Dr hab. inż. Paweł Flaszyński, 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, 2023-01-30

Recenzja pracy doktorskiej

mgra inż. Piotra Wiśniewskiego
pt.: „Numerical modelling of phase-change processes in humid air transonic flows"

Recenzja pracy doktorskiej została przygotowana na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej oraz pisma, nr RIE-BD.512.59.2022 z dnia 15.11.2022, przesłanego przez Pana prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina, Przewodniczącego Rady.

1. Charakterystyka pracy i uwagi ogólne

Praca doktorska Pana mgra inż. Piotra Wiśniewskiego została napisana w języku angielskim i zgodnie z tytułem koncentruje się na modelowaniu numerycznym zjawisk związanych z kondensacją i parowaniem w przepływie transonicznym powietrza wilgotnego.

Przepływ czynnika z przemianami fazowymi jest procesem zachodzącym w układach energetycznych, w opływie zewnętrznym ciał (np. lotnictwo) lub w otaczającym środowisku (np. przepływ w atmosferze). Zagadnienia przepływu z dużymi prędkościami i kondensacją w układach energetycznych, a w szczególności w ostatnich stopniach części niskoprężnej turbin parowych są badane od połowy XX wieku. Badania przepływu z kondensacją nabierały szczególnego znaczenia wraz z rozwojem energetyki opartej na paliwach kopalnych oraz energetyki jądrowej, gdzie turbiny kondensacyjne były i są integralnym elementem systemu. Rozwój metod eksperymentalnych i numerycznych koncentrował się głównie na zagadnieniach przepływu i kondensacji w obszarze czystej pary. Prace inspirowane rozwojem turbin parowych dotyczyły zagadnień kondensacji w przepływie poddźwiękowym oraz naddźwiękowym, gdzie fala uderzeniowa oraz jej interakcja z warstwą przyścienną są istotnymi źródłami strat oraz efektów niestacjonarnych prowadzących do obciążeń dynamicznych układu. Rozwój metod oraz wzrost doświadczenia w zakresie modelowania czystej pary, a także znaczenie techniczne przepływu mieszanin powietrzno-parowych wpływa na konieczność poszukiwania efektywnych i dokładnych metod modelowania kondensacji i parowania w przepływie tej mieszaniny. Gdy mieszanina jest wolna od jakichkolwiek zanieczyszczeń, to kondensacja zachodzi na naturalnie wytworzonych ośrodkach kondensacji, ale jeśli w przepływie znajdują się zanieczyszczenia (np. pył, sole, produkty korozji) to kondensacja zachodzi na sztucznych (obcych) zarodkach. W pierwszym przypadku mówimy o kondensacji homogenicznej, a w drugim o heterogenicznej. O ile w układach zamkniętych można stosować systemy filtracyjne obniżające zawartość cząstek stałych, to w przypadku przepływu w powietrzu atmosferycznym nie jest to możliwe lub bardzo ograniczone. Dotyczy to opływu elementów statków powietrznych lub wlotów napędów lotniczych, łopatek wentylatora silnika lotniczego

lub sprężarki, gdzie na stronie ssącej łopatki może dojść do kondensacji, a następnie odparowania. Zagadnienia kondensacji i odparowania są szczególnie istotne w przepływach okołodźwiękowych, gdzie dochodzi do silnej ekspansji i kondensacji, a następnie kompresji na fali uderzeniowej i odparowaniu. W takim przypadku procesy są szybko-zmienne, a dodatkowo interakcja fali uderzeniowej z warstwą przyścienną wpływa na trudności modelowania numerycznego i poprawnego przewidywania tego typu zjawisk. Znaczenie dokładności modelowania przepływu transonicznego z efektami kondensacji rośnie także ze względu na rozwój układów ORC na czynniki mokre, gdzie liczba Macha przekracza wartości 1 w turbinie.

Wobec powyższego można stwierdzić, że wybrana tematyka ma istotne znaczenie poznawcze i aplikacyjne oraz spełnia kryteria prac w ramach dyscypliny „inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka".

Doktorant wyznaczył 4 cele swojej pracy:

1) analiza i wybór dostępnych modeli kondensacji do modelowaniu transonicznego przepływu powietrza wilgotnego,
2) badania eksperymentalne przepływu powietrza wilgotnego w dyszy symetrycznej i asymetrycznej przy niskiej prędkości ekspansji,
3) badanie wpływu przemian fazowych na charakterystykę nowoczesnych maszyn wirnikowych,
4) propozycja poprawy efektywności metody numerycznej modelowania przepływu z kondensacją.

Praca doktorska Pana mgra inż. Piotra Wiśniewskiego została zredagowana na 158 stronach. Materiał dyskutowany w pracy ujęto w 7 rozdziałach. Pierwszy rozdział poprzedzony jest spisem symboli, natomiast spis literatury (72 pozycje), rysunków i tabel jest zamieszczony na końcu pracy.

