

Wojskowa Akademia Techniczna
Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa

Andrzej.Panas@wat.edu.pl
tel. 261 839 543

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mieszka Tokarskiego p.t.

Computational and experimental analysis of a condensation hood

I. Przedmiot i charakterystyka rozprawy

Recenzowaną rozprawę poświęcono zagadnieniu złożonej, a dokładnie rzecz biorąc sprzężonej wymiany ciepła i masy w przepływie wielofazowym i wieloskładnikowym. W obszarze wymiany ciepła uwzględnione i rozpatrywane były w zasadzie wszystkie zjawiska cząstkowe wymiany ciepła, a w szczególności przewodzenie, konwekcja oraz wymiana ciepła w przemianie fazowej cieczo-pary. Zagadnienie przepływowe przepływu gazu wieloskładnikowego służące określeniu pola prędkości zostało dopełnione bilansem wypływu cieczy – skondensowanej wody – w modelu o parametrach skupionych.

Pod względem metodologicznym zarówno realizowane badania, jak i samą rozprawę doktorską można zaliczyć do prac doświadczalnie numerycznych. Oczywiście modelowanie i obliczenia numeryczne wchodzi w zakres analizy teoretycznej, ale w niniejszym przypadku zastosowane przeze mnie zawężenie jest celowe. Otóż narzędzia modelowania numerycznego Doktorant wykorzystał w sposób techniczny, ze sprawdzeniem zastosowanych procedur, ale bez wnikania w istotę metod i ich właściwości. Jest to jak najbardziej uzasadnione naprawdę dużą złożonością fizyczną analizowanego zagadnienia oraz skomplikowaniem geometrii rozważanego obiektu technicznego.

Jak można się z tej wstępnej charakterystyki domyślać podłoże realizowanego projektu jest konkretny problem praktyczny, konstrukcyjno-eksploatacyjny. Praca dotyczy bowiem udoskonalenia konstrukcji okapu kondensacyjnego. Okap kondensacyjny w kategoriach konstrukcyjnych może być traktowany jako przepływowa chłodnica wilgotnego powietrza z wykrapaczem pary. Wilgotne powietrze jest podawane parowego podgrzewacza (warnika, kombiwaru) produktów spożywczych. Do określenia charakteru działań użyłem terminu doskonalenie a nie optymalizacja, gdyż ze względu na wspomnianą złożoność problemu i trudność określenia parametrycznej funkcji celu brak jest tutaj typowych atrybutów działań optymalizacyjnych. Doskonalenie konstrukcji obiektu ma na celu jej „odchudzenie” przy jednoczesnym zachowaniu wydajności i sprawności.

Z treści rozprawy wynika, że stojący u jej podstaw projekt badawczy był realizowany przez zespół, którego członkiem był Doktorant. W ramach części doświadczalnej projektu wykonane zostały pomiary parametrów cieplno-przepływowych dla określonych reprezentatywnych warunków pracy urządzeń: a) wyjściowego, b) zmodyfikowanego oraz c) przekonstruowanego. Dane pomiarowe, przy wykorzystaniu danych konstrukcyjnych

i zaleceń eksploatacyjnych posłużyły do opracowania modelu numerycznego i do sprawdzenia poprawności jego działania. W sprzężeniu zwrotnym wyniki obliczeń numerycznych wykorzystywano do planowania eksperymentu i do opracowywania zmian konstrukcyjnych części wymiennikowej urządzenia. Indywidualny i oryginalny wkład Doktoranta zaznacza się głównie w wykorzystaniu danych pomiarowych do opracowania modelu numerycznego, wykonania obliczeń i efektywnym wykorzystaniu wyników ich analizy.

