

RECENZJA rozprawy doktorskiej

mgr inż. Doroty Sawickiej pt. *Experimental and numerical modeling of unconfined free convection of nanofluids*,

sporządzona na prośbę Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna na Politechnice Gdańskiej (dn. 2 czerwca 2020r.)

I. Ogólna charakterystyka pracy

Przedstawiona do oceny praca wykonana pod kierunkiem profesora Janusza Cieślińskiego z Politechniki Gdańskiej – promotora; oraz profesora Sławomira Smolenia z Uniwersytetu w Bremie – promotora pomocniczego, dotyczy badań modelowych zjawiska konwekcji swobodnej w przestrzeni nieograniczonej. Rozważany przypadek to konwekcja swobodna występująca na powierzchni poziomej rury zanurzonej w nieograniczonym ośrodku wypełnionym nanocieczą. Ze względu na liczne zastosowania praktyczne, rozważany w pracy przypadek konwekcji naturalnej wokół poziomego walca stanowi istotne zagadnienie wśród występujących w otoczeniu zjawisk przejmowania ciepła.

W ramach pracy wykonano szereg badań eksperymentalnych na specjalnie zbudowanym do tego celu stanowisku modelującym analizowany przypadek teoretyczny. Przeprowadzone eksperymenty dotyczyły zarówno badań właściwości termofizycznych zastosowanych nanociecz, jak również badań cieplnych mających na celu określenie współczynników przejmowania ciepła w rozważanym zjawisku. Zostały również przeprowadzone modelowe badania numeryczne oraz eksperyment mający na celu walidację ich wyników, który został przeprowadzony metodą anemometrii obrazowej.

Podjęta w rozprawie tematyka jest istotna i aktualna z punktu widzenia coraz szerszego zainteresowania wykorzystaniem cieczy z dodatkiem nanocząstek w różnych zastosowaniach technicznych, w tym np. jako chłodziw w reaktorach jądrowych. Również rozważany przypadek geometryczny – pozioma rura – ma bardzo liczne zastosowania techniczne.

Podjęta w pracy problematyka jest interesująca również pod względem poznawczym. Przeprowadzone badania eksperymentalne dla nanociecz o różnych stężeniach nanocząstek oraz utworzonych z wykorzystaniem różnych cieczy bazowych dają szerokie spektrum wyników umożliwiających rozpoznanie zachodzących zjawisk, a także odniesienie do przyjętego modelu w obliczeniach numerycznych. Dodatkowo, wykonana analiza pól prędkości techniką anemometrii obrazowej daje możliwość weryfikacji prowadzonych obliczeń numerycznych.

Napisana w języku angielskim rozprawa liczy 173 strony łącznie ze spisem treści, wykazem oznaczeń, załącznikami oraz bibliografią, w której zamieszczono 126 pozycji literaturowych. Wszystkie pozycje z wykazu literatury zostały zacytowane w tekście rozprawy.

Praca składa się 10 rozdziałów, w tym 4 rozdziały dotyczą zagadnień wstępnych natomiast kolejnych 6 jest ściśle związanych z badaniami prowadzonymi przez Autorkę. Zasadniczą treść poprzedzają słowa kluczowe, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz podziękowania. Pracę zamyka spis literatury oraz 14 załączników. Układ pracy jest poprawny, praca jest czytelna i przejrzysta. Jest również bardzo zwięzła co stanowi jej dodatkowy atut.

W rozdziałach od 1 do 4 Autorka wprowadziła w tematykę pracy poprzez krótki wstęp przedstawiający zagadnienia techniczne potwierdzające celowość podjętych badań oraz szczegółową analizę literatury dotyczącej badań konwekcji swobodnej przy powierzchni poziomych elementów zanurzonych w płynach wypełniających nieograniczoną przestrzeń oraz konwekcji swobodnej w nanopłynach. Przegląd literatury jest bazo bogaty, uwzględniono najnowsze badania, przytoczono pozycje ściśle związane z tematyką pracy.

W rozdziale 5 została postawiona teza naukowa. Kolejne rozdziały dotyczą prac własnych Autorki, realizowanych w ramach doktoratu. I tak, w rozdziale 6 podano założenia dotyczące eksperymentu oraz obliczeń numerycznych. Odnośnie badań eksperymentalnych – uściślono założenia co do stanowiska badawczego, warunków brzegowych, zastosowanej rury grzejnej, a także szczegółowo opisano założenia co do stosowanych nanociecz. Również jasno sformułowano założenia dotyczące obliczeń numerycznych.