W pierwszym rozdziale Doktorant przedstawia wymienione powyżej cele i argumentuje znaczenie dokonanego wyboru badanego zagadnienia. W dalszej części rozdziału omówiony jest aktualny stan wiedzy na temat przepływu z przemianami fazowymi, głównie w zakresie prędkości okołodźwiękowych, gdzie istotnym elementem struktury przepływu jest fala uderzeniowa. Doktorant podsumowuje dotychczas prowadzone badania eksperymentalne oraz charakteryzuje wykorzystywane modele obliczeniowe wskazując na dominujący udział metod bazujących na podejściu jednopłynowym, których użycie jest uzasadnione gdy powstające krople są dostatecznie małe, podobnie jak udział pary wodnej, a ich wpływ na strukturę przepływu jest pomijalny. Należy podkreślić istotny wkład w rozwój metod numerycznego modelowania i badań eksperymentalnych przepływu pary mokrej jaki wniosły prace realizowane w Katedrze (poprzednio Instytucie) Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej, a wykonane przez Doktoranta badania stanowią nowy znaczący element w rozwoju.

Kolejny rozdział poświęcony jest charakterystyce powietrza atmosferycznego i procesom jakie zachodzą w trakcie ekspansji powietrza wilgotnego. Zamieszczone są także podstawowe formuły termodynamiczne i omówione parametry powietrza wilgotnego.

Sformułowanie modelu matematycznego jest przedstawione w rozdziale 3. Na tle omówionych na wstępie różnic pomiędzy metodami eulerowskimi modeli jedno- i dwupłynowych oraz metodą lagranżowsko-eulerowską Doktorant prezentuje układ równań dla modelu jednopłynowego w ujęciu RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) z modelem k-ω SST, a w dalszej części model nukleacji oraz wzrostu kropel. W tym przypadku zaprezentowane są trzy modele: ciągły i kinetyczny dla dwóch różnych zakresów liczby Knudsena (<0.01 i >4.5) oraz model hybrydowy dla zakresu pośredniego. Na końcu został

scharakteryzowany model fazy dyskretnej umożliwiający analizę transportu kropel, który Doktorant wykorzystuje do superpozycji z modelem płynu jednoskładnikowego wykorzystując zalety obu modeli. Należy podkreślić, że zaprezentowane podejście stanowi znaczący wkład Doktoranta i jest efektem międzynarodowej współpracy.

Charakterystyka analizowanych przypadków przepływowych podana jest w rozdziale czwartym. Obliczenia przepływu pary wodnej wykonano dla geometrii dysz wykorzystanych w badaniach Mosesa (rok 1978) oraz w ramach projektu IWSEP (International Wet Steam Experimental Project), gdzie badania eksperymentalne były wykonywane także na Politechnice Śląskiej. W kolejnym etapie Doktorant wykorzystywał dysze do analizy przepływu powietrza wilgotnego. Dysze różnią się geometrią ze względu na prędkość ekspansji lub położeniem górnej i dolnej ściany dyszy powodując jej asymetrię. Podany jest także szeroki zakres zmian wilgotności powietrza. Na stronie 47 Doktorant podaje, że można przyjąć założenie dwuwymiarowego przepływu w dyszy. To założenie budzi wątpliwość. Wymiar gardła 20 x 20 mm oznacza, że wraz ze wzrostem odległości maleje stosunek szerokości do wysokości i rozwijająca się warstwa przyścienna na wszystkich ścianach, a w szczególności przepływy narożne są przyczyną trójwymiarowego charakteru oddziaływania fali uderzeniowej z warstwą przyścienną.

Przypadki reprezentatywne dla maszyn wirnikowych są analizowane na przykładzie wirników NASA rotor 37 i NASA rotor 67.