Zarówno ze względu na konkretny cel i przedmiot działań - w postaci doskonalenia konstrukcji urządzenia energetycznego, jak i w aspekcie metodologicznym, rozprawę można zakwalifikować do dziedziny nauk inżynierjno-technicznych i dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

II. Ocena rozprawy i uwagi o charakterze merytorycznym

Nie tylko z danych przedstawionych w rozprawie, ale i w ocenie ogólnej zasadność podjęcia badań wykonanych w ramach realizacji ocenianej pracy doktorskiej nie podlega dyskusji. Podstawę do tego dają przede wszystkim względy praktyczne i ukierunkowanie działań na oszczędność energii, zarówno bezpośrednią, jak i tę związaną rachunkiem ciągnionym – poprzez zmniejszenie materiałochłonności oraz pracochłonności w procesie produkcji agregatu kombiwarowego. Nie należy również zapominać o innym aspekcie praktycznym doskonalenia metodyki optymalizacji konstrukcji z wykorzystaniem obliczeń numerycznych w zastępstwie, lub w dopełnieniu badań eksperymentalnych. Przedmiot rozprawy uważam zatem za uzasadniony.

Niezależnie od tego, że sam problem można uznać za przyczynkowy, to jego rozwiązanie wymagało zaangażowania metod i narzędzi wykraczających poza ramy czysto techniczno-projektowe, wypełniających formułę badań i analiz naukowych. Zarówno przy określeniu problemu fizycznego, rozpoznaniu, sparametryzowaniu zjawisk cząstkowych, jak i przy wykorzystaniu zaawansowanych programów modelowania numerycznego należało się wykazać umiejętnościami i kompetencjami właściwymi projektom doktorskim. Skuteczne opanowanie metodyki modelowania pozwoliło na przeprowadzenie szeregu obliczeń numerycznych. Uzyskane w ich rezultacie wiarygodne wyniki dały podstawę do opracowania efektywnych zmian konstrukcyjnych. Powodzenie projektu w tym zakresie to główny atut również i bazującej na jego rezultatach rozprawy. Było to możliwe dzięki właściwemu, na danym poziomie dokładności, odwzorowaniu warunków rzeczywistych w modelu numerycznym. Do zalet pracy należy zaliczyć również rzetelność prezentacji oraz dyskusji wyników, które, jak można się domyśleć, nie na każdym etapie spełniały oczekiwania. Świadczą o tym chociażby porównanie sprawności wyznaczonych dla poszczególnych wersji konstrukcyjnych.

Pomimo swojej przyczynkowości, całkowicie uzasadnionej konkretnym, bardzo praktycznym celem, zakres metodologiczny rozprawy, złożoność rozpatrywanego problemu ciepłno-przepływowego z uwzględnieniem przemian fazowych, sprzężenie metod doświadczalnych z analizą teoretyczną oraz „ciężar” trójwymiarowego sprzężonego zagadnienia numerycznego dają szerokie możliwości wykazania się więcej niż zadowalającymi kompetencjami naukowo-badawczymi w dziedzinie nauk technicznych. Niestety, możliwości te nie zostały wykorzystane i w rezultacie całość rozprawy określiłbym jako poprawna w zakresie analizy i wnioskowania technicznego. Uwagi merytoryczne w szczegółach przedstawię w dalszej części, natomiast teraz je zaanonsuję kategoryzując zastrzeżenia jako: a) dotyczące zbyt daleko idących heurystycznych interpretacji praw fizycznych, b) niewłaściwie rozłożonych akcentów ze zbyt dużym naciskiem położonym na omawianie techniki obliczeń i opisywanie

uzyskanych wyników, c) lakoniczności w charakteryzowaniu niektórych procedur badań doświadczalnych czy procedur numerycznych. Trudno mi dociekać takiego stanu rzeczy, tym bardziej że cytowane w wykazie literatury publikacje [42], [43] oraz [44], których mgr inż. Mieszko Tokarski jest współautorem, nie dają podstaw do sformułowania takowych zastrzeżeń.

Rozwijając myśl z poprzedniego akapitu przedstawię teraz najważniejsze uwagi krytyczne w kolejnych punktach.

