



prof. dr hab. inż. Dariusz Butrymowicz

Zakład Techniki Ciepłej i Chłodnictwa
Wydział Mechaniczny
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45C, 15-950 Białystok
tel. 571 443 089
e-mail: d.butrymowicz@pb.edu.pl

Białystok, 03.12.2015

Recenzja rozprawy doktorskiej **mgr inż. Przemysława Błasiaka** **„Wpływ zmiennych warunków ruchu płynu w pobliżu ścianki** **na wymianę ciepła”**

Opinia została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej, pismo W9/PW/1364/2015 z dnia 03 listopada 2015.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew Gnutek.

I. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 146 stron. Praca składa się z następujących części: wykazu oznaczeń, wstępu, sześciu rozdziałów, podsumowania oraz wykazu literatury. Zawartość poszczególnych rozdziałów obejmuje:

1. **Wstęp**, w którym Doktorant ogólnie scharakteryzował motywacje podjęcia zagadnień związanych z jedną z efektywnych aktywnych metod intensyfikacji wymiany ciepła ze wspomaganie mechanicznym. Doktorant w sposób ogólny scharakteryzował podejmowane zagadnienia oraz przedstawił wykonane badania.

2. **Wprowadzenie do zagadnienia**. Jest to rozdział obejmujący trzy podrozdziały, którego celem jest wprowadzenie czytelnika w podejmowaną tematykę badawczą. W rozdziale tym Doktorant omówił ideę metody wspomaganie mechanicznego. Na podstawie przykładu wymiany ciepła przez przegrodę płaską przedstawił mechanizm, który odpowiada za intensyfikację wymiany ciepła w warunkach wspomaganie mechanicznego polegającego na zrywaniu warstwy przyściennej, które są stosowane w wymiennikach ciepła typu skrobakowego. W dalszej części rozdziału Doktorant przedstawił dostępne w literaturze modele analityczne wymiany ciepła w warunkach wspomaganie mechanicznego. Podał wzory pozwalające na obliczenie współczynnika wnikania ciepła w takich warunkach. Rozdział ten kończy omówienie metod eksperymentalnego wyznaczenia gęstości strumienia ciepła, a w tym także metody, która została wykorzystana przez Doktoranta podczas badań w laboratorium.

3. **Przegląd literatury**. Jest to obszerny rozdział podzielony na trzy podrozdziały. W części pierwszej Doktorant zebrał dostępną w literaturze wiedzę na temat wspomaganie mechanicznego. Zakres wiedzy odnosi się do okresu od roku 1930, kiedy pojawił się pierwszy

artykuł na ten temat, do lat osiemdziesiątych dwudziestego wieku. Doktorant omówił najważniejsze wnioski z poszczególnych prac w porządku chronologicznym. W części drugiej została przedstawiona wiedza na temat wymienników skrobakowych. Zakres prac dla tej części mieści się od roku 1980 do 2014. Kończącą część pracy stanowią wnioski z przeprowadzonego przeglądu literatury. W tej części Doktorant krytycznie opisał dotychczasowy stan wiedzy i wskazał możliwości poprawy istniejących modeli matematycznych. Wykazał także, że aktualny stan wiedzy wymaga głębszych badań na temat mechanizmów transportu masy, pędu i energii występujących podczas wspomaganie mechanicznego.

3. Sformułowanie tezy, celów i zakresu pracy. W rozdziale tym Doktorant sformułował zasadniczy cel pracy jakim jest „dalsze poznanie mechanizmów transportu masy, pędu i energii podczas okresowego usuwania płynu z powierzchni wymiany ciepła”. Następnie podana została teza pracy oraz podano cele naukowe oraz zakres pracy doktorskiej.

4. Obliczenia numeryczne. Rozdział czwarty rozprawy obejmuje obszerny opis oraz wyniki obliczeń numerycznych. Rozdział składa się z dwóch podrozdziałów, z których pierwszy dotyczy obliczeń w przestrzeni dwuwymiarowej, natomiast drugi przedstawia pełny model trójwymiarowy.

5. Stanowisko badawcze. W rozdziale tym Doktorant przedstawił w sposób szczegółowy stanowisko badawcze do wyznaczania współczynnika wnikania ciepła w warunkach wspomaganie mechanicznego. Została przedstawiona zasada działania stanowiska badawczego oraz szczegóły konstrukcyjne. W dalszej części rozdziału Doktorant dokładnie opisał metodykę badawczą oraz opisał procedury przeprowadzonych doświadczeń. W końcowej części rozdziału Doktorant podał metodę, za pomocą której wyznaczone zostały niepewności pomiarowe.

