

Dr hab. inż. Tadeusz Michał Wójcik

Kraków, 3.11.2018 r.

Profesor AGH w Krakowie

Wydział Energetyki i Paliw

Al. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Bajora

pt. „Intensyfikacja wymiany ciepła poprzez zastosowanie techniki strugowej w rekuperatorach”

wykonana na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej nr. I dz.170/WM/2018 – prof. dr hab. inż. Dariusza Mikieliewicza. z dnia 24.07.2018 roku.

Recenzowana dysertacja została opracowana pod opieką naukową dr. hab. inż. Jana Wajsa, prof. PG.

1. Wprowadzenie

Zagadnienie oszczędności energii i materiałów jest jednym z najważniejszych elementów światowej polityki. Nieustanny postęp technologiczny jest przyczyną wzrostu wymagań energetycznych, przy jednoczesnej tendencji do miniaturyzacji konstrukcji urządzeń.

Jak podaje Autor przedmiotem rozprawy jest analiza procesu intensyfikacji wymiany ciepła w płaszczowo-rurowych wymiennikach, w których zastosowano przegrody sitowe (perforowane), generujące strugi uderzające w cylindryczną ściankę wymiany ciepła. Konstrukcja wymiennika została opatentowana przez zespół P.G., do którego dołączył Autor rozprawy.

Praca mgr. inż. Michała Bajora odnosi się głównie do rezultatów badań eksperymentalnych zaprojektowanych wcześniej wymienników, ale również, w dużym stopniu, teoretycznych. Badania eksperymentalne wykonano na dwóch innowacyjnych rekuperatorach (wymiennikach), zaprojektowanych przez promotora dr. hab. Jana Wajsa i wykonanych przez Autora oraz rekuperatora referencyjnego.

Autor zaplanował eksperyment i zarejestrował dużą liczbę rezultatów. Akwizowano wartości parametrów charakteryzujących procesy wymiany ciepła oraz strat ciśnienia płynów roboczych. Dane uzyskane z badań przetworzono, uzyskując jakościowe i ilościowe opisy wpływu parametrów termodynamicznych na współczynniki przejmowania (a tym samym przenikania ciepła) oraz straty ciśnienia czynników roboczych. Przedstawiona w rozprawie analiza wyników eksperymentalnych opisuje istotne aspekty zjawisk wymiany ciepła i strat ciśnienia w rekuperatorach, w których

zastosowano techniki strugowe. Rezultaty stanowią cenny materiał pozwalający na wykonanie wielu rozszerzających analiz.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Praca liczy 128 stron. Składa się na nią dziesięć rozdziałów, wykaz literatury oraz 7 załączników zawartych na 14 stronach. W załącznikach znajdują się rezultaty badań w postaci tabel. W pracy zawarto 85 rysunków i 17 tabel.

Na początku rozprawy umieszczono spis ważniejszych oznaczeń. Wykaz oznaczeń można byłoby uprościć przenosząc część symboli do grupy indeksów dolnych. Widoczny jest podział pracy na podstawowe jej części: przegląd literatury, część eksperymentalna, wyniki i dyskusja rezultatów, podsumowanie wyników oraz wnioski.

Przegląd literatury opisany jest na 29 stronach. Analiza eksperymentalna i teoretyczna wraz z rezultatami, ich omówieniem oraz podsumowaniem zajęła 61 stron, co stanowi 48% objętości pracy.

Pozostałe części pracy doktorskiej to: spis treści, analiza stanu wiedzy, teza oraz cel i zakres pracy, opis stanowisk badawczych i szczegółów metodyki badań, w tym ocena dokładności pomiarów. Pracę kończy rozdział 10 „Podsumowanie i kierunki dalszych prac”.

Bibliografia liczy 111 pozycji (w tym cztery publikacje oraz zgłoszenie patentowe, których współautorem jest Doktorant) cytowanych w części dotyczącej stanu wiedzy, eksperymentalnej, teoretycznej oraz dyskusji wyników. Wśród cytowanych publikacji są głównie prace z ostatnich lat, ale też wydane wcześniej.

