni. Najbardziej zaawansowanym i wymagającym systemem pomiarowym był system anemometrii laserowej LDA (Laser Doppler Anemometry). Aparatura ta została wykorzystana do szczegółowych pomiarów prędkości w kilku trawersach, zarówno na wlocie jak i w warstwie przyściennej. Z zamieszczonego opisu wynika, że Doktorant ma świadomość wymagań oraz ograniczeń w stosowaniu tej metody pomiarowej, zwłaszcza przy pomiarach w przepływach transonicznych. W takich warunkach kluczowym wyzwaniem jest dokładność pomiaru prędkości cząstek posiewu oraz błąd wynikający z ich rozmiaru i masy, co odzwierciedla się poprzez liczbę Stokesa.

Uważam, że metody pomiarowe zostały dobrze dobrane, ponieważ dostarczają komplementarnej informacji na temat struktury przepływu, warstwy przyściennej oraz zjawisk falowych. Każda z metod wymaga kalibracji i precyzyjnych nastaw, aby uzyskać wiarygodne i powtarzalne wyniki. Najbardziej wymagająca jest metoda LDA, w której musi być zapewniona min. jakość posiewu cząstek, odpowiednia moc światła w przestrzeni pomiarowej i skalibrowana optyka.

Ponieważ zasadniczym celem pracy było zbadanie wpływu chropowatości powierzchni na warstwę przyścienną, niezbędnym zadaniem było przygotowanie kilku modeli łopatek wentylatora oraz przeprowadzenie badań parametrycznych chropowatości ich powierzchni. Badania te zrealizowano dwuetapowo. W pierwszym kroku wstępna ocena kształtu profilu oraz dwuwymiarowa charakterystyka chropowatości zostały przeprowadzone w Instytucie Technologii Produkcji i Materiałów Politechniki Gdańskiej, natomiast w drugim bardziej szczegółowe badania topografii powierzchni zostały wykonane w Instytucie Mechaniki Płynów (ISM) na Politechnice w Dreźnie. Opisowi tych prac poświęcony jest **rozdział 3**, w którym Doktorant szczegółowo charakteryzuje poszczególne modele łopatek, zwracając uwagę na powierzchniowy rozkład i jednorodność chropowatości oraz wyznacza znane z literatury parametry. Istotną informacją dla dalszych badań jest zwłaszcza poziom współczynnika chropowatości Sz/δ (gdzie δ to lokalna grubość warstwy przyściennej), który dla referencyjnego profilu P4 został oszacowany na ok. 0.124. Na podstawie tego rozdziału należy uznać, że Doktorant wykazał się pogłębioną wiedzą na temat badań powierzchniowych.

Kolejna część pracy (**rozdział 4**) koncentruje się na udoskonaleniu przetwarzania obrazów pochodzących z dwóch kluczowych metod wizualizacyjnych tj: metody Schlierena oraz wizualizacji przepływu powierzchniowego za pomocą techniki olejowej. W tym celu Doktorant wykorzystał najnowsze osiągnięcia w dziedzinie przetwarzania obrazu i sygnałów, aby znacznie zwiększyć możliwości analizy rejestrowanych wyników pomiarów. Dużą wartość ma zwłaszcza wprowadzona do analizy obrazów schlierenowskich, i szczegółowo scharakteryzowana, metoda rozkładu ortogonalnego (Proper Orthogonal Decomposition - POD), która pozwala na wyznaczanie baz ortonormalnych oraz ekstrakcję dominujących struktur energetycznych. W tym przypadku metoda POD umożliwiła precyzyjne określenie częstotliwości oscylacji fal uderzeniowych oraz ocenę, jak struktura fali uderzeniowej wpływa na dynamikę przepływu. Ważnym uzupełnieniem stosowanych narzędzi badawczych jest również opracowany algorytm detekcji i śledzenia w czasie położenia i kształtu fal uderzeniowych. W tym rozdziale zwraca również uwagę opis zaproponowanej przez Doktoranta nowatorskiej metody korekcji perspektywy oraz spłaszczania obrazu rejestrowanego kamerą w celu poprawnej analizy wyników wizualizacji olejowej. Aby zwiększyć przydatność tej metody, zastosowano dwa różne obiektywy, niezależnie od położenia kamery i odległości od okna. Zawartość rozdziału ponownie potwierdza, że Doktorant posiada umiejętności w posługiwaniu się złożonymi technikami pomiarowymi, oraz posiada wiedzę na temat ich ograniczeń.