6. Wyniki badań doświadczalnych. W rozdziale szóstym rozprawy zaprezentowano wyniki własnych prac eksperymentalnych w zakresie mechanicznego wspomaganie wymiany ciepła. Wyniki przedstawiono dla trzech głównych wielkości: gęstości strumienia ciepła, współczynnika wnikania ciepła oraz liczby Nusselta. Wyniki badań eksperymentalnych porównano z wynikami wybranych modeli analitycznych. Ponadto - porównano wyniki doświadczalne z wynikami uzyskanymi za pomocą modelu numerycznego trójwymiarowego.

7. Podsumowanie i wnioski. W rozdziale tym w sposób syntetyczny podsumowano uzyskane w rozprawie wyniki oraz sformułowano najistotniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych badań.

8. Bibliografia zawiera 120 pozycji literatury i obejmuje najnowsze publikacje z książek, renomowanych czasopism oraz konferencji naukowych. 42 cytowane opracowania pochodzą z ostatnich 10 lat. Doktorant cytuje siedem własnych publikacji, spośród których pozycja [12] znajduje się na tzw. Liście Filadelfijskiej (Część A Wykazu czasopism naukowych MNiSW) oraz pozycja [10] w Części B Wykazu czasopism naukowych MNiSW.

II. Cel i zakres rozprawy

Doktorant sformułował cel oraz zakres rozprawy wprost w Rozdziale 3. Cel rozprawy brzmi następująco:

”Celem pracy doktorskiej jest dalsze poznanie mechanizmów transportu masy, pędu i energii podczas okresowego usuwania płynu z powierzchni wymiany ciepła. Wiedza ta pozwoli na weryfikację modeli matematycznych oraz na sformułowanie wytycznych do obliczania współczynnika wnikania ciepła w takich warunkach. Obecnie jako główny model matematyczny uważa się model wyprowadzony na podstawie założeń teorii penetracji”.

W rozprawie sformułowano także wprost tezę w postaci następującej:

„Podczas mechanicznego wspomaganie wymiany ciepła w warunkach przepływu turbulentnego, wielkość szczeliny pomiędzy elementem ruchomym zaburzającym przepływ a powierzchnią wymiany ciepła nie wpływa znacząco na wartość przekazywanego strumienia ciepła. W zakresie laminarnym wpływ wielkości szczeliny nie może być pominięty i z tego powodu model matematyczny oparty na teorii penetracji nie powinien być stosowany”.

Teza pracy została sformułowana w sposób precyzyjny i klarowny, co umożliwia dokonanie jej weryfikacji w oparciu o materiał badawczy zaprezentowany w rozprawie.

Zakres oraz cele naukowe rozprawy został również sformułowane wprost na str. 39-40. Zakres pracy obejmuje:

- usystematyzowanie stanu wiedzy w zakresie metody intensyfikacji wymiany ciepła za pomocą mechanicznego zaburzania termicznej warstwy przyściennej;
- modelowanie numeryczne wymiany ciepła w warunkach periodycznego zaburzania termicznej warstwy przyściennej;
- zaprojektowanie i zbudowanie stanowiska badawczego;
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych w zakresie wpływu prędkości obrotowej, wielkości szczeliny pomiędzy końcem ostrza łopatką i ścianką, oraz rodzaju czynnika roboczego na wymianę ciepła.

Cel oraz zakres rozprawy zostały sformułowane na podstawie analizy dotychczasowego stanu wiedzy w zakresie zagadnień intensyfikacji wymiany ciepła poprzez zrywanie termicznej warstwy przyściennej. Cel rozprawy jest sformułowany w sposób jasny i precyzyjny, zaś program prac badawczych zarówno w obszarze modelowania numerycznego, jak również badań eksperymentalnych, który został zaproponowany przez Doktoranta - ze sformułowaniem celem w pełni koresponduje. W moim przekonaniu można stwierdzić, iż zawarty w recenzowanej rozprawie doktorskiej materiał badawczy w postaci kompleksowo przeprowadzonych analiz wykonanych w oparciu o uzyskane wyniki modelowania numerycznego oraz badań eksperymentalnych - w pełni odpowiada sformułowanemu celowi oraz zakresowi rozprawy.

III. Treść rozprawy

We Wstępie Doktorant w sposób ogólny scharakteryzował podejmowane zagadnienia badawcze, którymi są zagadnienia intensyfikacji wymiany ciepła za pomocą wspomaganie mechanicznego, tj. poprzez zrywanie warstwy przyściennej. Metodę tę stosuje się w wymiennikach typu skrobakowego. Doktorant wskazał na to, że podejmowane zagadnienie ma wciąż otwarty charakter pomimo wielu podejmowanych wcześniej prac opublikowanych w literaturze naukowej, co stanowi zasadniczą przesłankę do podjęcia tych zagadnień. Doktorant wskazał, że w rozprawie podjęto zarówno prace w zakresie modelowania numerycznego, jak również badań eksperymentalnych.