1. Moje największe zastrzeżenie dotyczy wprowadzania do równania bilansu strumienia masy (4.1) poprawki $\Delta \dot{m}_{da}$. Otrzymuje się w tym przypadku zależność oprawną matematycznie, ale niepoprawną fizycznie. Za wprowadzoną poprawką nie stoi żadne zjawisko źródłowe lub upustowe, tylko zwykły błąd pomiaru lub błąd obliczeń. Podobna heurystyczna interpretacja niezgodności jest powtarzana i w dalszej części, np. (4.5) i (4.7). Zdaję sobie sprawę z akademickości dyskusji w tym zakresie, bo rzecz sprowadza się do interpretacji zapisu, ale zalecam stosowanie się do powszechnie stosowanej konwencji.
2. Charakteryzując model matematyczny w punkcie 4.2.1 Autor od razu przechodzi do szczegółów równań bilansowych. Brak jest natomiast omówienia całości zagadnienia modelowania, podania informacji o zakresie modelowania, zastosowanych równaniach konstytutywnych, modelowanych polach, sposobie określenia sprzężeń pomiędzy modelowanymi fazami itp., jednym słowem ogólnego opisu problemu. Od razu zaznaczę, że nie chodzi mi o przepisanie związków i zależności ze stosownych monografii czy instrukcji użytkownika pakietu programów numerycznych, co stanowi wadę wielu tego typu opracowań. Mam na myśli np. określenie modelowanego przepływu jako przepływu nieściśliwego, bez sprzężeń pomiędzy fazami itd. Podanie tych informacji pozwoliłoby na docenienie skuteczności zastosowania w niektórych fragmentach skutecznych w działaniu uproszczeń, na przykład dotyczących przenikania ciepła przez ściankę wymiennika rozgraniczającą przepływ wentylatorowy od parowo-gazowego. Uniknąć też można byłoby kłopotów z zapisem i interpretacją zależności (4.3), w których przy uśrednieniu prędkości należy rozróżnić przypadki średniej prędkości masowej i średniej prędkości objętościowej.
3. Przy budowaniu modelu nie uwzględniono wkładu pracy wentylatora. Domyślam się, że został on uznany za pomijalnie mały w bilansie, ale brak jednoznacznego stwierdzenia tego faktu stanowi dodatkowy przykład nieudomówień opisanych w punkcie poprzednim.
4. Podobne do omawianego w pkt. 1, jest źródło niezręczności zdania ze str. 30 w brzmieniu: „Preliminary measurements showed that the flow rate of the condensate is not sufficient to satisfy the energy balance (4.7).” Z fizycznego punktu widzenia nie ma możliwości naruszenia zasady zachowania energii. To samo dotyczy bilansu entalpii omawianego na stronie 35 w drugim wierszu od dołu, a także sposobu dopełnienia bilansu masy opisywanego na stronie 40 w wierszach 4-8 od góry strony.
5. Przy analizie wyników pomiarów wstępnych w punkcie 4.2 wspomniany został w ostatnim akapicie problem błędów pomiarowych, ale nie podano przynajmniej zgrubnych oszacowań ich wartości.
6. Prezentacja modelu numerycznego w punkcie 4.3 ograniczona jest do prezentacji głównie geometrii oraz wybranych zagadnień określenia warunków granicznych i podziału na elementy – objętości. Brak jest systematycznego przedstawienia całości

zagadnienia lub odniesienia do literatury ze stosownymi szczegółami (por. pkt. 2 powyżej).

7. Opisując badania doświadczalne i ich wyniki Autor nie przedstawił szczegółów dotyczących zastosowanej aparatury pomiarowej i czujników. W związku z powyższym trudno jest do problemu błędu pomiarowego, trudno jest ocenić jakość dopasowania modelu numerycznego do danych doświadczalnych z obliczeń walidacyjnych.

Oprócz istotnych z merytorycznego punktu widzenia mam również pewne uwagi o charakterze porządkowym lub redakcyjnym. W ich przedstawieniu ograniczę się do wybranych, przedstawiających charakter wzmiankowanych zastrzeżeń.

