

Dr hab. inż. Magdalena Jaremkiewicz, prof. PK  
Politechnika Krakowska  
Katedra Procesów Ciepłych, Ochrony Powietrza i Utylizacji Odpadów  
Ul. Warszawska 24  
31-155 Kraków

Kraków, 28.05.2021r.

**RECENZJA**  
**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Cezarego Czajkowskiego**  
**pt. „Wpływ zmian sił masowych na zjawiska ciepłno-przepływowe zachodzące w pulsacyjnej**  
**rurce ciepła”**

Recenzja została sporządzona na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej w związku z uchwałą z dnia 12 maja 2021r. wyrażoną w piśmie Pana dr hab. inż. Roberta Króla, prof. uczelni, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej (pismo nr RDND08/39/2021 z dn. 18.05.2021r.).

### **1. Ogólna charakterystyka pracy**

Recenzowana praca liczy 143 strony i składa się z sześciu rozdziałów, streszczenia (w j. polskim i angielskim), wykazu oznaczeń, spisu tablic i rysunków oraz bibliografii. Na spis literatury składa się 85 pozycji, spośród których Doktorant jest współautorem trzech artykułów w renomowanych czasopismach (International Journal of Thermal Sciences i Applied Thermal Engineering) i jednego patentu, ściśle związanych z tematyką pracy. Prawie wszystkie pozycje literatury są anglojęzyczne i dominują wśród nich prace powstałe w ostatnich 10 latach.

Praca ma charakter pracy teoretyczno-doświadczalnej.

Tematyka pracy dotyczy pulsacyjnych rurek ciepła i oceny wpływu sił masowych na proces wymiany ciepła. Ich zastosowanie miałyby na celu chłodzenie, ale również pozwalałoby na dalsze wykorzystanie odebranego ciepła, z elementów obrotowych mieszalników do produkcji farb i lakierów opartej na dyspersji. Dzięki efektywnemu chłodzeniu w mieszalnikach proces mieszania można byłoby przeprowadzać w optymalnych warunkach uzyskując produkt o wymaganej jakości, a także można byłoby ograniczyć koszty produkcji i podnieść jej bezpieczeństwo. Wykorzystanie pulsacyjnych rurek ciepła w układach obrotowych jest pomysłem innowacyjnym. Dotychczasowy stan wiedzy pozwala stwierdzić, że brak jest badań naukowych na temat modelu matematycznego zjawisk ciepłno-przepływowych, jak i badań eksperymentalnych prowadzonych w szerokim zakresie, dotyczących pulsacyjnych rurek ciepła w pionowym układzie obrotowym z uwzględnieniem wpływu sił masowych. Należy zatem stwierdzić, że tematyka pracy doktorskiej mgr. inż. Cezarego Czajkowskiego jest zarówno aktualna, jak i ważna z praktycznego punktu widzenia.

Wydział Mechaniczno-Energetyczny  
49/451/2021  
Wpłynęło dnia 31.05.2021r.

W opiniowanej pracy Autor postawił sobie za cel analizę teoretyczną i eksperymentalną procesów zachodzących w pulsacyjnej rurce ciepła pracującej w układzie obrotowym. Plan pracy zakładał opracowanie modelu matematycznego procesów cieplno-przepływowych zachodzących w układzie oraz dokonanie analizy tego modelu, zarówno obliczeniowej dla wybranych warunków początkowych i brzegowych, jak i eksperymentalnej na specjalnie w tym celu zbudowanym stanowisku badawczym. Cel i zakres pracy zostały określone jasno i precyzyjnie.