W Rozdziale 1 w sposób ogólny scharakteryzowano podstawowe idee metody intensyfikacji wymiany ciepła za pomocą wspomagania mechanicznego. Zaprezentowano mechanizm wymiany ciepła w warunkach okresowego zaburzania ruchu płynu w pobliżu ścianki. Omówiono zastosowanie tej metody ze szczególnym naciskiem na skrobakowe wymienniki ciepła. Opisano budowę oraz zasadę działania skrobakowego wymiennika ciepła. Omówiono dostępne w literaturze modele matematyczne wymiany ciepła w warunkach okresowego zaburzania ruchu płynu w pobliżu ścianki. Opisano trzy modele o wzrastającym stopniu skomplikowania: model cienkiego filmu, model oparty na teorii penetracji oraz model teorii penetracji cienkiego filmu. Opisano podstawowe założenia poczynione przy konstruowaniu modeli oraz podano zależności pozwalające na obliczenie współczynnika wnikania ciepła. Zaznaczono, że w literaturze istnieją także inne modele, jednakże uwzględniają one wpływ przepływu osiowego. W ramach niniejszej rozprawy Doktorant podjął jednakże jedynie przypadek wymiany ciepła bez wymuszonego przepływu płynu w kierunku osiowym, toteż modele te nie były dalej szczegółowo omawiane. W końcowej części rozdziału omówiono metody pomiaru gęstości strumienia ciepła za pomocą odpowiedniego czujnika. Doktorant przedstawił budowę przetwornika oraz zasadę jego działania. Omówiona metoda była wykorzystana podczas badań laboratoryjnych Doktoranta.

Rozdział 2 jest przeglądem aktualnego stanu wiedzy w podejmowanej dziedzinie. Doktorant szczegółowo przeanalizował dostępne w literaturze prace w zakresie wymiany ciepła w warunkach okresowego zaburzania ruchu płynu w pobliżu ścianki. Przedstawione zostały zarówno prace eksperymentalne jak i teoretyczne. W większości przypadków uzyskane rezultaty w zakresie wymiany ciepła zostały podane w postaci zależności empirycznych otrzymanych na drodze analizy wymiarowej. W końcowej części Rozdziału Doktorant zaznaczył, że po roku 1980 prace głównie koncentrowały się na zagadnieniach konstrukcyjnych wymienników skrobakowych, zaś w mniejszym stopniu na próbach wyjaśnienia aspektów fizycznych mechanizmów wymiany ciepła podczas zrywania przyściennej warstwy termicznej. Dalsza część rozdziału stanowi przegląd literatury w zakresie rozwiązań wymienników skrobakowych. Doktorant szczegółowo omówił wyniki prac eksperymentalnych i numerycznych oraz podał zasadnicze wnioski wynikające z przeprowadzonych przez innych badaczy prac. Doktorant podsumował przeprowadzony przegląd literatury w zakresie wymiany ciepła w warunkach wspomagania mechanicznego. Dokonał on krytycznego przeglądu poczynionych w dostępnych modelach matematycznych założeń i wskazał na możliwości poprawy predyktywności tychże modeli. Wyciągnął on przy tym istotny wniosek, że wymiana ciepła w warunkach okresowego zaburzania ruchu płynu odbywa się głównie przez konwekcję, nie zaś przez przewodzenie. Na końcu omawianego Rozdziału Doktorant podkreślił, że badania prezentowane w rozprawie dotyczą układu zamkniętego, nie zaś przepływowego, co stanowiłoby dodatkowy element komplikujący zagadnienie z uwagi na istotny wpływ składowej osiowej prędkości płynu.

W Rozdziale trzecim Doktorant sformułował zasadnicze cele, tezę oraz zakres rozprawy. Omówiłem je w Części II recenzji.

Rozdział 4 dotyczy zagadnień modelowania numerycznego wymiennika skrobakowego. Doktorant opisał zagadnienie testowe dla przypadku dwuwymiarowej wymiany ciepła w warunkach wspomagania mechanicznego. Podano model fizyczny wymiennika skrobakowego wyposażonego w cztery prostoliniowe łopatki skrobiące. Zaprezentowano model matematyczny ustalonej wymiany ciepła w warunkach wspomagania mechanicznego. Opisano szczegółowo równania transportu masy, pędu i energii. Doktorant omówił metodę

