



Kielce, 22.08.2018

dr hab. inż. Magdalena Piasecka, prof. PŚk
Politechnika Świętokrzyska
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
tel.: (41) 3424320
email: tmpmj@tu.kielce.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej

mgra inż. Michała Bajora

pt. *Intensyfikacja wymiany ciepła poprzez zastosowanie techniki strugowej w rekuperatorach*

Promotor: dr hab. inż. Jan Wajs

1. Charakterystyka ogólna

Rozprawa przedstawiona jest na 128 stronach maszynopisu formatu A4 w języku polskim. Na pracę składa się dziesięć rozdziałów, wykaz literatury i załączniki. Zawarto w niej 85 rysunków, 17 tabel i 111 zacytowanych pozycji bibliograficznych o charakterze poznawczym i technicznym, w większości publikacji w czasopismach w języku angielskim (w tym cztery publikacje i zgłoszenie patentowe, których współautorem jest Doktorant). Na początku rozprawy umieszczono spis ważniejszych oznaczeń, symboli greckich, indeksów dolnych oraz zestawienie liczb kryterialnych i ich definicje. Tytuły poszczególnych rozdziałów są następujące: (1) Wprowadzenie, (2) Klasyfikacja wymienników ciepła, (3) Metody intensyfikacji wymienników ciepła, (4) Teza, cel i zakres pracy, (5) Przedmiot badań, (6) Opis stanowiska badawczego, (7) Badania cieplno-przepływowe wymienników strugowych, (8) Analiza porównawcza wymiennika strugowego z wymiennikiem referencyjnym, (9) Analiza niepewności pomiarowych oraz (10) Podsumowanie i kierunki dalszych prac. Pracę uzupełnia siedem załączników.

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgra inż. Michała Bajora jest zagadnienie intensyfikacji wymiany ciepła w rekuperatorach, w których konstrukcji zastosowano technikę strugową. W przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych wykorzystano zmodyfikowaną (i opatentowaną) konstrukcję cylindrycznego wymiennika ciepła typu „rura w rurze”, w której napływ czynnika na powierzchnię wymiany ciepła następował przez przegrody perforowane. Eksperymenty przeprowadzono w warunkach konwekcyjnej

wymiany ciepła, przy czym nośnikiem grzewczym było powietrze, a ogrzewanym - woda. Wyniki badań posłużyły przeprowadzeniu analizy pod kątem uzyskania intensyfikacji wymiany ciepła i dla celów analizy oporów przepływu.

Wybór tematu rozprawy był podyktowany istotnym zagadnieniem w technice: poszukiwaniem wysokosprawnych kompaktowych wymienników ciepła, które mogą być stosowane w wielu dziedzinach energetyki, m. in. jako rekuperatory. Nieustanny postęp technologiczny jest przyczyną wzrostu wymagań energetycznych przy jednoczesnej tendencji do miniaturyzacji konstrukcji urządzeń. Zagadnienie ochrony środowiska naturalnego i efektywnego zarządzania energią jest jednym z najważniejszych elementów światowej polityki i priorytetem państw Unii Europejskiej oraz coraz intensywniej wymusza racjonalne podejście do tego zagadnienia, m. in. na drodze prawnej. Zagospodarowanie energii odpadowej jednoznacznie wpisuje się w aktualne priorytety polityki energetycznej i jednocześnie staje się coraz bardziej atrakcyjnym, również ekonomicznie, rozwiązaniem zarówno dla obiektów przemysłowych, jak i gospodarstw domowych. Głównym przedmiotem zainteresowania rozprawy jest zwiększanie efektywności kluczowych elementów systemów energetycznych, do których należą przepływowe wymienniki ciepła z niskotemperaturowymi czynnikami roboczymi. Jednym ze skutecznych sposobów zwiększenia efektywności energetycznej wymienników ciepła jest zastosowanie metod pasywnych, wśród których można wymienić: zwiększanie powierzchni wymiany ciepła wymienników czy przepływ zmodyfikowanych płynów roboczych (nanocieczy). Stosowanie metod pasywnych nie wymaga dostarczania dodatkowej energii. Jedną z technik pasywnych jest zastosowanie techniki strug uderzających w konstrukcji urządzeń i metoda ta, zdaniem recenzenta, posiada duży potencjał aplikacyjny.

