Dr. hab. inż. Władysław Kryłłowicz , prof. PŁ Łódź, 15-01-15

RECENZJA

Pracy doktorskiej mgra inż. Zbigniewa Pałuckiego

pt.” Analiza przepływu gazu rzeczywistego przez nastawialny dyfuzor łopatkowy promieniowej maszyny sprężającej”

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie p. Dziekana Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej o sygnaturze DR-63/45/01/2014 w oparciu o uchwałę Rady Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej z dnia 28.11.2014. Dyscypliną rozprawy doktorskiej jest budowa i eksploatacja maszyn.

Katedra Techniki Cieplnej Politechniki Poznańskiej, przy której afiliowany jest Doktorant, od wielu już lat konsekwentnie zajmuje się rozwijaniem szeroko rozumianej techniki dmuchaw i sprężarek promieniowych. Dmuchawy i sprężarki wyposażone w układy przepływowe opracowane w Politechnice Poznańskiej są następnie wdrażane do produkcji w zakładach H. Cegielskiego SA w Poznaniu. Dmuchawy HCP pracują z powodzeniem w wielu instalacjach przemysłowych oraz komunalnych , zarówno w kraju jak i za granicą.

W rozdziale drugim rozprawy , zatytułowanym „ Cele i tezy pracy”, Doktorant stwierdza, że , cyt. „ Głównymi celami pracy były badania charakterystyk aerodynamicznych i charakterystyk pracy stopnia sprężającego wyposażonego w nastawialny dyfuzor łopatkowy”. Natomiast główne tezy pracy dotyczą zarówno zagadnień aerodynamiki dyfuzora łopatkowego, jak też i oceny przydatności obliczeń CFD w dziedzinie projektowania i analizy przepływów w dyfuzorach.

Oceniając dobór tematyki rozprawy doktorskiej mgra inż. Zbigniewa Pałuckiego od strony czysto naukowej należy stwierdzić, że Doktorant wpisuje się w główny nurt badań prowadzonych aktualnie zarówno przez czołowe ośrodki naukowe zajmujące się cieplnymi maszynami przepływowymi jak i wiodące firmy produkujące sprężarki i dmuchawy promieniowe. . Zagadnienie efektywności pracy dyfuzora ułopatkowanego (czy też: łopatkowego zgodnie z terminologią stosowana przez Autora) jest o tyle istotne, że dyfuzor w znacznej mierze określa zakres pracy użytecznej stopnia sprężarkowego oraz determinuje jego sprawność w każdym punkcie zbioru charakterystyk. Nie można zbudować poprawnie działającego stopnia sprężarki promieniowej bez sprawnego aerodynamicznie dyfuzora.

Recenzowana praca liczy 120 numerowanych stron oraz czternastostronicowy dodatek zawierający wyniki obliczeń numerycznych. Praca podzielona jest na siedem rozdziałów

plus wykaz oznaczeń i spis literatury. Strukturę podziału treści pracy oceniam jako logiczną, z pewnym zastrzeżeniem dotyczącym opisu stanu wiedzy w dziedzinie dyfuzorów. Autor posługuje się sprawnie argumentacją naukową. Ilość pomyłek edycyjnych jest znikoma i nie będą one dalej wyszczególniane – praca jest zredagowana pod względem edycyjnym starannie, a szata graficzna wzorowa. Nieco zbyt lakonicznie został potraktowany spis literatury – zawiera on jedynie podstawowe (niezbędne) pozycje. To samo dotyczy wykazu oznaczeń , który nie obejmuje szeregu symboli użytych w tekście (dotyczy to np., liter greckich). Na szczęście większość tych symboli jest opisana w tekście pracy, co nie jest utrudnia analizy treści poszczególnych rozdziałów rozprawy.

Zakres pracy jest dość obszerny , jak na rozprawę doktorską. Pan magister Pałucki dokonał nie tylko badań eksperymentalnych na stoisku badawczym, ale też przeprowadził bardzo skomplikowane obliczenia numeryczne. Przeprowadzono je w oparciu o komercyjny kod ANSYS CFX. Obliczenia te objęły również zagadnienia niestacjonarne, co znacznie podnosi ich rangę. Recenzowana praca nosi zatem charakter teoretyczno-eksperymentalny.