pojedynczego układu współrzędnych SRF (ang.: Single Reference Frame), którą wykorzystał podczas obliczeń. Następnie dokładnie opisano warunki brzegowe oraz równania definicyjne parametrów bezwymiarowych. Podano szczegółowe informacje dotyczące obliczeń numerycznych, a w tym rozdzielczość siatek numerycznych oraz wielkości szczelin bezwymiarowych, dla których prowadzono obliczenia. Scharakteryzowano warunki zbieżności rozwiązania numerycznego. Zaprezentowano wyniki obliczeń walidacyjnych modelu numerycznego, które porównano z danymi dostępnymi w literaturze. Doktorant przedstawił wyniki własnych obliczeń z zastosowaniem modelu dwuwymiarowego i przeprowadził dyskusję tych wyników zaprezentowanych w postaci bezwymiarowej. Przedstawione zostały rozkłady bezwymiarowej prędkości, ciśnienia oraz temperatury w wymienniku modelowym. Dokonano szczegółowej analizy obszaru przepływowego w pobliżu ostrza łopatki skrobiącej. Omówiono wpływ bezwymiarowych parametrów: liczby Prandtla oraz szczeliny bezwymiarowej na wymianę ciepła. Wyniki obliczeń numerycznych zostały porównane z wynikami modeli matematycznych omawianymi w Rozdziale 1. Dokonano dodatkowych obliczeń dla dwóch liczb Reynoldsa w celu zbadania jej wpływu na wymianę ciepła. Uzyskane wyniki opracowano w formie równania kryterialnego, w którym uwzględniono wpływ szczeliny bezwymiarowej. Doktorant sformułował wnioski wynikające z uzyskanych wyników dla modelu dwuwymiarowego.

W Rozdziale 4.2 podjęto formułowanie modelu numerycznego trójwymiarowego. Podano model fizyczny zagadnienia oraz omówiono zastosowane warunki brzegowe. Zaprezentowano model matematyczny wymiany ciepła w warunkach wspomaganie mechanicznego. W modelu dodatkowo uwzględniono wpływ siły grawitacji. Ponadto zaznaczono, że obliczenia metodą ustaloną nie dały dokładnych wyników. Z tego powodu wykonano obliczenia metodą ślizgającej siatki numerycznej (ang. sliding mesh). Metoda ta jest metodą nieustaloną, w wyniku czego w równania pojawił się dodatkowy człon pochodnej po czasie. Doktorant przedstawił warunki brzegowe oraz zaprezentował geometrię modelu trójwymiarowego. Doktorant podał szczegóły symulacji numerycznych. Zostały zaprezentowane użyte siatki numeryczne oraz wielkości szczelin pomiędzy końcem łopatki a powierzchnią wymiany ciepła. Podano wartość kroku czasowego oraz podano sposób obliczania współczynnika wnikania ciepła i liczby Nusselta. Doktorant omówił wyniki symulacji numerycznych dla przypadku trójwymiarowego. Podano rozkłady prędkości oraz temperatury w przekroju w środkowej części wysokości wału. Dokonano analizy obszaru przepływowego w pobliżu ostrza łopatki. Podano rozkłady prędkości i temperatur w szczelinie. Wyniki jakościowo odniesiono do wyników literaturowych. Podano wyniki numeryczne dla gęstości strumienia ciepła, współczynnika wnikania ciepła oraz liczby Nusselta w funkcji szczeliny bezwymiarowej przy stałej liczbie Reynoldsa. Doktorant przedstawił wnioski z przeprowadzonych obliczeń trójwymiarowych wymiany ciepła w warunkach wspomaganie mechanicznego.

W Rozdziale 5 Doktorant przedstawił stanowisko badawcze do wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła w warunkach wspomaganie mechanicznego. Omówił następnie zasadę działania stanowiska badawczego oraz zaprezentował w szczególności sposób rozwiązanie konstrukcyjne tego stanowiska. Doktorant omówił szczegółowo metodę pomiarową, którą wykorzystał podczas badań doświadczalnych, a także przedstawił sposób pomiaru wielkości mierzonych na stanowisku badawczym:

- średniej temperatury gazu w cylindrze;
- średniej temperatury ścianki wewnętrznej cylindra;
- gęstości strumienia ciepła;

- średniej temperatury zewnętrznej ścianki cylindra;
- temperatury wody chłodzącej;
- strumienia objętości wody chłodzącej;
- mocy grzałki elektrycznej.

W końcowej części rozdziału przedstawiono system akwizycji danych pomiarowych opracowany w programie LabVIEW. Przedstawiono zastosowaną w badaniach doświadczalnych procedurę badawczą. Omówiono szczegółowo wykonywane czynności podczas badań zarówno w zakresie przepływu turbulentnego jak i laminarnego. Podano zakresy parametrów zmienianych na stanowisku badawczym, dla których badano wpływ na wymianę ciepła:

- prędkości obrotowej;
- rodzaju czynnika gazowego;
- wielkości szczeliny.