W pracy skoncentrowano się na analizie wyników uzyskanych z badań przeprowadzonych na stanowisku badawczym z cylindrycznym wymiennikiem ciepła, w którego konstrukcji wykorzystano technikę strugową. Rozprawa zawiera analizę wyników badań ciepłno-przepływowych przeprowadzonych dla dwóch modelowych wymienników ciepłych z przegrodami perforowanymi (rury o różnej ilości otworów), wraz z oceną efektywności intensyfikacji wymiany ciepła w odniesieniu do każdego z wymienników, jak również do wymiennika referencyjnego. Warto podkreślić, iż Doktorant zaproponował własną korelację dotyczącą wymiany ciepła, dedykowaną dla cylindrycznych wymienników strugowych. Uzupełnieniem pracy jest analiza niepewności pomiarowych oraz szczegółowe raporty z wynikami badań, przedstawione w załącznikach. W części końcowej dysertacji, oprócz podsumowania, wskazano kierunki dalszych prac badawczych.

Autor sformułował następującą tezę: *Zastosowanie techniki strugowej w kompaktowych rekuperatorach przyczynia się do intensyfikacji wymiany ciepła, szczególnie dla przypadku wymiany ciepła z udziałem gazów*. Postawioną tezę Doktorant potwierdził dzięki zrealizowanym badaniom eksperymentalnym, obliczeniom matematycznym, wykonanym na podstawie wyników eksperymentów, przeprowadzonej analizie rezultatów oraz odniesieniem ich do wyników uzyskanych dla wymiennika referencyjnego, jak również literatury. Ważny element pracy stanowi wykonany przez Doktoranta przegląd literatury przedmiotu wraz z korelacjami opisującymi liczbę Nusselta, a istotnym osiągnięciem jest propozycja własnej korelacji, dedykowanej dla urządzeń o konstrukcjach wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych.

Uważam, że tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Bajora odpowiada światowym trendom poszukiwania metod intensyfikacji wymiany ciepła i konstrukcji wymienników ciepła, wspomagających efektywność energetyczną urządzeń. Aby poprawnie zweryfikować postawioną w dysertacji tezę należało: przedstawić rozwiązania konstrukcyjne urządzeń i wykonać prototypowe wymienniki ciepła, przeprowadzić zaplanowany program doświadczeń na skonstruowanym stanowisku badawczym, wykonać obliczenia na podstawie wyników eksperymentów i następnie przeanalizować zgromadzone dane. Własne wyniki należy odnieść do literatury, aby sprawdzić ich poprawność i ocenić końcowe efekty pracy. Tylko takie kompleksowe działanie pozwala na właściwą weryfikację otrzymanych rezultatów. W niniejszej pracy takie postępowanie wykonano, co: i) prowadzi do oceny efektywności pracy testowanych wymienników ciepła, ii) pozwala na ocenę ich zdolności do przenoszenia strumieni ciepła, iii) wskazuje na korzystne pod względem efektywności energetycznej warunki pracy urządzeń, zarówno pod względem konstrukcyjnym (wybór przegrody perforowanej), jak również po kątem wyboru korzystnych warunków cieplno-przepływowych, które pozwolą uzyskać możliwie najwyższe współczynniki przejmowania ciepła i w efekcie – wskazują na intensyfikację wymiany ciepła w testowanej konstrukcji rekuperatora. Mimo, iż liczba prac na przestrzeni ostatnich lat oraz zainteresowanie różnymi formami intensyfikacji wymiany ciepła stale wzrasta, to jednak prace oparte na wynikach badań doświadczalnych nie są bardzo liczne i rzadko można odnaleźć w literaturze ciekawe udokumentowane rozwiązania i zweryfikowane doświadczalnie konstrukcje urządzeń technologicznych. Zaproponowanego w pracy Doktoranta rozwiązania technologicznego nie odnaleziono w żadnej innej pracy naukowej, na co wskazuje również zgłoszenie patentowe dot. konstrukcji wymiennika ciepła wykorzystującego technikę mikrostrugową i uzyskany patent.

Poniżej przedstawię skrótowo zawartość pracy doktorskiej mgr inż. Michała Bajora.