Składający się z 10 szczegółowych podrozdziałów rozdział 7 zawiera syntetyczny opis stanowiska do badań cieplnych, sposobu przygotowania nanociecz, procedur pomiarowych zarówno dla badań cieplnych jak i dla badań właściwości termofizycznych nanociecz oraz pomiarów techniką anemometrii obrazowej. W rozdziale 7 zawarto również główne zależności określające strumień cieplny oraz wyznaczone temperatury. Rozdział 7 zamka analiza błędów pomiarowych.

W rozdziale 8 Autorka w zwięzły sposób przedstawiła procedurę przeprowadzonych symulacji numerycznych.

Wyniki badań zostały zaprezentowane i przedyskutowane w rozdziale 9, na który składa się 5 podrozdziałów przedstawiających w szczególności:

- wyniki walidacji stanowiska eksperymentalnego przeprowadzonej poprzez porównanie odpowiednich korelacji empirycznych dla konwekcji swobodnej z wynikami badań z zastosowaniem cieczy bazowych,
- wyniki walidacji modelu numerycznego poprzez porównanie pól prędkości z symulacji z wynikami otrzymanymi techniką anemometrii obrazowej,
- dyskusję nt. wpływu stężenia nanocząstek oraz rodzaju cieczy bazowej na konwekcyjną wymianę ciepła,
- otrzymaną na podstawie wyników badań eksperymentalnych korelację na liczbę Nusselta w zależności od liczby Rayleigha, liczby Prandtla oraz stężenia nanocząstek.

Rozdział 10 zawiera krótkie podsumowanie oraz jasno sformułowane wnioski, w których Autorka m.in. krytycznie odnosi się do uzyskanych wyników.

Ostatnia część rozprawy to bogate załączniki, w których Autorka zawarła przede wszystkim szereg wykresów uzupełniających szeroką graficzną prezentację wyników badań przedstawioną w zasadniczej części pracy.

II. Uwagi merytoryczne

1. W rozdziale 5 została sformułowana teza pracy o następującej treści „Dodatek nanocząstek Al_2O_3 do roztworu wody/glikolu etylenowego o stężeniach 0.01%, 0.1%, 1% wagowo, prowadzi do wzmocnienia wymiany ciepła na drodze konwekcji swobodnej w nanocieczy w porównaniu z cieczami bazowymi dla danej geometrii systemu termalnego czyli układu grzewczego i zbiornika cieczy”. Teza sformułowana jest w zasadzie poprawnie, wydaje się jednak, że po pierwsze – jest ona niekonieczna. W pracy zaprezentowano niewątpliwie wysokiej jakości badania naukowe. Wyniki badań zostały bardzo sumiennie opracowane. Okazało się, że postawiona teza została obalona – co w jakiś sposób może powodować „niezadowolenie” z uzyskanych wyników. Nie ma konieczności stawiania tezy w rozprawie doktorskiej. Po drugie – postawiona teza nie do końca jest dopracowana. Jeśli już miałyby być sformułowana – czy nie byłoby bezpieczniej podać w niej, że „dodatek nanocząstek spowoduje zauważalne zmiany w wartościach współczynnika przejmowania ciepła...”, bądź też „dodatek nanocząstek o określonym stężeniu prowadzi do osiągnięcia optymalnych warunków konwekcyjnej wymiany ciepła...”. Jak wykazują dane literaturowe, również te – szeroko omówione w pracy – dodatek nanocząstek do cieczy bazowych powoduje zarówno intensyfikację jak i osłabienie konwekcyjnej wymiany ciepła. Jednym z czynników mających wpływ na wielkość współczynnika przejmowania ciepła jest wartość stężenia nanocząstek w rozważanym płynie. Przykłady świadczące o wzroście liczby Nusselta przy małych stężeniach oraz spadku Nu przy większych stężeniach widać m.in. na rysunkach 4.2 i 4.3 – są to dane literaturowe. Podobne wyniki otrzymała Autorka. W związku z tym formuła odnośnie jedynie intensyfikacji wymiany ciepła, wynikającej niewątpliwie ze zwiększonej przewodności cieplnej nanocieczy w stosunku do cieczy bazowej, nie jest adekwatna. Jak wiadomo konwekcyjna wymiana ciepła związana jest z ruchem makroskopowych części płynu o różnych temperaturach. W przypadku nanocieczy (nanopłynów) ruch ten może być z jednej strony intensyfikowany poprzez ruch Browna nanocząstek, z drugiej jednak strony – może wystąpić wyhamowywanie makroskopowych części płynu gdy stężenie nanocząstek jest zbyt duże.
2. W rozdziale 7.10 Autorka podaje wzory, z których, na podstawie danych pomiarowych, obliczany był strumień ciepła oraz odpowiednie temperatury. I tak – w zależności (7.18) zostały uwzględnione straty ciepła wynikające z zastosowanego układu elektrycznego. Oszacowano je na 10% mocy elektrycznej grzałki. W związku z tym, w równaniu (7.20), wg którego obliczano średnią temperaturę na powierzchni zewnętrznej rury, człon reprezentujący moc elektryczną powinien również uwzględniać powyższe straty. Wydaje się być również przydatne podanie w tym miejscu zależności, z której wyliczany był współczynnik przejmowania ciepła. Nawiązując do wzoru (7.20) – temperatura na powierzchni zewnętrznej rury grzejnej została obliczona traktując moc cieplną generowaną w rurze jako strumień przewodzony przez ściankę cylindryczną. Można przyjąć taką