Omówiono sposób wyznaczania błędów pomiarowych, a także oceniono błędy pomiaru zasadniczych wielkości mierzonych w prezentowanych badaniach, tj. współczynnika wnikania ciepła oraz prędkości obrotowej.

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych omówiono w Rozdziale 6. Wyniki opracowano w formie wykresów gęstości strumienia ciepła w funkcji prędkości obrotowej z zaznaczonymi wartościami niepewności pomiarowych. Wyniki przedstawiono dla różnych wartości szczelin oraz różnych czynników gazowych. Uzyskane wyniki odniesiono do prac innych badaczy oraz wyjaśniono przyczyny odstępstw uzyskane w niektórych przypadkach. Zaprezentowano zmierzone wartości współczynnika wnikania ciepła w warunkach przepływu turbulentnego w funkcji prędkości obrotowej. Pokazano wpływ wielkości szczeliny oraz rodzaju czynnika roboczego na wymianę ciepła. Uzyskane wyniki porównano z dostępnymi modelami matematycznymi dla wymiany ciepła w warunkach wspomagania mechanicznego. Wyjaśniono przyczynę zbieżności wyników eksperymentalnych z wartościami otrzymanymi za pomocą modelu opartego na teorii penetracji. Szczegółowo omówiono warunki doświadczenia i ich wpływ na uzyskane wyniki. Wyniki odniesiono także do wcześniejszych prac innych autorów. Zaprezentowano uzyskane wartości liczby Nusselta dla zakresu przepływu turbulentnego. Ze względu na nieduży wpływ na wymianę ciepła zarówno rodzaju użytego czynnika jak i wielkości szczeliny, Doktorant opracował wyniki w formie zbiorczych wykresów. Dla każdego rodzaju czynnika podał on zależności kryterialne na liczbę Nusselta w funkcji liczby Reynoldsa. Ponadto zebrano wszystkie wyniki doświadczalne na jednym wykresie. Porównano wartości uzyskiwane za pomocą zbiorczego równania kryterialnego z wynikami prac innych autorów, które są dostępne w literaturze. Doktorant dokonał ostatecznej weryfikacji tezy rozprawy. Wyniki badań doświadczalnych gęstości strumienia ciepła dla zakresu laminarnego porównał on z wynikami numerycznymi uzyskanymi za pomocą modelu trójwymiarowego. Geometria doświadczenia oraz warunki brzegowe były dokładnym odzwierciedleniem symulacji numerycznej przeprowadzonej w Rozdziale 4.2. Doktorant podjął dyskusję nad wynikami walidacji modelu numerycznego w zakresie gęstości strumienia ciepła. Na podstawie modelu numerycznego dokonano obliczeń liczby Nusselta, zaś uzyskane wyniki porównano z dostępnymi modelami matematycznymi. Pokazano, że model oparty na teorii penetracji źle opisuje wymianę ciepła podczas wspomagania mechanicznego w zakresie przepływu laminarnego.

Rozprawę kończy podsumowanie, w którym Doktorant odniósł się w szczególności do wyników zamieszczonych oraz diskutowanych w Rozdziale 6. Doktorant sformułował

szczegółowe wnioski końcowe stwierdzając, że stanowią one podstawę do poglądu, iż postawiona w rozprawie teza została udowodniona.

IV. Oryginalność rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy złożonych zagadnień intensyfikacji wymiany ciepła poprzez okresowe zrywanie warstwy przyściennej. Zagadnienie to ma szczególne znaczenie w konstrukcji wymienników ciepła typu skrobakowego.

Na podkreślenie zasługuje to, że w pracy podjęto w sposób kompleksowy zarówno zagadnienia modelowania numerycznego procesu intensyfikacji wymiany ciepła poprzez okresowe zrywanie warstwy przyściennej, zarówno z zastosowaniem modelu osiowo-symetrycznego, jak również dla pełnej geometrii trójwymiarowej, lecz także zostały przeprowadzone systematyczne badania eksperymentalne na oryginalnym, specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym. Warto podkreślić, że istniejące modele nie pozwalają na dokładną predykcję współczynników wnikania ciepła, zaś sam mechanizm intensyfikacji wymiany ciepła należy uznać za problem o otwartym charakterze pomimo, że jest ono podejmowane od wielu dziesięcioleci. Jest rzeczą znamioną, że Doktorant zaproponował program badawczy w pełni oryginalny w odniesieniu do wcześniej podejmowanych prac badawczych w tej dziedzinie. Zaprezentowany w rozprawie materiał analityczny wymagał znacznego nakładu pracy oraz inwencji i stanowi on niewątpliwie oryginalne osiągnięcia naukowe Doktoranta. Przesądza to w mojej ocenie o oryginalności pracy oraz istotnym wkładzie w rozwój techniki cieplnej. Uzyskany materiał badawczy w pełni pozwala na stwierdzenie, że cel oraz zakres recenzowanej rozprawy zostały w pełni zrealizowane.