W kolejnym rozdziale (piątym), zatytułowanym „Numerical modeling", przedstawiono siatki obliczeniowe dla poszczególnych przypadków, testy siatki oraz walidację modeli. Obliczenia w dyszach wykonano dla modeli dwuwymiarowych. W przypadku siatek dla analizowanych wirników sprężarek podano całkowitą ilość elementów, ale zabrakło informacji jaką rozdzielczość zastosowano w poszczególnych kierunkach (promieniowy, osiowy, obwodowy). Praca w swoim tytule koncentruje się na modelowaniu numerycznym, ale niestety zabrakło wyraźnej informacji jakiego programu/solvera używa w swojej pracy Doktorant. W Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej od wielu lat jest rozwijany program do analizy przepływu z kondensacją, a prace są prowadzone i koordynowane przez promotora prof. Sławomira Dykasa. Można przypuszczać, że ten właśnie program jest wykorzystany w pracy. Jednak w rozdziale trzecim wspomniany jest Ansys Fluent i wskazane możliwości wykorzystania UDF (User Defined Function). Możliwości UDF Doktorant wykorzystuje do zaproponowanej w pracy metody superpozycji modeli. Ponadto zgodnie z dobrą praktyką prezentacji prac numerycznych, wyniki obliczeń powinny być poprzedzone informacją o zastosowanej metodzie numerycznej, schematach, czy kryteriach zbieżności. Niejasna jest motywacja wykonania obliczeń dla jednego z przypadków przepływu nielepkiego i porównania z wynikami dla modelu k-ω SST. Lepkość i rozwój warstwy przyściennej w dyszy ma istotny wpływ na rozkład ciśnienia, położenie fali uderzeniowej, a wobec tego na proces ekspansji, kompresji a w konsekwencji na kondensację i odparowanie kropel. Należy jednak podkreślić, że pomimo tych nieścisłości w rozdziale zamieszczono bardzo interesujące i wartościowe porównania dla różnych modeli kondensacji.

Przeprowadzona walidacja modeli umożliwiła ich wykorzystanie i szczegółową analizę przepływu z przemianą fazową w wybranych konfiguracjach. Wyniki przepływu transonicznego z kondensacją homogeniczną lub heterogeniczną w prezentowanych wcześniej dyszach, wirnikach sprężarek oraz w opływie profilu lotniczego omówione zostały w rozdziale szóstym. Ten rozdział zawiera porównania, o dużym znaczeniu poznawczym, wskazujące na wpływ zawartości wilgoci w powietrzu na rozkład ciśnienia i przebieg procesu kondensacji. Ponadto, Doktorant przedstawił interesującą analizę przepływu z kondensacją heterogeniczną oraz odparowaniem, a także wpływem wielkości cząstek stałych lub kropel na sam proces kondensacji oraz charakterystyki aerodynamiczne profilu lotniczego lub sprawność palisad sprężarkowych. Uzyskane wyniki wyraźnie wskazują na konieczność odpowiedniego

modelowania i uwzględnienia efektów kondensacji celem poprawnego przewidywania tych charakterystyk lub sprawności.

2. Uwagi szczegółowe

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

1. Na stronie 41 przedstawiony jest model „Blend", dla którego została zaproponowana formuła dla współczynnika bf w zakresie liczby Knudsena (0.01, 4.5). W jaki sposób zostały wyznaczone współczynniki podanej liniowej zależności i czy zapis jej poprawny biorąc pod uwagę zakres wartości od 0 do 1 jakie powinien przyjmować?
2. W ramach wypełnienia luki w badaniach eksperymentalnych przepływu powietrza wilgotnego Doktorant wykonał pomiary przepływu dla wybranych przypadków. W tabelach charakteryzujących warunki brzegowe podano różne wartości, ale nie wiadomo w jaki sposób była regulowana wilgotność powietrza na stanowisku? Proszę o wyjaśnienie.
3. Obliczenia w przepływu w dyszach wykonano dla modelu dwuwymiarowego. Dla takiego założenia wykonano analizę wpływu siatki obliczeniowej, a następnie wyniki obliczeń porównywano z danymi eksperymentalnymi. Obecność warstwy przyściennej na ścianach bocznych, rozwój przepływu w narożach dyszy ma istotny wpływ na oddziaływanie fali uderzeniowej i jej położenie. Na rys. 5.10 wyniki obliczeń dla powietrza suchego wykazują dobrą zgodność położenia fali przewidzianego numerycznie z wyznaczonym eksperymentalnie. Położenie może być dostosowane poprzez odpowiedni dobór ciśnienia statycznego na wylocie z dyszy, natomiast zmiana ciśnienia na fali i w dyszy za falą jest efektem zmian w obszarach przyściennych. Pomiar wskazuje na niższe ciśnienie za falą, czyli większą prędkość przepływu ze względu na obecność warstw na ścianach bocznych. Podobny efekt jest obserwowany w pozostałych przypadkach, gdzie porównywane są pomiary ciśnienia w dyszy z obliczeniami w rozdziale 6. Czy Doktorant wykonywał obliczenia trójwymiarowe dla któregoś przypadku i czy założenie dwuwymiarowości wpływa na efekty obserwowane w strefie kondensacji lub odparowania za falą?
4. Na rys. 5.7 widoczna jest asymetria za falą uderzeniową i różnica pomiędzy siatkami mesh2 i mesh3? Co jest przyczyną takiej asymetrii i różnicy pomiędzy siatkami?
5. W sekcji 5.2.3.4 przedstawiona jest analiza wpływu wilgotności na oscylacje fal kondensacji i ciśnienia. Amplituda i częstotliwość oscylacji prostych (normalnych) lub skośnych fal uderzeniowych jest silnie zależna od oddziaływania z warstwą przyścienną i efektów trójwymiarowych. Doktorant słusznie zwraca uwagę na znaczący wpływ modelu turbulencji, ale proszę o wyjaśnienie, bo tego w pracy nie ma, jaki jest cel obliczeń przepływu nielepkiego. Poza tym, co jest przyczyną występowania oscylującej asymetrycznej struktury przepływu w modelu nielepkim (Rys. 5.24)?
6. W tabeli 6.1 podano wartości sprawności dyszy z wylotem naddźwiękowym, które wyznaczone są w osi dyszy. W przypadku przepływu suchego powietrza sprawność jest równa 1 i wyraźnie widoczny jest wpływ wilgotności. Czy i jak zmienią się te wartości jeśli współczynnik sprawności zostanie obliczony w oparciu o wartości całkowe uwzględniające zmiany w warstwie przyściennej, np. średnia powierzchniowa w wybranych trawersach kontrolnych?