procedurę, mając na uwadze warunki pomiaru, powinno to być jednak skomentowane. Rozważany przypadek jest klasycznym układem cylindrycznym z wewnętrznymi źródłami ciepła. Dodatkowo Autorka nie podaje zakresu występujących temperatur ani właściwości materiału rury. Nie ma również informacji na temat wypełnienia rury – można się domyślać, że jest to powietrze – oraz grubości czujników PT100 i ich wpływu na przyjęcie temperatury wewnątrz rury tożsamej z temperaturą ścianki wewnętrznej. Takie informacje przybliżyłyby czytelnikowi skalę zjawiska oraz zasadność przyjętych uproszczeń.

3. Zawarta w tym samym rozdziale analiza błędów, wykazała, że maksymalny błąd wyznaczenia strumienia ciepła został oszacowany na $\pm 1,2\%$. Taką samą wartość błędu podano dla średniego współczynnika przejmowania ciepła. Wydaje się, że wartość w przypadku α została zaniżona. Podana rozdzielczość 0,1K dla pomiaru temperatury za pomocą termometrów oporowych Pt100 jest ważna dla czujników klasy A. Natomiast autorka podaje w rozdziale 7.1, że pomiar odbywał się za pomocą czujników klasy B. W tym przypadku należy przyjąć rozdzielczość termometru 0,3K, jak podaje norma cytowana przez Autorkę. W związku z tym, błąd wyznaczenia współczynnika α będzie większy. Dodatkowo, wpływ na całkowity błąd (niepewność) α ma również określenie temperatury nanocieczy jako średniej arytmetycznej z ośmiu punktów pomiarowych (wzór 7.22). Większy błąd (niepewność) będzie również spowodowany uproszczeniami zastosowanymi do określenia temperatury ściany zewnętrznej rury grzejnej, o których wspomniano w poprzednim punkcie.
4. Zaprezentowane przez Autorkę wyniki symulacji numerycznych wykazały brak wpływu stężenia nanocząstek na konwekcyjną wymianę ciepła w rozważanym przypadku. W obliczeniach numerycznych uwzględniono wpływ stężenia nanocząstek na właściwości termofizyczne płynu. Zastosowany model numeryczny nie uwzględniał jednak członów modelujących ruch samych nanocząstek, tworzenia ewentualnych aglomeratów oraz ich zachowań podczas konwekcyjnego ruchu cieczy. Uwzględnienie rozszerzonej fizyki w modelu numerycznym być może zaowocowałoby większą spójnością z wynikami badań eksperymentalnych.

III. Uwagi redakcyjne

Oceniana rozprawa doktorska została napisana poprawnym językiem angielskim, jest czytelna, przejrzysta i bardzo staranna. Autorka nie ustrzegła się jednak drobnych błędów redakcyjnych. Zauważone nieścisłości zostały podane poniżej:

1. Na przytoczonych przez Autorkę wykresach uzyskanych na podstawie danych literaturowych, pojawia się objętościowe stężenie nanocząstek, które podawane jest w procentach, albo w postaci ułamka. Czytelniej byłoby to ujednolicić.
2. W tabeli 2.1. pojawiły się symbole liczby Nusselta Nu_{ch} oraz Nu_n . Nie są opisane indeksy dolne.