Teza pracy brzmi: *W układzie obrotowym możliwe jest zastosowanie pulsacyjnych rurek ciepła na potrzeby chłodzenia.* Sformułowana została również teza pomocnicza: *Generowana siła bezwładności, skierowana wzdłuż normalnej do osi obrotu, zmienia warunki transportu ciepła zachodzącego wewnątrz przestrzeni kapilarnych dzięki czemu istnieje optymalna wartość prędkości obrotowej układu, dla której wartość oporu cieplnego pulsacyjnej rurki ciepła osiąga minimum.* Teza pracy jest oryginalna. Wykazanie jej prawdziwości jest zadaniem ambitnym i stanowi właściwe wyzwanie dla pracy doktorskiej.

Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem do tematu pracy. Opisano w nim historię powstania rurek ciepła, ich rozwój, budowę i zasadę działania oraz przedstawiono wybrane rozwiązania wraz z wykorzystywanym w nich zjawiskiem kapilarnym. Szczególną uwagę poświęcono pulsacyjnym rurkom ciepła, ich budowie i zasadzie działania, strukturze przepływu czynnika, optymalizacji ich pracy, ograniczeniom, którym podlegają i stosowanym w nich czynnikom roboczym. Przegląd literatury obejmuje przede wszystkim rozwiązania, jakie są stosowane w pulsacyjnych rurkach ciepła oraz badania jakie do tej pory były w ich temacie prowadzone.

W rozdziale drugim przedstawiono cel, zakres i tezę pracy.

W rozdziale trzecim zaprezentowany został model matematyczny zjawisk cieplno-przepływowych zachodzących w pojedynczej U-rurce stanowiącej część pulsacyjnej rurki ciepła, umieszczonej w układzie obrotowym i poddawanej zmiennym wartościom przyspieszenia odśrodkowego. W tym celu opracowano model fizyczny i wyprowadzono wzory matematyczne opisujące procesy zachodzące w czynniku i procesy wymiany ciepła w analizowanym elemencie, również z wykorzystaniem wyrażeń bezwymiarowych. Model ten bazuje na zasadzie zachowania pędu i energii. Opracowana została procedura numeryczna umożliwiająca zweryfikowanie modelu. Weryfikacja ta polegała na porównaniu wyników obliczeń otrzymanych na podstawie opracowanego modelu z wynikami z wybranych publikacji naukowych, w których pominięto wpływ sił masowych lub które pozyskano eksperymentalnie, wykonanych dla tych samych danych wejściowych. Ponadto Doktorant wykonał szereg analiz zarówno wymiarowych, jak i bezwymiarowych, oceniając wpływ różnych parametrów na proces wymiany ciepła i wskazując, które z nich są najbardziej istotne. Wykazano również, że siła odśrodkowa większa od siły grawitacji wpływa na zachowanie czynnika roboczego i zwiększa wydajność cieplną oraz, że istnieje optymalna prędkość kątowna, dla której wymiana ciepła jest najintensywniejsza.

W rozdziale czwartym opisano stanowisko laboratoryjne, na którym zrealizowano badania pulsacyjnej rurki ciepła. Jest on bardzo szczegółowy, obejmuje opis konstrukcji, wykorzystaną aparaturę badawczą, sposób i miejsce montażu czujników i sposób akwizycji danych pomiarowych. Do przeprowadzenia badań wybrano dwa czynniki robocze: wodę i HFE-7000, a badania przeprowadzono dla różnych współczynników wypełnienia. Ponadto przedstawiono procedurę wykonywania pomiarów, opisano w jaki sposób przeprowadzane będą obliczenia oporu cieplnego oraz określono błędy względne i bezwzględne mierzonych i obliczanych wielkości. Na uwagę zasługuje fakt, że rozwiązania zastosowane na stanowisku laboratoryjnym zostały opatentowane, a Doktorant jest współautorem patentu.