8. Na stronie 28 komentując wyniki przedstawione w Tabeli 4.1 Autor stwierdza: „Series A1** and A2 differ in steam mass flow rate.” po to, by w następnych zdaniach odnieść się do problemu błędu pomiarowego, nawiasem mówiąc nie określonego jawnie. W moim odczuciu należałoby raczej stwierdzić, że nie można stwierdzić różnicy masowego natężenia przepływu w granicach spodziewanego błędu pomiarowego.
9. Nieco mylące jest określanie stref I i II jako punkty. Można to uznać za poprawne tylko w przypadku stosowania modelu jednowymiarowego. Domyślam się, że Doktorant odnosił się w tym przypadku do punktów pomiaru temperatury w doświadczeniach na obiekcie rzeczywistym. Zalecane byłoby jednak skomentowanie problemu niejednorodności pola temperatury, prędkości i wilgotności względnej na wejściu i wyjściu. Na przykład przy omawianiu metodyki wyznaczania rozkładu prędkości na wejściu można byłoby przedstawić przykładowy wyniki pomiaru.
10. Na stronie 31 w pierwszym akapicie pod ilustracją podana jest informacja o dwóch sposobach wyznaczenia masowego strumienia pary, ale nie odniesiono się do problemu ewentualnych różnic wyznaczonych wartości. Informacja taka pozwoliłaby na zorientowanie się w skali możliwych błędów pomiarowych.
11. Użyty w tekście termin „semi-steady state” (str. 31, wiersz 5. od dołu) wymaga wyjaśnienia jako niejednoznaczny. Z reguły jako kryterium przyjmuje się odniesienie lokalnych różnic temperatury (ciśnienia, prędkości,...) do dryfu – zmiany wartości średniej.
12. Na stronie 42 z wyjaśnieniem współczynnika proporcji oraz współczynnika oporu bezwładnościowego C_2 czytelnik jest odsyłany do instrukcji użytkownika pakietu oprogramowania Ansys/Fluent. Rzeczona zależność pojawia się dopiero po koniec opracowania w postaci wzoru (6.2). W moim odczuciu problem doboru wartości powinien być opatrzony przynajmniej krótkim komentarzem odpowiednio oszacowania i wyznaczenia (obliczenia).
13. Na stronie 50 jest mowa o oporności cieplnej R , ale nie podano sposobu jego wyznaczenia.
14. Na stronie 52 w pierwszym zdaniu jest mowa o elementach ortogonalnych, ale z analizy Rysunku 4.16 wynika, że w strefie I występują elementy nieortogonalne, sześciokątne.
15. Ostatni akapit na stronie 73 zawiera niepotrzebne powtórzenia opisu konstrukcji.

16. Na stronie 97 podano że: „The polynomial was slightly adjusted to keep positive pressure values ...”. Jest to zbyt ogólnikowa informacja. Nawiasem mówiąc, można w takim przypadku wyznaczyć funkcję aproksymującą z jednym zadanym węzłem sztywnym.
17. Na stronie 101 w punkcie 6.2.1 przedstawiono ideę zastosowania modelu hybrydowego. W moim odczuciu jest to jak najbardziej zasadne, świadczy o umiejętności modelowania i stanowi zaletę pracy. Problemem jest jednak to, że Autor nie odnosi się do tego, jak to wpłynie na pole przepływu.
Uwagę tę prezentuję w części przyczynkowej, gdyż zdaję sobie sprawę, że całość modelu była testowana co do poprawności i skuteczności globalnie.
18. We wzorze (6.7) jest błąd: zamiast prędkości powinna w liczniku znajdować się przewodność cieplna płynu. Podobny błąd można zauważyć w publikacji [43].
19. Wzór (6.11) podaje zależność na wartość średnią. Mam wątpliwość, czy tak wyznaczana wartość średnia, to znaczy średnia arytmetyczna, nie zależy od podziału na objętości (w przypadku powierzchni – elementy) skończone. Właściwe byłoby chyba zastosowanie średniej ważonej udziałami powierzchni.
20. W punkcie 6.2.3 podano zależności do obliczeń oporności cieplnej odrębnie dla dwóch składników mieszaniny: powietrza i pary. Zasadnym byłoby skomentowanie tej procedury dehomogenizacji przynajmniej jednym zdaniem. Za celowe uważam również odniesienie się do problemu udziału warstwy wykropłonej cieczy w oporze przenikania ciepła (por. jednak komentarz do uwagi 17).
21. W Rozdziale 7 stanowiącym podsumowanie rozprawy do oceny efektywności konstrukcji wykorzystano między innymi masowy wydatek wykropłonej pary. W moim odczuciu głównym ocenianym parametrem powinna być sprawność, może sprawność odniesiona do materiałochłonności i pracochłonności konstrukcji, gdyż masowy wydatek można zwiększyć zwiększając ilość dostarczonej pary. Niemniej wynikiem realizacji badań jest przede wszystkim opracowana metodyka i nawet przy niepowodzeniu doskonalenia konstrukcji sama w sobie stanowi wartość dodaną.
22. W funkcjach użytkownika stałe i zmienne całkowite definiowane są za pomocą ułamków dziesiętnych (np. na str. 150). Czy jest to specyfika stosowanego języka programowania, przeoczenie, czy może jest jakieś inne uzasadnienie takiego zapisu?
23. Na stronie 154 w wierszu nr 287 programu nie mogę się dopatrzeć wartości 0,555 współczynnika z zależności (6.4). Czy został on uwzględniony w innym miejscu, czy może jest to błąd redakcji załącznika?