Doktorant przyjął bardzo ciekawą koncepcję eksperymentu, polegającą na tym, że pomiary ciśnień statycznych przeprowadza za pomocą klasycznych przetworników o dużej stałej czasowej, natomiast pomiary rozkładów prędkości w obrębie kanałów dyfuzora dokonywane są przy pomocy anemometru laserowego typu dopplerowskiego. W tym systemie pomiarowym brak jest natomiast pomiarów temperatur całkowitych oraz pomiarów ciśnień dynamicznych, do wymagałoby zabudowy odpowiednich sond. Sondy takie musiałyby charakteryzować się małymi wymiarami czułek, ze względu na relatywnie małe kanały przepływowe dyfuzora. Pewną słabością koncepcji eksperymentu przyjętej przez Doktoranta jest praktyczna niemożność przeprowadzenia weryfikacji wyników obliczeń numerycznych niestacjonarnych (zamieszczonych w Dodatku do pracy).

Tym niemniej, przyjęty system oprzyrządowania umożliwia z powodzeniem realizacje założonego programu badań. Należy podkreślić, że w efekcie końcowym uzyskano zdumiewająco dobrą zgodność wyników symulacji numerycznych oraz pomiarów, co uwidacznia rysunek 129 (rozdział siódmy, strona 116). Na rysunku tym przedstawiono porównanie charakterystyk sprawności stopnia dla różnych kątów ustawienia łopatek dyfuzora, uzyskanych drogą obliczeń CFD oraz drogą eksperymentu. To porównanie w pełni uzasadnia tezy pracy sformułowane w Rozdziale drugim.

Chciałem podkreślić, że opisane w pracy pomiary rozkładów prędkości w dyfuzorze sprężarki promieniowej przy pomocy anemometru laserowego są pierwszymi tego rodzaju przeprowadzonymi w Polsce.

W wyniku analizy rozprawy mgra inż. Zbigniewa Pałuckiego wynikła konieczność sformułowania szeregu kwestii, wymagających moim zdaniem wyjaśnienia :

1. W tytule pracy zawarto sformułowanie , cyt. „ analiza przepływu gazu rzeczywistego”. Gaz rzeczywisty w sensie termodynamicznym rozumiany jest dwojako: jako rzeczywisty termicznie oraz rzeczywisty kalorycznie. Doktorant na stronie 17-ej (rozdział pierwszy) definiuje pojecie gazu rzeczywistego termicznie . powołując się na równanie wirialne stanu. Ale gaz rzeczywisty w sensie kalorycznym charakteryzuje się tym, że jego ciepło właściwe C_p jest funkcją zarówno ciśnienia i temperatury. To samo dotyczy też i współczynnika przewodności cieplnej oraz przede wszystkim lepkości. Standardowy kod ANSYS wymaga dołączenia osobnego bloku (np. na bazie kodu REFPROP) przygotowującego dla kolejnej iteracji konieczne dane termodynamiczne. Taka procedura jest niezbędna dla niektórych czynników, np. stosowanych w układach ORC bądź chłodniczych. Co prawda dla przedmiotowego zakresu zmian parametrów powietrza wpływ zmienności C_p nie będzie zbyt duży, a wpływ zmian lepkości wręcz pomijalny , ale istnieje tu pewna sprzeczność formalna. Tym bardziej, że Autor używa w pracy szeregu zależności (np.dla sprawności politropowej) odnoszących się do gazu idealnego.