W rozdziale piątym opisano przeprowadzone badania doświadczalne i omówiono uzyskane wyniki. Ich celem było określenie wpływu strumienia ciepła przekazywanego do strefy parowania, współczynnika wypełnienia, kierunku obrotu układu i prędkości obrotowej na sprawność cieplną pulsacyjnej rurki ciepła. Badania przeprowadzono dla dwóch czynników roboczych: wody i HFE-7000. W pierwszej kolejności eksperyment przeprowadzono z wykorzystaniem wody. Najpierw przeprowadzono testy dla dwóch przypadków rotacji – zgodnym i przeciwnym z ruchem wskazówek zegara, a analiza wyników pomiarów pozwoliła stwierdzić, że w przypadku kierunku obrotu zgodnym z ruchem wskazówek zegara proces jest wspomagany przez siłę odśrodkową, a w przypadku przeciwnego kierunku obrotu – proces jest dławiony. Kolejne badania pozwoliły ocenić wpływ współczynnika wypełnienia (50%, 70% i 80%) w warunkach stacjonarnych i obrotowych przy stałym strumieniu ciepła na opór cieplny układu. Następnie podobne badania przeprowadzono zmieniając dodatkowo moc elementów grzewczych. Ostatnie serie pomiarowe dotyczyły oceny zmiany prędkości obrotowej na wydajność cieplną układu w odniesieniu do stopnia wypełnienia dla stałej wartości dostarczanego strumienia ciepła. Na koniec przeanalizowano wielkość oporu cieplnego układu jako funkcji współczynnika wypełnienia i prędkości obrotowej przy stałej mocy źródła ciepła oraz oporu cieplnego i ciśnienia czynnika jako funkcji prędkości obrotowej i współczynnika wypełnienia dla zmiennej mocy źródła ciepła. Podobne badania przeprowadzono dla drugiego z czynników roboczych – HFE-7000 nieco modyfikując sposób przeprowadzonych pomiarów. Na koniec w rozdziale wyniki uzyskane z eksperymentu porównano z analizami numerycznymi.

W ostatnim rozdziale w sposób zwięzły i jasny podsumowano całość pracy oraz nakreślono cele przyszłych badań związanych z podjętą tematyką.

## **2. Uwagi krytyczne**

Wnikliwa analiza pracy doktorskiej prowadzi do następujących uwag, które w większej części mają charakter dyskusyjny.

## 2.1. Uwagi formalne

- w wykazie oznaczeń, jak i niekiedy w pracy, w mianownikach jednostkach wielkości fizycznych występujących w postaci ułamków iloczyny powinny być objęte nawiasem (np.  $J/(kgK)$ );
- w wykazie oznaczeń wielkość  $\dot{Q}$  wyrażona w  $W/m^2$  oznacza gęstość strumienia ciepła, a w opisie symbolu naprężenia ścinającego brak jednostki, nie wszystkie symbole występujące w pracy zostały opisane w wykazie;
- dla pulsacyjnej rurki ciepła stosowane są skróty *PHP* i *OHP*, uważam, że lepiej byłoby je ujednoczyć i stosować jeden z nich;
- na schematach rurek ciepła (rys. 1.5, 1.8-1.10 i 1.12) powinna być oznaczona oś symetrii, dzięki temu rysunki byłyby czytelniejsze;
- w pracy występują drobne błędy interpunkcyjne, pojawiają się również błędy ortograficzne w skrótach: „nr” i „wg”, po których nie stawiamy kropki;
- wzory powinny być częścią zdania i powinny pojawiać się w miejscu pierwszego nawiązania do nich (np. wzory (1.2), (3.35), (4.1));
- na str. 25 we wzorach (1.5) i (1.6) wymiar charakterystyczny powinien zostać oznaczony przez „ $L$ ”;
- w tab. 3.1 występuje parametr  $H$ , który nie został opisany, dopiero z opisu rys. 3.2-3.5 można się domyśleć, że wielkość ta to  $H_e = H_c$ ;
- na str. 68-69 opory cieplne przedstawione zostały przy wykorzystaniu symbolu  $z$ , natomiast w pozostałej części pracy przez  $R$ , czy jest tego jakaś przyczyna?
- brak odniesienia do rys. 3.23 w tekście pracy, ponadto uważam, że w opisie rysunku powinno być wyraźnie wskazane, które z przedstawionych wykresów są wynikami numerycznymi, a które eksperymentalnymi.