Praca jest napisana w sposób jasny i komunikatywny, język angielski i redakcja pracy nie budzą większych zastrzeżeń, pomimo braku poprawnej numeracji rozdziałów, rysunków i tabel

w wersji wydrukowanej. W otrzymanej wersji elektronicznej pracy tych błędów już nie ma. Materiał graficzny jest opracowany starannie, rysunki i wykresy są przygotowane czytelnie i umożliwiają interpretację prezentowanych wyników. Przygotowując pracę do druku można byłoby uniknąć kilku przypadków podziału tabel na strony lub umieszczenia tytułów lub podpisu rysunków na różnych stronach. Ponadto w pracy dostrzeżono pewne błędy lub pomyłki, a kilka z nich wymieniono poniżej.

1 - Str. 43 „blades of the rotor and the stator ring" – Określenie „cascade" w tym przypadku chyba byłoby lepsze niż „ring".
2 - Pozycja literatury [60] zawiera link, który przekierowuje do danych profilu RAE. W treści jest odwołanie do danych dyszy Sajben, więc warto podać inny link,
3 - Rys. 5.10 i 6.10 są podpisane „Static-to-total pressure ratio", ale na wykresie jest ciśnienie statyczne.
4 - Rys. 5.15 – Czy podpis wykresu „total pressure" jest poprawny? Przebieg wskazuje na ciśnienie statyczne.
5 - Str 78 – Nieprawidłowe odwołanie do literatury, jest [4] powinno być [19].
6 - Pozycja w spisie literatury[56] jest powtórzeniem [26].

3. Podsumowanie

Podsumowując recenzowaną pracę uważam, że Pan mgr inż. Piotr Wiśniewski przedstawił bardzo interesujące i wartościowe wyniki, istotne dla rozwoju badań nad zagadnieniami przepływu transonicznego z przemianą fazową. W ramach przedstawionych prac wykonał badania eksperymentalne przepływu powietrza wilgotnego w dyszy transonicznej, które uzupełniły bazę danych wykorzystaną do porównania z wynikami modelowania numerycznego. W szerokim zakresie przypadków, różnych konfiguracji dysz, profilu lotniczego oraz przykładu palisad maszyn wirnikowych wykonał obliczenia wskazując na różnice wykorzystanych modeli kondensacji, a także przedstawił wpływ cząstek stałych lub kropel na przebieg kondensacji heterogenicznej. Wyniki jednoznacznie wskazują istotny wpływ wilgotności na przepływ transoniczny powietrza oraz na charakterystyki aerodynamiczne lub sprawność badanych konfiguracji przepływowych. Doktorant zaproponował także metodę bazującą na superpozycji metod eulerowskiej i lagranżowskiej, której dalszy rozwój może poprawić efektywność analiz numerycznych przepływu z kondensacją. Prace były realizowane w ramach międzynarodowej współpracy i podczas pobytu Doktoranta w Tohoku University. Wobec powyższego, można zdecydowanie stwierdzić, że założone cele pracy zostały w pełni zrealizowane, a przedstawione wyniki są inspiracją do dalszych badań nad prezentowanymi zagadnieniami.

Uważam, że praca doktorska Pana mgra inż. Piotra Wiśniewskiego pt.: „Numerical modelling of phase-change processes in humid air transonic flows" odpowiada warunkom określonym w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Ponadto, stwierdzam, że wyniki przedstawione w pracy doktorskiej wyraźnie wskazują na ponadprzeciętny poziom naukowy. Biorąc pod uwagę złożoność przedstawionego zagadnienia i co należy wyraźnie podkreślić, ilość prac (7) opublikowanych w czasopismach z listy ministerialnej, wnioskuję o wyróżnienie pracy doktorskiej Pana mgra inż. Piotra Wiśniewskiego.

Podpisał Paweł Flaszyński