Rozdział 5 poświęcony jest analizie wrażliwości lokalizacji i ustawienia poszczególnych elementów sekcji pomiarowej w celu ilościowego określenia niepewności związanej z możliwymi zmianami zarówno parametrów geometrycznych palisady, jak i warunków eksploatacyjnych. Celem było osiągnięcie założonej wartości liczby Macha jak również docelowej struktury fali uderzeniowej.

Przykładowo wykazano, jak duże znaczenie ma precyzyjne ustawienie profilu względem sekcji pomiarowej aby uzyskać wymagany kąt natarcia. Jak wykazano, obrót dolnego profilu o zaledwie $0,6^\circ$ w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara istotnie wpływa nie tylko na warunki panujące w obszarze wlotowym palisady, ale także zasadniczo zmienia konfigurację całego pola przepływu transonicznego. Pozostałe systematyczne badania, w tym, wpływu położenia górnego profilu, intensywności odsysania w górnej części sekcji pomiarowej, odsysania na bocznych ścianach w celu ograniczenia oddziaływania przepływu narożnego i zwiększenia obszaru 2D, pozwoliły na uzyskanie stabilnych i powtarzalnych warunków przepływowych zgodnych z założeniami projektowymi. Jest to również bardzo rozbudowany fragment pracy stwarzający solidne podstawy do zasadniczych badań opisanych w kolejnym rozdziale.

Najważniejszym, z punktu widzenia głównego celu pracy, jest **rozdział 6**, prezentujący wyniki badań wpływu chropowatości powierzchni na oddziaływanie fali uderzeniowej z laminarną warstwą przyścienną i laminarnym pęcherzem oderwania. Rozdział ten zaczyna się od opisu ponownej oceny jakości montażu i ustawienia wybranych profili do końcowych badań, które realizowano głównie w oparciu o porównania rozkładów izentropowej liczby Macha. Kluczowe wnioski zostały sformułowane dla trzech profili o zadanych typach chropowatości tj, gładkiej, pośredniej i chropowatej oznaczonych odpowiednio P1, P3 i P4. Uśrednione obrazy uzyskane metodą Schlierena wykazały jakościowy wpływ zwiększającej się chropowatości powierzchni na strukturę fali uderzeniowej, co było obserwowane jako rozmycie fali przejściowej uderzeniowej (tylnej części fali λ). Doktorant wskazuje, że obserwowany efekt może być wynikiem narastającej niestabilności i zwiększonej amplitudy oscylacji fali, która pomiędzy P1 i P43 wzrosła o ponad 40%.

W celu wyjaśnienia mechanizmu fizykalnego tych zmian Doktorant przeprowadził analizę obrazów schlierenowskich rejestrowanych z wysoką częstotliwością, a wyniki przedstawił na rozkładach funkcji gęstości widmowej mocy (PSD). Przedstawiona analiza w sposób jednoznaczny wskazuje, że widmo mocy, zwłaszcza dla największej chropowatości jest zdominowane przez składowe niskoczęstotliwościowe z maksimum około 10 Hz, co może być powiązane ze zjawiskiem pulsowania pęcherza oderwania (ang. breathing). W wszystkich przypadkach zidentyfikowano również wysokoczęstotliwościowe pasmo, w przedziale 270 – 380 Hz. Doktorant sugeruje, że ta częstotliwość jest wywołana zwrotnym sprzężeniem akustycznym. Do tych dwóch wniosków odnoszę się w kolejnej części recenzji. Uzupełniająca analiza wizualizacji olejowej potwierdziła zmianę topologii pęcherza oderwania pod wpływem chropowatości, w tym zmniejszenie jego rozmiaru, zwłaszcza dla przypadku P4, i to nie tylko w kierunku wzdłuż przepływu, ale również w kierunku poprzecznym.