W rozprawie znalazły się wszystkie elementy niezbędne dla pracy doktorskiej.

3. Merytoryczna ocena rozprawy

3a. Uwagi ogólne

Wybór tematu jest uzasadniony wysoką rangą naukową i aplikacyjną podjętej problematyki. Poszukiwanie rozwiązań wysokosprawnych, kompaktowych wymienników ciepła, które mogą być stosowane w wielu dziedzinach, jest obecnie istotnym zagadnieniem.

Głównym przedmiotem zainteresowania Autora rozprawy są zagadnienia dotyczące intensyfikacji wymiany ciepła w wymiennikach, jako podstawowych urządzeniach systemów energetycznych. Jednym ze sprawdzonych sposobów zwiększenia wartości współczynników przejmowania ciepła jest zastosowanie metod nie wymagających dostarczania dodatkowej energii do procesu, czyli metod pasywnych. Przykładami tych metod są: rozwinięcie powierzchni wymiany ciepła, turbulizacja przepływu, stosowanie płynów roboczych o lepszych własnościach w wymianie

ciepła, czy wreszcie zastosowanie strug uderzających w ściankę.

Autor postawił następującą tezę: *Zastosowanie techniki strugowej w kompaktowych rekuperatorach przyczynia się do intensyfikacji wymiany ciepła, szczególnie dla przypadku wymiany ciepła z udziałem gazów.* Teza doktorska jest pewnym założeniem, odnośnie przedmiotu badań, którą należy udowodnić na podstawie przeprowadzonego empirycznego studium danego zagadnienia.

Recenzowana praca ma charakter eksperymentalno – teoretyczny. Badania przeprowadzono w warunkach konwekcyjnej wymiany ciepła. Płynem ogrzewającym było powietrze, a ogrzewanym – woda.

Doktorant nie zagłębia się w modelowanie zjawisk fizycznych i nie wykorzystuje programów do analiz numerycznych, co w tym przypadku jest zabiegiem słusznym. Uogólnieniem rezultatów badań jest własna korelacja Autora, dedykowana wymiennikom strugowym o konfiguracji cylindrycznej.

Dobór metod badawczych jest trafny i zgodny ze współczesnymi kierunkami rozwoju wiedzy o wymianie ciepła. Autor uzyskał wartościowe wyniki, mogące zainteresować innych badaczy.

Poniżej przedstawiam krótko zawartość recenzowanej pracy doktorskiej.

Rozdziały drugi i trzeci rozprawy (pierwszym jest wprowadzenie) zawierają przegląd stanu wiedzy: od kwestii podstawowych, jak klasyfikacja wymienników ciepła, poprzez przegląd prac badawczych, do szczegółowego omówienia techniki strug uderzających.

Treścią rozdziału 4 jest teza pracy. Nie budzi ona wątpliwości, chociaż ma cechy raczej przyjętego założenia, niż tezy wymagającej udowodnienia. W rozdziale 4 zawarto również cel i zakres badań. Rozdziały 5, 6 i częściowo 7 zawierają opis metodyki badań. Zakończenie rozdziału siódmego to wyniki pomiarów i obliczeń, analiza i weryfikacja wartości liczb Nusselta oraz propozycja własnej korelacji dotyczącej rekuperatorów strugowych o budowie cylindrycznej.

Moim zdaniem wyżej wymienione części rozprawy, zawarte w rozdziale 7, powinny być wyraźnie rozdzielone (osobny rozdział dotyczący metodyki badań, osobny poświęcony результатам badań eksperymentalnych i teoretycznych oraz oddzielny, będący opisem istotnego wkładu własnego Doktoranta, czyli korelacji). Autor podaje własne równanie korelacyjne, dotyczące wymienników strugowych o budowie cylindrycznej. Zilustrował na wykresach jakość dostosowania korelacji do rezultatów eksperymentalnych.