W podsumowaniu oceny merytorycznej powtórzę, że rozprawa jest pracą oryginalną, zawiera niezbędne elementy nowości i może stanowić podstawę procedowania przewodu doktorskiego. Dodatkowym argumentem potwierdzającym wartość pracy jest fakt publikacji wybranych wyników projektu doktorskiego w cieszących się dużym prestiżem fachowych czasopismach międzynarodowych (*Archives of Thermodynamics, Energies, Heat and Mass Transfer*).

III. Uwagi dotyczące redakcji pracy

Recenzowaną rozprawę zredagowano w języku angielskim z tradycyjnym podziałem treści na poszczególne rozdziały. Rozłożenie akcentów nie jest jednak typowe, gdyż trzy pierwsze rozdziały stanowią mniej niż 3% całości opracowania. Mając pewne zastrzeżenia do

związanych z tym skrótów i nieomówień treści uważam to jednak za dopuszczalne. Uzasadnieniem jest charakter opracowania będącego swoistym raportem z własnego udziału w badaniach zespołowych. Wykazując się rezerwą w powyższym zakresie bardzo dobrze jednak oceniam przedstawienie celu i zakresu pracy zamiast usilnie preferowanego sformułowania tezy rozprawy.

Pod względem edycji tekstu i szaty graficznej recenzowana rozprawa jest zredagowana bardzo starannie. Odwołania do literatury są adekwatne. Mam jedynie zastrzeżenia do zbyt częstego posługiwania się ilustracjami wyników obliczeń generowanymi w środowisku pakietu programów Ansys/Fluent. Szkoda, że nie wykorzystano w większym stopniu rysunków danych przetworzonych oraz schematów – bardzo wydajnego sposobu prezentacji danych do analizy naukowo-technicznej.

Oczywiście, nawet przy najbardziej starannej redakcji trudno spodziewać się tekstu w pełni bezbłędnego. Nieliczne, zauważone przeze mnie błędy wskazuję poniżej.

1. Wykaz oznaczeń nie jest kompletny (brakuje np. w wykazie symboli m , u , Y), nie zachowano również porządku alfabetycznego w przedstawieniu oznaczeń.
2. W Tabeli 4.1 nie dla wszystkich parametrów podane zostały jednostki.
3. O ile się nie mylę nie ma w tekście rozprawy odwołania do prac [31] i [39].

Innych zasadniczych uwag bądź zastrzeżeń dotyczących strony redakcyjnej nie mam.

IV. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że w recenzowanej pracy przedstawiono rozwiązanie problemu badawczego oryginalnego i dysertabilnego. Ważnym atutem rozprawy jest to, że temat jest mocno zakorzeniony w praktyce przemysłowej i dotyczy zagadnień oszczędności energii zarówno bezpośrednich, jak i w rachunku ciągnionym, uwarunkowanym kosztami produkcji. Wynikiem realizacji projektu doktorskiego, oprócz rozprawy, są publikacje w prestiżowych pismach o światowej renomie. Stwierdzam zatem, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2021 r. poz. 478). Wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Mieszka Tokarskiego do publicznej obrony.

Podpisał Andrzej J. Panas