Dodatkowych informacji dostarczyły pomiary warstwy przyściennej z wykorzystaniem techniki LDA. Wybrane zostały trzy trawersy, tuż przed falą uderzeniową ($0.25\ x/c$), za falą uderzeniową w strefie przylgnięcia warstwy za pęcherzem oderwania ($0.60\ x/c$) i w obszarze już w pełni rozwiniętego przepływu turbulentnego ($0.75\ x/c$). Już dla trawersu $0.25\ x/c$, tam gdzie warstwa przyścienna jest jeszcze bardzo cienka, uwidaczniają się pewne różnice w kształcie profili, a profil dla najwyższej chropowatości (P4) charakteryzuje się największym gradientem przy ścianie. Wyniki oszacowanej grubości warstwy przyściennej oraz wartości naprężenia stycznego nie są zbyt spójne. Może to wynikać, że zbyt małej rozdzielczości pomiarów tuż przy ścianie. Pojawia się również pytanie, czy nie występuje w tym przypadku niewielkie oderwanie zakrawędziowe, które może mieć pewien wpływ na stan warstwy przyściennej w tej lokalizacji. Profile prędkości średniej oraz wyznaczone parametry warstwy przyściennej dla trawersu $0.60\ x/c$ wskazują, że dla przypadku P4 warstwa się szybciej turbulizuje, co jest spójne z wynikami omawianymi powyżej. Rozdział ten zawiera wiele szczegółowych wyników i interesujących obserwacji, które trudno byłoby wymienić. Ograniczę się tylko do wniosku wynikającego z analizy profili i parametrów warstwy w trawersie $0.75\ x/c$. Grubość warstwy przyściennej oraz miara straty pędu przyjmują najniższe wartości dla przypadku z dużą chropowatością. Ten nieintuicyjny wynik został jednak trafnie wyjaśniony jako złożony efekt historii przepływu, w

którym istotną rolę odgrywają nie tylko zwiększona lokalna strata tarcia w wyniku chropowatości, ale również wyraźnie zmniejszona strefa oderwania, także wywołana chropowatością.

Praca została podsumowana w **rozdziale 7** zawierającym nie tylko kluczowe wnioski wraz z fizykalną interpretacją wyników, ale również wskazuje rekomendacje dotyczące dalszych kierunków badań nad stosowaniem chropowatości w kontroli przepływu przez kanały łopatek sprężarek transonicznych.

3. Uwagi rzeczowe i redakcyjne

Nie mam zasadniczych uwag krytycznych do pracy a poniżej prezentuję jedynie uwagi o charakterze dyskusyjnym.

- Jak wskazano w pracy poziom intensywności turbulencji wlotowej wynosił 2.4-2.7%. Dlaczego wybrano taką wartość? Czy jest ona zbliżona do rzeczywistych warunków pracy wentylatora silnika lotniczego?
- System pomiarowy LDA jest bardzo złożoną techniką pomiarową. Prosiłbym o uzupełniające informacje dotyczące ustawienia optyki i lasera, kalibracji objętości pomiarowej, doboru posiewu itp. Jak kontrolowano jakość posiewu podczas pomiarów?
- Przy pomiarach LDA dla trawersu 0.25 x/c zaobserwowano niejednoznaczne wyniki zwłaszcza przy ścianie. Prosiłbym o komentarz, czy wynika to ze zbyt małej rozdzielczości pomiarowej tuż przy ścianie, czy może być to efekt obecności małego oderwania zakrawędziowego? A może jest to związane z zjawiskami obserwowanymi w dynamicznej analizie obrazów Schlierena?
- W Appendix D znajdują się dane dotyczące składowej fluktuacyjnej prędkości. Dlaczego w głównej części pracy nie przeprowadzono analizy tych danych?
- Czy przeprowadzono analizę częstotliwościową sygnałów rejestrowanych z wykorzystaniem LDA? Czy było przeprowadzone porównanie z wynikami zamieszczonymi w rozdziale 6.3.?
- Najważniejsze wnioski dotyczą min. zidentyfikowanej niskoczęstotliwościowej oscylacji, która związana być może z pulsacją laminarnego pęcherza oderwania. Czy istnieje wiarygodne potwierdzenie tej diagnozy?
- Drugie charakterystyczne pasmo częstotliwości to przedział 270 - 380 Hz. W pracy sformułowano wniosek, że jest to spowodowane zwrotnym sprzężeniem akustycznym. Na jakiej podstawie postawiono taką diagnozę? Czy w celu weryfikacji tego wniosku przeprowadzono pomiary akustyczne?
- Proszę wyjaśnić, jak chropowatość powierzchni, a właściwie wywołana nią turbulencja przyścienna, może wpływać na akustyczne sprzężenie zwrotne? Wiadomym jest, że chropowatość powierzchni może zakłócać niestabilności Tollmiena-Schlichtinga lub Kelvina-Helmholtza, a właściwie dobrana może skutecznie osłabić pętlę sprzężenia zwrotnego. Ja w wynikach takiego efektu wyraźnie nie widzę.
- Błąd edycyjny: na stronie 24 w linijce 4 i 5 powtórzone jest to samo sformułowanie