Trzy pierwsze rozdziały dysertacji wprowadzają do tematu rozprawy, pozwalają na umiejscowienie tematyki pracy w literaturze oraz przedstawiają przegląd literatury przedmiotu. Pierwszy rozdział pracy stanowi wprowadzenie do zagadnień, które stanowią tematykę niniejszej pracy. W drugim rozdziale pracy przedstawiono klasyfikacje wymienników ciepła oraz definicję współczynnika kompaktowości wymienników. W rozdziale trzecim omówiono metody intensyfikacji wymiany ciepła, podkreślając charakter i rodzaje wybranych metod pasywnych (metody wykorzystujące turbulizację przepływu wewnątrz cylindrycznej przegrody wymiany ciepła oraz turbulizację opływu cylindrycznej przegrody wymiany ciepła). Następnie w rozdziale przedstawiono przegląd prac badawczych dotyczących zastosowania techniki strug uderzających, łącznie z wybranymi pracami dla konwekcji jednofazowej z zastosowaniem wielostrugowego napływu czynnika. W tym zakresie tematycznym omówiono wpływ kształtu dyszy na formowanie strugi oraz proces wymiany ciepła, oddziaływanie przepływów poprzecznych na proces wymiany ciepła i jego minimalizację oraz przedstawiono znane z literatury wybrane korelacje opisujące liczbę Nusselta, dedykowane dla przypadków napływu czynnika na powierzchnię płaską lub zakrzywioną. Rozdział trzeci zakończono przedstawiając sposoby oceny efektywności metod intensyfikacji wymiany ciepła w rekuperatorach.

Rozdział czwarty przedstawia tezę oraz cel i zakres pracy. Jako cel pracy wskazano ocenę zasadności zastosowania techniki strugowej w rekuperatorach cylindrycznych jako metody intensyfikacji wymiany ciepła. Scharakteryzowano przedmiot patentu dot. koncepcji płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła z techniką strugową, na podstawie której zbudowano modelowe konstrukcje wymienników ciepła wykorzystane w eksperymentach, pokrótce omówiono ich budowę oraz wprowadzono do metodyki badań i prowadzenia obliczeń.

W rozdziale piątym nakreślono przedmiot badań, podając schemat ideowy strugowego wymiennika ciepła, charakterystykę geometryczną dwóch wariantów wymienników ciepła z różnym rozstawem otworów rur perforowanych zapewniających wykorzystanie techniki strugowej w konstrukcji urządzeń oraz scharakteryzowano ideę badań doświadczalnych.

Kolejne dwa rozdziały, tj. szósty i siódmy, dotyczą badań eksperymentalnych. W rozdziale szóstym pracy przedstawiono stanowisko badawcze, w tym szczegółowo jego budowę oraz metodykę wykonywania badań. Zestawiono elementy aparatury pomiarowej wykorzystywanej podczas eksperymentów i podano ich podstawowe parametry techniczne. Rozdział siódmy zawiera szczegółowy opis badań cieplno-przepływowych przeprowadzonych z wykorzystaniem modelowych wymienników strugowych. W rozdziale

tym omówiono metodykę prowadzenia badań dotyczących oporów hydraulicznych i wymiany ciepła oraz podano charakterystyki przepływowe i cieplne testowanych wymienników strugowych. Następnie podano sposoby weryfikacji strat hydraulicznych w wymiennikach oraz badań wymiany ciepła (z wykorzystaniem graficznej metody Wilsona do wyznaczenia średnich współczynników przejmowania ciepła). Rozdział zawiera prezentację przykładowych wyników obliczeń oraz ich analizę. We wspomnianym rozdziale omówiono sposób przyjęcia do analizy wartości liczb Nusselta, definiując wartość liczby osiągniętych na podstawie wyników własnych eksperymentów oraz wykorzystując korelacje dostępne w literaturze przedmiotu, przeprowadzono weryfikację otrzymanych wartości. Dokonano oceny prognostycznej analizowanych danych, wybierając podstawowe narzędzia analizy statystycznej. Rozdział siódmy zakończono przedstawiając propozycję własnej korelacji na wyznaczenie liczby Nusselta, dedykowanej wymiennikom strugowym o budowie cylindrycznej oraz oceniając efektywność intensyfikacji wymiany ciepła dla testowanych wymienników strugowych.