Za szczególne osiągnięcia Doktoranta uważam określenie wpływu wielkości szczeliny w warunkach ruchu laminarnego na intensyfikację wymiany ciepła, co Doktorant uzyskał na podstawie wyników obliczeń numerycznych oraz własnych badań eksperymentalnych.

V. Wartości poznawcze pracy

W rozprawie przedstawiono wyniki modelowania numerycznego wymiany ciepła w wymienniku typu skrobakowego z zastosowaniem modelu osiowo-symetrycznego oraz dla pełnej geometrii trójwymiarowej wymiennika. Zaproponowany model numeryczny trójwymiarowy został pozytywnie walidowany za pomocą własnych badań eksperymentalnych, w związku z czym Doktorant w oparciu o ten model dokonał szczegółowej analizy zjawisk cieplno-przepływowych zachodzących w warunkach okresowego zrywania warstwy przyściennej dla ważnego technicznie zakresu szerokości szczeliny pomiędzy skrobakiem a cylindrem wymiennika oraz dla różnych prędkości obrotowych wirnika z łopatkami skrobiącymi. Doktorant wykazał znaczący wpływ szerokości szczeliny pomiędzy skrobakiem a cylindrem wymiennika dla warunków ruchu laminarnego wywołanego obrotami wirnika. Istotnym osiągnięciem była także walidacja różnych analitycznych modeli wymiany ciepła w wymiennikach skrobakowych. Doktorant zaproponował także własną korelację ważną dla zastosowanej geometrii łopatek skrobiących dla przypadku zastosowania gazu jako czynnika roboczego oraz w warunkach braku przepływu osiowego w wymienniku.

Zaprezentowane w rozprawie rezultaty wnoszą w moim przekonaniu istotny wkład poznawczy w dziedzinie wymiany ciepła – zwłaszcza w zakresie aktywnych metod intensyfikacji konwekcyjnej wymiany ciepła.

VI. Wartości użytkowe pracy

Recenzowana rozprawa ma niewątpliwie także walor aplikacyjny, bowiem podejmowane zagadnienie intensyfikacji wymiany ciepła poprzez okresowe mechaniczne zrywanie warstwy przyściennej może mieć zastosowanie w szeregu zagadnień dotyczących wymiany ciepła, zaś w sposób bezpośredni ma zastosowanie w konstrukcji wymienników ciepła typu skrobakowego. Wymienniki ciepła tego typu są stosowane w przemyśle spożywczym, a także mogą mieć szerokie zastosowanie w przemyśle chemicznym. Jednym z kluczowych aspektów ograniczających szersze zastosowanie tego typu wymienników jest brak dokładnych metod predykcji wymiany ciepła, co było jedną z przesłanek do podjęcia przez Doktoranta tych zagadnień w ramach pracy doktorskiej.

VII. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

VII.1. Uwagi o charakterze merytorycznym

W rozprawie zaprezentowano oryginalne oraz kompleksowe ujęcie zagadnienia. Zaprezentowany w rozprawie materiał zarówno w postaci wyników złożonych obliczeń numerycznych oraz przeprowadzonych w sposób kompleksowy badań eksperymentalnych na wykonanym przez Doktoranta stanowisku - wymagały znacznego nakładu pracy oraz inwencji i stanowią niewątpliwie oryginalne osiągnięcia naukowe Doktoranta. Poniższe uwagi, mające w dużej mierze charakter komentarzy bądź sugestii - nie umniejszają mojej pozytywnej oraz bardzo wysokiej oceny rozprawy doktorskiej.