3. We wzorze (7.15) symbol oznaczający przewodność cieplną nanopłynu występuje zarówno po prawej jak i po lewej stronie równania – chyba pojawił się błąd w oznaczeniach. Co oznacza symbol „ d_p ”?
4. Tabela 7.5 zawiera dużo zer – należałoby ją zmodyfikować.
5. Zarówno we wzorze (7.20) jak i (8.3) pojawia się symbol „ λ ”, który oznacza nie tę samą przewodność cieplną. Również we wzorze (8.2) i (8.3) niepoprawnie użyto symbolu „ t ”, który w wykazie oznaczeń reprezentuje temperaturę. Powinno być „ τ ”. Także we wzorze (8.2) niepoprawnie został użyty indeks „ j ”.
6. Na rys. 9.15 występuje symbol ϕ_m oznaczający stężenie masowe, natomiast w wielu wzorach symbol ϕ jest bez indeksu bądź opisu – nie jest jasne czy chodzi o stężenie masowe czy objętościowe.
7. Dlaczego na wykresach zawartych w dodatkach temperatura jest wyrażana w $^{\circ}\text{C}$, albo w K? Należałoby to ujednolicić. Również zamiennie pojawia się albo opis słowny na osi wykresu, albo symbol wyrażający daną wielkość. Należałoby też ujednolicić jednostki lepkości – „ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ” czy „ $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ”?
8. W zapisie ułamków dziesiętnych Autorka używa bądź kropki (np. Tabela 7.1), bądź przecinka (np. Tabela 7.4).

IV. Ocena pracy

Autorka podjęła w swojej pracy, istotny w zagadnieniach technicznych, temat dotyczący konwekcji naturalnej przy poziomej rurze, w przypadku której, nieograniczona przestrzeń modelowana zbiornikiem o odpowiednich wymiarach wypełniona była nanocieczą. Rosnące zainteresowanie wykorzystaniem nanociecz m.in. jako chłodziwa w reaktorach jądrowych czy też w nowoczesnych systemach magazynowania energii cieplnej gdzie dominującą rolę w przekazywaniu ciepła odgrywa konwekcja swobodna, a także naukowe cele poznawcze rozpatrywanego zagadnienia stanowią pełne uzasadnienie podjętej tematyki badawczej. Temat jest zarówno aktualny i godny uwagi jak również oryginalny m.in. ze względu na rodzaje zastosowanych nanociecz stanowiących mieszaniny wody i glikolu etylenowego w różnych proporcjach oraz eksperymentalne określenie ich właściwości termofizycznych, czy też niestandardowo przeprowadzoną walidację obliczeń numerycznych.

Autorka wykazała się bardzo dobrą znajomością światowej literatury dotyczącej rozpatrywanych zagadnień, o czym świadczą cytowane pozycje literaturowe szeroko omówione w części wstępnej rozprawy.

Autorka dobrze opanowała techniki badawcze, zarówno w zakresie badań eksperymentalnych jak i teoretycznych obejmujących symulacje numeryczne.

Na szczególną uwagę zasługuje bardzo szeroki zakres badań eksperymentalnych zrealizowanych przez Autorkę. Opis stanowiska pomiarowego jak również prezentacja procedur badawczych zostały podane w sposób szczegółowy i wyczerpująco.

Podjęta dodatkowo praca związana z obliczeniami numerycznymi świadczy również o dużych umiejętnościach Autorki w tym zakresie.

Przedstawione w recenzji uwagi merytoryczne (głównie dyskusyjne) i redakcyjne nie przesłaniają istotnych wartości pracy i znaczenia dla zastosowań praktycznych.

V. Wniosek końcowy

Praca doktorska Pani mgr inż. Doroty Sawickiej ma charakter oryginalnej pracy naukowej łączącej w sobie zarówno elementy poznawcze jak i praktyczne. Została przedstawiona zgodnie z metodologią prowadzenia oraz prezentowania prac naukowych. Tematyka podjęta w pracy zawiera się w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*.

Zaprezentowane wyniki badań eksperymentalnych oraz obliczeń numerycznych są oryginalne. Uzyskane wyniki, opracowane w postaci wykresów, wzorów matematycznych oraz docelowego równania kryterialnego mają znaczenie zarówno teoretyczne istotne dla rozwoju nauki, jak i praktyczne. Mogą znaleźć zastosowanie przy projektowaniu i optymalizacji systemów cieplnych wykorzystujących nanociecze, w których to główny mechanizm wymiany ciepła stanowi konwekcja swobodna.

Praca doktorska Pani mgr inż. Doroty Sawickiej spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie Pani mgr inż. Doroty Sawickiej do publicznej obrony swojej rozprawy doktorskiej.

Dodatkowo stawiam wniosek o wyróżnienie tejże pracy doktorskiej, mając na uwadze jej szeroki zakres badań umożliwiający publikację wyników na arenie międzynarodowej, a także bardzo dużą staranność w samej redakcji rozprawy. Dodatkowym atutem jest międzynarodowa współpraca, w której uczestniczyła Autorka realizując cele swojej pracy.