## 2.2. Uwagi merytoryczne

- na str. 10, pierwsze zdanie pod wzorem (1.1) nie zostało poprawnie sformułowane, powinno z niego wynikać, że niespełnienie warunku (1.1) prowadzi do zjawiska wysuszenia;
- na str. 26 stwierdzono, że równanie (1.4) przyjmuje postać nierówności (1.9), co nie jest zgodne z prawdą, Autor powinien doprecyzować to sformułowanie;
- wartościowe dla pracy byłoby opisanie sił działających na układ z rys. 3.1 uwzględnionych w równaniu zachowania pędu (3.2);
- podobnie jak w poprzednim podpunkcie, dokładniejsze przedstawienie przekształceń wzorów (3.8)-(3.10) wzbogaciłoby pracę;
- na str. 47 pada stwierdzenie, że na rys. 3.6b obserwuje się „niewielki wzrost okresu pulsacji”, powinno być: „niewielki wzrost częstotliwości pulsacji”;

- na str. 48 Autor pracy opisuje różnice pomiędzy wykresami na rys. 3.8 (a)-(d), natomiast same rysunki wyglądają identycznie. Jeśli opisane różnice są niewielkie, może należałoby przedstawić wykresy w taki sposób, aby były one widoczne również dla czytelnika?
- na str. 55 Autor stwierdza opisując rys. 3.12, że „(...) podwojenie parametru  $\zeta$  powoduje zwiększenie częstotliwości pulsacji jedynie o około 12%”, a w następnym akapicie, że „Zmiana parametru  $\zeta$  miała znaczący wpływ na częstotliwość pulsacji (...)”. Z czego wynika ta rozbieżność we wnioskach?

Należy podkreślić, że powyższe uwagi mają w większości charakter dyskusyjny i nie obniżają wysokiej wartości pracy. Wskazane błędy są drobne, głównie są to błędy natury edytorskiej i nie wpływają na merytoryczną jakość pracy.

### 3. Podsumowanie

Praca napisana jest zwięźle, a jednocześnie jest zrozumiała i przejrzysta. Układ pracy jest przemyślany, jest w niej wyraźny podział na część dotyczącą wprowadzenia do tematu, opracowania modelu matematycznego i jego numerycznej weryfikacji oraz badań eksperymentalnych na stanowisku laboratoryjnym, ale jednocześnie cechuje się spójnością wywodu. Styl, język pracy i dobór materiału ilustracyjnego nie budzą zastrzeżeń. Zgromadzona literatura i jej analiza świadczą o bardzo dobrej znajomości problematyki przez Autora.

Za oryginalny dorobek naukowy Autora należy uznać:

- opracowanie modelu matematycznego pulsacyjnej rurki ciepła o pionowej osi obrotu z uwzględnieniem oddziaływania sił masowych,
- opracowanie procedury numerycznej wykorzystującej model matematyczny pulsacyjnej rurki ciepła oraz zaimplementowanie jej przy wykorzystaniu środowiska programistycznego Mathematica,
- weryfikację opracowanego modelu na podstawie testów obliczeniowych,
- doświadczalną weryfikację opracowanego modelu.

### 4. Wniosek końcowy

Podsumowując, uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Cezarego Czajkowskiego spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 Nr 65 poz. 595). Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wskazuje na ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Tym samym stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy mgr. inż. Cezarego Czajkowskiego do publicznej obrony.

Ponadto, biorąc pod uwagę oryginalność tematyki pracy, jej aplikacyjny charakter, precyzję sformułowania celu i zakresu, zastosowane metody obliczeniowe, zrealizowane badania doświadczalne oraz uzyskane oryginalne wyniki, wyrażam opinię, że oceniana praca zasługuje na wyróżnienie.

Magdalena Jarembińska