4. Główne walory rozprawy

Rozprawa doktorska dotyczy oddziaływania fali uderzeniowej z warstwą przyścienną na powierzchni ssącej łopatki sprężarki transonicznej silnika lotniczego, z uwzględnieniem wpływu chropowatości tej powierzchni. Ma ona więc istotne znaczenie zarówno z praktycznego, jak i poznawczego punktu widzenia. Jest to praca eksperymentalna, w której niezmiernie ważny jest warsztat badawczy, jakim powinien dysponować Doktorant. W przypadku recenzowanej rozprawy doktorskiej muszę stwierdzić, że wiedza dotycząca badanych zjawisk oraz umiejętność posługiwania się zaawansowaną aparaturą stoją na wysokim poziomie.

Doktorant, na podstawie analizy zgromadzonego materiału badawczego, potwierdził postawioną tezę, wykazując, że chropowatość powierzchni łopatki sprężarki transonicznej wpływa na charakter oscylacji fali uderzeniowej oraz może ograniczać rozmiar obszaru oderwania przepływu wywołanego jej oddziaływaniem z warstwą przyścienną. Jednocześnie wykazał, że skuteczność zastosowanego rozwiązania zależy od właściwego doboru parametrów chropowatości, który powinien zapewniać kompromis pomiędzy zachowaniem wysokiej sprawności aerodynamicznej a poprawą stabilności dynamicznej fali uderzeniowej.

Rozprawa została przygotowana z dużą starannością, zarówno pod względem merytorycznym, jak i edycyjnym. Zawiera wszystkie niezbędne elementy właściwe dla pracy naukowej, a jej dokumentacja graficzna prezentuje bardzo wysoki poziom pod względem jakości oraz czytelności. Na szczególne podkreślenie zasługuje sposób opracowania przeglądu literatury. Wysoko oceniam zarówno trafność doboru analizowanych zagadnień, jak i logiczną kolejność ich prezentacji. Szczegółowy opis stanowiska badawczego oraz zastosowanych metod pomiarowych stanowi istotną wartość rozprawy. Przedstawione informacje mogą stanowić wartościowy materiał referencyjny dla kolejnych badaczy podejmujących problematykę oddziaływania fali uderzeniowej z warstwą przyścienną.

Na koniec należy podkreślić, że Doktorant jest współautorem dwóch publikacji naukowych zamieszczonych w indeksowanych czasopismach, dwóch artykułów konferencyjnych oraz jednego rozdziału w monografii. Miał więc również okazję prezentować i poddawać wyniki swojej pracy krytycznej ocenie w środowisku krajowym i międzynarodowym. Drobną uwagę: w dwóch przypadkach nazwisko doktoranta zawiera błąd literowy.

5. Uwagi końcowe

Przedstawiona do recenzji praca dotyczy aktualnej tematyki badawczej i jest istotna z praktycznego i poznawczego punktu widzenia. Zawartość pracy oraz jej poziom merytoryczny świadczą o tym, że Doktorant dysponuje wiedzą oraz odpowiednim doświadczeniem w rozwiązywaniu problemów naukowych. Zawarte w części 3 uwagi mają wyłącznie charakter dyskusyjny, wobec czego stwierdzam, że przedłożona do oceny rozprawa doktorska stanowi wartościowe opracowanie naukowe, a wyniki badań istotnie wzbogacają stan wiedzy dotyczący oddziaływania fali uderzeniowej z warstwą przyścienną w kanałach sprężarki transonicznej.

Reasumując, przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Ahmeda Hanfy jest opracowaniem naukowym o odpowiedniej wartości poznawczej, co pozwala mi stwierdzić, że spełnia ona wymogi ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. 2022 poz. 574 z późn. zm.) oraz wnoszę o dopuszczenie pracy 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 mgr inż. Ahmeda Hanfy.

Podpis jest prawidłowy

Dokument podpisany przez Witold
Elsner; Politechnika Częstochowska
Data: 2026.08.06 09:09:20 CEST