1. Nie jest zrozumiałe, dlaczego Doktorant zdecydował się na podjęcie badań eksperymentalnych wyłącznie dla gazów, zaś nie podjął takich badań dla przypadków innych płynów, chociażby takich jak analizowanych w Rozdziale 4.1 wody oraz aniliny. W ten sposób w istotny sposób ograniczony został zakres podejmowanych prac badawczych, ponieważ prowadzone one były dla substancji o bardzo zbliżonych wartościach liczby Prandtla (rzędu jedności). Warto w tym aspekcie wskazać, że w Rozdziale 4.1 (w którym przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych dla zagadnienia osiowo-symetrycznego) wskazano na znaczący wpływ liczby Prandtla na intensyfikację wymiany ciepła.
2. Nie jest także zrozumiałe, dlaczego jako kryterium doboru różnych substancji do badań eksperymentalnych Doktorant przyjął gaz jedno-, dwu- oraz wieloatomowy. Kryterium takie ma zastosowanie w teorii gazów doskonałych, jednakże nie wyjaśniono w rozprawie, jakich efektów można spodziewać się dla każdej z grup gazów, skoro takie kryterium zostało w rozprawie przyjęte. Prezentowany w rozprawie materiał badawczy wskazuje, że kryterium to jest raczej niezasadne, bowiem dla poszczególnych grup gazów nie wykazano żadnych istotnych efektów różnicujących ich wpływ na wymianę ciepła.
3. W Rozdziale 4.1.3 podano szczegóły dotyczące obliczeń numerycznych dla zagadnienia osiowosymetrycznego. Nie podjęto jednakże w sposób bardziej szczegółowy aspektów zagęszczania siatki w pobliżu ostrzy łopatek, ani czy gęstość siatki obliczeniowej była dobrana w sposób odpowiedni dla analizowanego przypadku.

4. W Rozdziale 4.1, w oparciu o uzyskane wyniki obliczeń numerycznych dla zagadnienia osiowo-symetrycznego, zaproponowano zależność kryterialną (4.16). Nie jest zrozumiałym charakter ani sens tejże zależności, bowiem nie zamieszczono w pracy wartości stałych A oraz B występujących w tej zależności. Zamieszczono natomiast szczególną postać zależności kryterialnej w postaci wzoru (4.17), lecz jak wskazano w tekście powyżej tego wzoru, jest ona opracowana wyłącznie dla liczby Reynoldsa mieszania $Re_m = 1000$ oraz dla liczby Prandtla dla powietrza $Pr = 0.71$. Co więcej, zaproponowanej zależności nie skonfrontowano w sposób bezpośredni z wynikami badań eksperymentalnych.
5. W Rozdziale 4.2, str. 78 stwierdzono, że z przedstawionego na Rys. 4.23 obrazu izoterm wynika, że „wraz ze zmniejszaniem szczeliny następuje zmniejszenie grubości termicznej warstwy przyściennej”. Na podstawie wyników zamieszczonych na tym rysunku można wyciągnąć jednakże wniosek wprost przeciwny.
6. Pewne zastrzeżenia można wnieść co do sposobu dostarczania mocy grzewczej do gazu zawartego w przestrzeni roboczej testowanego wymiennika. Moc ta dostarczana była mianowicie za pomocą grzałki, przez co pomiar średniego współczynnika wnikania ciepła dla konwekcyjnej wymiany ciepła był zakłócony z uwagi na radiacyjną wymianę ciepła. Doktorant zresztą sam zwrócił na ten aspekt uwagę w Rozdziale 6 przy omawianiu uzyskanych wyników eksperymentalnych. Co więcej, zastosował on dwie różne moce grzałki dla różnych zakresów prędkości obrotowych wirnika tak, aby zmniejszyć efekt radiacyjnej wymiany ciepła. Tym niemniej należałoby ocenić przynajmniej rząd wielkości składowej radiacyjnej współczynnika wnikania ciepła, aby można było właściwie rozumieć, na ile przedstawione wyniki mogą być konfrontowane z wartościami teoretycznymi z założenia dotyczącymi jedynie konwekcyjnej wymiany ciepła.
7. W Rozdziale 5.3, str. 90, stwierdzono, że „dzięki niewielkim rozmiarom zapewniona została mała bezwładność termoelementu”. Należałoby jednakże z formalnego punktu widzenia skonfrontować stałą czasową termoelementu z czasem charakterystycznym zjawiska aby mieć pewność, że w całym badanym zakresie prędkości obrotowych wirnika stwierdzenie to ma pełne uzasadnienie. Dalej, na str. 92 stwierdzono, że „błąd pomiaru temperatury ścianki stał się niemierzalny”, co należałoby raczej potraktować jako niezręczność w sformułowaniu. Błąd temperatury tutaj omawiany wymagałby jednakże porównania z błędem pomiaru różnicy temperatur zadeklarowanym na str. 102 ($\Delta T = 0.4$ K). Pomiar różnicy temperatur z taką dokładnością wymaga kalibrowania toru pomiarowego, o czym w pracy nie wspomniano.
8. W Rozdziale 6.1 stwierdzono, że uzyskane wyniki własnych badań eksperymentalnych w zakresie intensyfikacji wymiany ciepła są znacznie niższe od wyników badań innych badaczy, np. Hagge i Junkhana (1975), tekst na str. 106. Doktorant słusznie upatruje tu różnic w kształcie łopatek skrobiących. Jednakże zagadnienie to posiada kluczowe znaczenie z punktu widzenia predykcji wymiany ciepła w wymiennikach ciepła typu skrobakowego. Szkoda zatem, że w pracy nie podjęto szerzej tego zagadnienia przynajmniej w zakresie modelowania numerycznego prowadzonego dla łopatek skrobiących o różnej geometrii. W aktualnym stanie rzeczy materiał zaprezentowany w pracy odnosi się wyłącznie do jednej geometrii łopatek skrobiących.
9. Nie zamieszczono zakresu ważności dla zależności kryterialnej uzyskanej na podstawie własnych badań eksperymentalnych, wzór (6.3). Ponadto nie jest zrozumiałe, dlaczego nie uwzględniono w tej zależności szerokości względnej szczeliny (δ/D), ponieważ można wnioskować w oparciu o zaprezentowany w Rozdziale 6.1 materiał eksperymentalny, że wpływ ten jest stosunkowo mały, jednakże nie pomijalny.