Na uznanie zasługuje rozdz. 9 poświęcony ocenie niepewności pomiarowych. Autor stosuje metodę *typu B*, wyznaczając niepewności standardowe (dla pomiarów wielkości mierzonych bezpośrednio) oraz niepewności złożone, korzystając z prawa przenoszenia niepewności, jak najbardziej uzasadnioną w przypadku analizy niepewności tego rodzaju pomiarów złożonych.

3b. Krytyczne uwagi szczegółowe

W rozdziale 5 Autor opisuje przedmiot badań, a w tabeli 6 jego charakterystykę geometryczną. Widoczne jest, że parametry geometryczne Autor przyjął arbitralnie, bowiem nie znalazłem w pracy uzasadnienia tego zabiegu. Być może inna liczba otworów, ich średnica, odległość między otworami itp. dałyby zupełnie inne wyniki. Proszę Autora o wyjaśnienie.

Proszę również o odpowiedź do rozdz. 7.6. Zastosowano dwa różne wymiary charakterystyczne w liczbach Nusselta. Jak wpływa to na wartości ilościowe liczb dla strony ogrzewającej i ogrzewanej?

4. Uwagi redakcyjne

Rozprawę mgr. inż. Michała Bajora napisana została poprawnym językiem, z użyciem właściwej terminologii. Pojawiły się nieliczne błędy edycyjne.

Przykłady usterek korektorskich wymieniam poniżej:

- Doktorant nie zwrócił uwagi na przejrzystość rysunków, (przykłady - rys. 10, 18, 55, 56). Do wykonania opisów w postaci tekstu i znaczników zastosowano zbyt małe rozmiary,
- niewłaściwe stosowanie lub brak znaków interpunkcyjnych utrudniają zrozumienie sensu niektórych zdań (przykład - pierwsze zdanie na str. 99),
- te same wielkości oznaczane są w różny sposób (np dla temperatury stosuje dwa oznaczenia, t lub T).
- brak opisu oznaczeń na rys.27,

5. Ocena rozprawy i wniosek końcowy

Autor podjął się ambitnego zadania. Wykonał je bardzo dobrze i sumiennie. Wybór tematyki badań i dobór metod badawczych oceniam jednoznacznie pozytywnie. Wyniki końcowe, uzyskane po analizie danych eksperymentalnych i analizie teoretycznej wnoszą elementy nowości w nauce. Duża liczba rezultatów pozwala na wykonanie w przyszłości dodatkowych badań, których wyniki dadzą pełniejszy obraz.

Należy uznać, że postawioną tezę Doktorant potwierdził poprzez badania eksperymentalne, obliczenia matematyczne i analizę rezultatów.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska jest potwierdzeniem umiejętności dostrzegania, sformułowania i rozwiązania problemu badawczego. Świadczy ona o tym, że Autor opanował metody badawcze stosowane w wymianie ciepła, potrafi się nimi prawidłowo posługiwać, posiada pogłębianą wiedzę teoretyczną i specjalistyczną w tym zakresie. Widoczne

jest, że Doktorant potrafi pracować samodzielnie.

Wyrażone wyżej uwagi krytyczne dotyczą drugoplanowych elementów pracy doktorskiej, która zasługuje na pozytywną ocenę ogólną. Zalecam Autorowi, by wykorzystał moje uwagi przy publikowaniu wyników badań i w dalszej działalności naukowej.

Decydujące o wartości pracy eksperymenty – trudne, pracochłonne i wymagające stosowania zaawansowanych technik pomiarów i rejestracji danych zrealizowano wzorowo. Bardzo cenne osiągnięcie Autora to wykazanie, że zastosowanie wymienników zwiększa efektywność intensyfikacji wymiany w stosunku do wymienników konwencjonalnych. Zagadnienie wymaga jednak dalszych systematycznych badań.

Wyniki badań Autora pozwalają na stwierdzenie, że teza pracy została udowodniona.

Wyrażam pogląd, że praca doktorska mgr. 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 mgr. inż. Michała Bajora do jej publicznej obrony.

Stawiam również wniosek o wyróżnienie pracy.



/dr hab. inż. Tadeusz M. Wójcik, prof. AGH/