   Dlatego też uważam, że zręczniej byłoby użyć sformułowania „ przepływ gazu lepkiego „, a nie „ przepływ gazu rzeczywistego”

2. W Wykazie Oznaczeń zabrakło moim zdaniem bardzo ważnego symbolu, jakim jest liczba Macha. W przepływie opóźnionym , jaki występuje w kanale dyfuzora ułopatkowanego, zmiana przepływu z nadźwiękowego na poddźwiękowy odbywa się poprzez falę uderzeniową . Należy pamiętać, że dla typowego profilu poddźwiękowego istniej pojęcie tzw. „krytycznej liczby Macha”. Oznacza tu, że przy wlotowej liczbie Macha np. rzędu 0,85 w pewnym miejscu kanału powstanie lokalnie fala uderzeniowa. Co prawda profile łopatek badanego dyfuzora są dość cienkie, co podwyższa krytyczna liczbę Macha, a według moich obliczeń dyfuzor powinien pracować w całym rozpatrywanym polu pracy w obszarze poddźwiękowym, ale ten problem wymaga pewnego komentarza. W tym celu konieczne będzie podanie granicznych wlotowych liczb Macha występujących w zbiorze punktów pracy.

3. Stosowanie techniki pomiarów anemometrem laserowym (niezależnie , czy jest to anemometr typu PIV czy dopplerowski używany przez Doktoranta) związane jest zawsze z problemem skończonych wymiarów przestrzeni pomiarowej i ich wielkością w stosunku do rzeczywistych wymiarów (w naszym przypadku- szerokości i wysokości kanału dyfuzora). Oznacza to, że pomiar prowadzony w pobliżu ścianki jest obarczony bardzo dużą niepewnością. To zagadnienie jest szeroko omawiane w literaturze przedmiotu. W związku z powyższym proszę Doktoranta o ocenę dokładności pomiarów anemometrycznych, zgodnie z fundamentalną zasada metrologiczną, że na pomiar składają się- wynik pomiaru oraz jego niepewność.

Innym zagadnieniem godnym przeprowadzenia dyskusji jest problem zmiany położenia krawędzi natarcia łopatki (zmiana promienia wlotowego) w funkcji kąta ustawienia profilu. Co prawda Autor porusza ten problem (rozdział 5, str. 38), ale konsekwencje tego stanu rzeczy są znaczące. Zmiana promienia wlotowego oznacza, że zmienia się zarówno stopień turbulencji jak pole przepływu przed krawędzią natarcia łopatki dyfuzora. Ten problem został już poruszony w piśmiennictwie przedmiotu, i wyciągnięto odpowiednie wnioski, umieszczając łopatki na mimośrodowych tarczach umożliwiających zmianę kąta ustawienia profilu przy zachowaniu stałego promienia wlotowego. W taki sposób zostały skonstruowane stoiska badawcze w RWTH Aachen a doktorant zamieścił w wykazie literatury publikacje z tej uczelni. (Uwagi sformułowane w tym akapicie nie są zarzutami do rozprawy, a jedynie wskazaniem kierunku dyskusji).
Rozprawę doktorską p. Pałuckiego pomimo opisanych powyżej pewnych braków i niedociągnięć oceniam bardzo wysoko. Niezmiernie istotnym dla wartości pracy jest fakt prowadzenia badań na rzeczywistej maszynie, a nie na stopniu modelowym , co radykalnie zmniejsza niepewności związane np. z koniecznością uwzględnienia efektu skali, tak istotnego w aerodynamice. Autor wykazał się zarówno umiejętnością prowadzenia eksperymentu z wykorzystaniem zaawansowanej techniki pomiarowej , jak i umiejętnością wykonywania obliczeń CFD , co wymaga zwłaszcza dla obliczeń niestacjonarnych dużego doświadczenia w zakresie numeryki.

Wniosek końcowy:

Po przeprowadzeniu analizy merytorycznej oraz oceny edycyjnej rozprawy doktorskiej p. mgra inż. Zbigniewa Pałuckiego , zatytułowanej „ Analiza przepływu gazu rzeczywistego przez nastawialny dyfuzor łopatkowy promieniowej maszyny sprężającej „ stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia bez żadnych zastrzeżeń wymogi określone w odpowiedniej Ustawie o stopniach i tytule naukowym. W związku z tym stawiam wniosek o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony Jego dysertacji.

Ponadto stawiam wniosek o wyróżnienie pracy , zgodnie z procedurami obowiązującymi na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

Władysław Kryłłowicz

(podpis nieczytelny)