VII. 2. Uwagi drobniejsze oraz porządkowe

Należy podkreślić niezwykle staranne przygotowanie rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Zwraca uwagę przejrzystość tekstu, a także szczególnie wysoka jakość rysunków. Praca pozbawiona jest błędów literowych w tekście. Poniżej zawarte uwagi nie wpływają na jednoznacznie pozytywną ocenę rozprawy i mają w dużej mierze charakter sugestii, które pozwalają sobie wypunktować mając na uwadze potencjalne wykorzystanie materiału zawartego w rozprawie w dalszych publikacjach Doktoranta.

- Nie jest zrozumiałe, dlaczego przyjęto cezurę roku 1980 w przeglądzie literatury zawartej w Rozdziale 2. Warto podkreślić, że nie zamieszczono podrozdziału prezentującego stan wiedzy po roku 1980. W Rozdziale 2.1 skoncentrowano się głównie na zagadnieniach dotyczących aspektów fizycznych oraz modelach analitycznych zależnościach kryterialnych opisujących wpływ zjawiska okresowego zrywania warstwy przyściennej na wymianę ciepła, zaś w Rozdziale 2.2 raczej na aspektach związanych z badaniami wymienników ciepła typu skrobakowego.
- W Rozdziale 2.1, str. 86, mówi się o badaniach Ramdasa i in. (1980), że były prowadzone dla zakresu laminarnego dla gęstych cieczy, jednakże jako kryterium Doktorant zastosował kryterium lepkościowe, nie zaś gęstościowe: $\eta > 100$ cP.

VIII. Uwagi końcowe

Praca napisana jest w sposób staranny, zamieszczono w niej wiele szczegółowych informacji pozwalających na dokładne przeanalizowanie materiału badawczego. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny bądź porządkowy i powinny być traktowane raczej jako pomoc w zakresie wykorzystania uzyskanego materiału w dalszej pracy nad zagadnieniami intensyfikacji wymiany ciepła. Uwagi te nie pomniejszają bardzo wysokiej wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy.

Podkreślenia wymaga, że w ramach rozprawy podjęto w sposób kompleksowy zagadnienia modelowania numerycznego bardzo złożonych zagadnień wymiany ciepła, a także zostało opracowane dedykowane stanowisko badawcze oraz przeprowadzone w sposób systematyczny badania eksperymentalne. Prace te wymagały wyjątkowo znacznego nakładu pracy oraz inwencji Doktoranta. Przy ocenie rozprawy należy także w moim przekonaniu wziąć pod uwagę, że dostępne w literaturze modele teoretyczne bądź zależności kryterialne nie pozwalały na dokładną predykcję współczynników wnikania ciepła, a także mechanizm intensyfikacji wymiany ciepła jest problem o otwartym charakterze pomimo, że jest ono podejmowane od wielu dziesięcioleci. Doktorant zaproponował program badawczy w pełni oryginalny w odniesieniu do wcześniej podejmowanych prac badawczych w tej dziedzinie, uzyskując wartościowe poznawczo oraz w pełni oryginalne rezultaty.

IX. Wniosek do Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest bardzo wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod właściwych wymianie ciepła. Zastosowane przez Doktoranta podejście w zakresie formułowania modelu matematycznego wymiennika ciepła oraz jego walidacji eksperymentalnej uważam za właściwe. Praca stanowi w pełni oryginalny

i ważny wkład do badań w zakresie wymiany ciepła. Wymaga szczególnego podkreślenia faktu opracowania modelu matematycznego w sposób kompleksowy, jak również przeprowadzenia w sposób systematyczny i kompleksowy jego walidacji eksperymentalnej, co w znacznym nadmiarze spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

1. Rozprawa doktorska mgr inż. Przemysława Błasiaka spełnia wymagania Art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej: Mechanika.
3. Wniosuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Dawid Młynarski