Kolejne trzy rozdziały poświęcono przeprowadzeniu analizie porównawczej wymiennika strugowego z wymiennikiem referencyjnym i jej wyników, analizie niepewności pomiarowych oraz podsumowaniu i wytyczeniu kierunków dalszych prac naukowych Doktoranta. Rozdział ósmy poświęcono analizie porównawczej wyników otrzymanych dla wymienników ciepła strugowych w stosunku do uzyskanych dla wymiennika referencyjnego. Omówiono budowę referencyjnego wymiennika ciepła, w którego konstrukcji usunięte zostały wkładki w postaci rur perforowanych. W rozdziale tym przeprowadzono analizę poprzez porównanie charakterystyk cieplno-przepływowych, w tym: hydraulicznych i cieplnych oraz zestawiając otrzymane wartości współczynnika przejmowania ciepła i liczby Nusselta dla testowanych wymienników. Rozdział ten wieńczy ocena efektywności energetycznej wymienników strugowych w odniesieniu do wymiennika referencyjnego. Rozdział dziewiąty przedstawia analizę niepewności pomiarowych. Pracę doktorską zakończono podsumowaniem, zawierającym wnioski końcowe z przedstawionej dysertacji doktorskiej i wskazującym na kierunki dalszych prac, zamieszczonymi w ostatnim – dziesiątym rozdziale pracy. Dysertację uzupełniono bibliografią, spisem rysunków, tabel i załączników. W przedstawionych siedmiu załącznikach zawarto wyniki pomiarów dla wykorzystywanych w badaniach wymienników ciepła (dwóch wariantów konstrukcyjnych wymienników strugowych oraz wymiennika referencyjnego), w zakresie zarówno wymiany ciepła, jak i oporów hydraulicznych.

Recenzent w przedstawionej do oceny pracy znalazł nieliczne błędy edycyjne, w tym głównie zapis jednostek oraz kroju czcionki. inne usterki edycyjne oraz drobne nieścisłości. Wszystkie poniżej przedstawione uwagi nie wpływają na całościową ocenę merytoryczną, która świadczy, że Doktorant wykonał pracę doktorską na odpowiednim poziomie naukowym z wykorzystaniem aktualnych metod i technik badawczych.

Poniżej przedstawiono wyszczególnienie reprezentatywnych przykładów wspomnianych błędów, czy nieścisłości, które odnaleziono w pracy:

- w analizie przedstawionej na str. 65 (5-ty punkt), wystąpiło nieskończone zdanie, tj. „... z tendencją wzrostową (udział $2 \div 17\%$)” – ale w stosunku do jakiego czynnika? (prawdopodobnie: wraz ze wzrostem wydatku czynnika);
- drobne błędy stylistyczne i niewłaściwe stosowanie znaków interpunkcyjnych, które czasami utrudniają zrozumienie sensu niektórych zdań zamieszczonych w części dot. przeglądu literatury;
- najważniejsze uwagi dotyczące formatowania tekstu:
 - nieścisłością jest używanie czcionek prostych lub pochylonych na oznaczenie tej samej wielkości fizycznej, czego przykładem jest oznaczenie pismem prostym wielkości G , H lub d na rysunkach o numerach: 12, 15, 16, 18, 23, 37-52 i 55-83, przy czym w spisie ważniejszych oznaczeń powyższe wielkości fizyczne oznaczono czcionkami pochylonymi;
- najważniejsze uwagi dot. stosowania oznaczeń:
 - wskazane byłoby używanie jednostek układu SI w całej dysertacji;
 - jednostki wielkości fizycznych - nieścisłości:
 - autor na oznaczenie temperatury stosuje dwa oznaczenia (t lub T), przy czym trudno jest odnaleźć uzasadnienie takiego postępowania, prawidłowym jest stosowanie jednego oznaczenia na jedną wielkość fizyczną w całej pracy;
 - w pracy odnaleziono nieprawidłowy zapis jednostek następujących wielkości:
 - 1) strumienia masy, jednostka podawano jako $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}]$ na str. 55, prawidłowy zapis jednostki: $[\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})]$;
 - 2) współczynnika przewodzenia ciepła, jednostka podawana jako $[\text{W}/\text{m K}]$ na str. 69, prawidłowy zapis jednostki: $[\text{W}/(\text{m K})]$.
 - nie odnaleziono niektórych oznaczeń dla zmiennych stosowanych w pracy – przykładowo h na rys. 53 (str. 66) i we wzorze nr 35 (str. 67), przy czym entalpia nie została wymieniona w spisie ważniejszych oznaczeń;

- uwagi dot. rysunków:
 - na rysunku 27 (str. 42) brak jest objaśnień stosowanych odnośników do elementu prezentowanej konstrukcji wymiennika strugowego, którym nadano kolejne numery od 1 do 12;
 - do sporządzenia części opisów w postaci tekstu i liczb, podanych na rysunkach (również w legendzie) - zastosowano czcionkę o zbyt małym rozmiarze, co utrudnia odczyt i analizę zamieszczonych danych, dot. rysunków o numerach 10, 18 i 29;
- bibliografia i cytowania:
 - pozycja ostatniej pozycji literatury [111] powinna już odnosić się do informacji zamieszczonej biuletynie 2016/37 w dniu 14.09.2016 informacji dotyczącej nadania numeru patentu EP 3 067 652 A1;
 - zaobserwowano pewne usterki w formatowaniu, głównie dot. stosowania wielkich i małych liter oraz skrótów tytułów czasopism oraz wtrącenia z języka angielskiego w przypadku pozycji publikowanych w języku polskim, w pozycjach o numerach: [63], [66], [101], [109].

Ponadto, zdaniem Recenzenta, Doktorant mógłby przemyśleć następujące kwestie:

- 1) Znaczne zwiększenie przedziału liczby Reynoldsa dla przepływu czynnika grzewczego.
- 2) Zmiana czynnika roboczego grzewczego (wodę) na czynnik chłodniczy niskowrzący.
- 3) W jakim zakresie przedstawiona w pracy konstrukcja wymiennika ciepła byłaby możliwa do wykorzystania przepływu czynnika roboczego ze zmianą fazy?
- 4) Czy Doktorant widzi możliwość uwzględnienia w opracowanej konstrukcji wymiennika ciepła taki parametr jak chropowatość (rozwiniecie) powierzchni grzejnej?

Ogólna ocena pracy

Treść dysertacji Doktoranta wskazuje, że posiada on wystarczającą wiedzę z zakresu wymiany ciepła i konstrukcji wymienników ciepła. Potrafi wykonywać eksperymenty badawcze oraz analizować wyniki badań. Posiada również umiejętność analitycznej analizy wyników i potrafi wyciągać wnioski z analiz. Głównym nowatorskim elementem pracy jest propozycja zmodyfikowanego wymiennika ciepła typu „rura w rurze”, w którego konstrukcji wykorzystano technikę strugową i wykazanie, że jedna z analizowanych konstrukcji pozwoliła osiągnąć intensyfikację wymiany ciepła podczas przepływu. Założono, że podana konstrukcja wymiennika ciepła może być stosowana jako rekuperator.

Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji praca jest ciekawa i nowatorska. Moim zdaniem, najważniejszym innowacyjnym elementem pracy jest zweryfikowanie eksperymentalne i teoretyczne tezy o możliwej intensyfikacji wymiany ciepła w wymiennikach ciepła, wykorzystujących w konstrukcji urządzenia techniki strugowej. Ocena stopnia intensyfikacji odbyła się w sposób uporządkowany, zgodny z literaturą przedmiotu, a do jej sformułowania przyjęto również badania i analizy wyników otrzymane dla wymiennika referencyjnego o klasycznej budowie. Cennym podsumowaniem teoretycznych analiz jest również zaproponowanie własnej korelacji opisującej liczbę Nusselta, dedykowane dla urządzeń o konstrukcji wykorzystywanych w badaniach. Jednocześnie chcę podkreślić, że przeprowadzenie analizy wymienionych powyżej zagadnień wymaga dużej wiedzy i zaangażowania Doktoranta, a przedstawiona do oceny praca świadczy, że posiadał on umiejętności, by założone w pracy cele osiągnąć.

Na podstawie cytowanych prac własnych należy zauważyć rozwój naukowy Doktoranta. Bez wątplenia praca doktorska została wykonana samodzielnie, pod opieką Promotora dra hab. inż. Jana Wajsa, który w ostatnich latach zajmuje się poszukiwaniem metod intensyfikacji wymiany ciepła w strugowych wymiennikach ciepła o budowie cylindrycznej. Przedstawiona praca wnosi wartościowy wkład do badań i analizy wymiany ciepła dzięki wykazaniu na drodze analizy wyników badań intensyfikacji wymiany ciepła w rekuperatorach, w których konstrukcji wykorzystano technikę strugową. Warte podkreślenia jest, że zmodyfikowana konstrukcja urządzenia została ochroniona europejskim wnioskiem patentowym.

Reasumując, uważam, że praca doktorska mgra inż. Michała Bajora pt. *Intensyfikacja wymiany ciepła poprzez zastosowanie techniki strugowej w rekuperatorach* spełnia ustawowe, jak i merytoryczne warunki określone w art. 13 ustawy *O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z 14.03.2003 r. z późniejszymi zmianami). W związku z powyższym: stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie Pana mgra inż. Michała Bajora do jej publicznej obrony.

Magdalena Piasecka