

Prof. dr hab. inż. Maciej Chorowski
Politechnika Wroclawska
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Wrocław 26.09.2022

Maciej.Chorowski@pwr.edu.pl

Tel. 695 350 487

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Grzywnowicza „Numeryczno-eksperymentalne badania zjawiska termoakustycznego ”

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 23.06.2022. Recenzowana rozprawa ma formę opracowanego maszynopisu zawierającego 164 strony.

Wybór tematyki, sformułowanie celu rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy wykorzystania efektu termoakustycznego w lewobieżnych obiegach termodynamicznych, w szczególności w chłodziarkach i pompach ciepła. Wpisuje się ona w nurt szukania technologii pozwalających na budowę chłodziarek i pomp ciepła wolnych od czynników szkodliwych dla środowiska, takich jak chlor i fluor. Równocześnie zjawisko termoakustyczne pozwala na konstrukcje silników wykorzystujących m.in. odpadowe źródła ciepła. Budowa silników i chłodziarek termoakustycznych jest bardzo zbliżona, oba urządzenia nie posiadają części ruchomych (za wyjątkiem membran głośników w chłodziarkach) i charakteryzują się wysoką niezawodnością. Stąd podejmowane są próby wykorzystania tych urządzeń do generacji energii elektrycznej z ciepła odpadowego, budowy niewielkich urządzeń kogeneracyjnych czy separacji gazów. O ile podstawy zjawiska termoakustycznego są znane od ok. połowy XIX wieku, o tyle konstruowane obecnie chłodziarki termoakustyczne są wciąż na etapie prototypów i dalekie od komercjalizacji. Stąd wybór tematyki rozprawy jest aktualny i leżący w obszarze dyscypliny Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Mając na uwadze wciąż wczesny etap rozwoju chłodziarek termoakustycznych, w pracy sformułowano cele o charakterze ściśle badawczym, w szczególności przeprowadzenia symulacji komputerowych chłodziarki oraz badań doświadczalnych prototypu urządzenia na własnym stanowisku badawczym. Celem pracy była zarówno weryfikacja narzędzi służących do modelowania zjawiska termoakustycznego jak i określenie zbioru cech konstrukcyjnych i eksploatacyjnych chłodziarki, które są istotne dla jej działania i osiągnięć termodynamicznych. Cel i zakres pracy zostały określone prawidłowo. Mając na uwadze planowane regulacje

nakazujące odejście od szkodliwych dla środowiska czynników chłodniczych, tematyka pracy jest interesująca zarówno z naukowego jak i gospodarczego punktu widzenia.

Zawartość pracy

Rozprawa została podzielona na 7 rozdziałów, spis literatury, dwujęzyczne streszczenie, spis oznaczeń, rysunków, tablic oraz 7 załączników dokumentujących założenia przyjęte w modelowaniu, wyniki obliczeń oraz pomiarów.

W obszernym wprowadzeniu (rozdział 1) przedstawiono podstawy fizyczne zjawiska termoakustycznego, typy urządzeń wykorzystujących to zjawisko oraz liczne przykłady potencjalnych zastosowań.

W rozdziale 2. sformułowano cel i zakres pracy wskazując na cele cząstkowe obejmujące modelowanie numeryczne z wykorzystaniem dwóch środowisk (otwarte oprogramowanie DeltaEC, ANSYS) oraz budowę stanowiska badawczego i przeprowadzenie pomiarów własnego prototypu.

W rozdziale 3. sformułowano model liniowy oparty na równaniach analitycznych przepływu ciepła i równania fali. Przeprowadzono symulacje obliczeniowe z wykorzystaniem dedykowanego oprogramowania DeltaEC opracowanego w Los Alamos National Laboratory na potrzeby modelowania urządzeń termoakustycznych. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów oraz w postaci tabelarycznej w załączniku. Przeprowadzone obliczenia miały na celu zidentyfikowanie cech konstrukcyjnych chłodziarki termoakustycznej istotnych dla jej parametrów pracy, w szczególności różnicy temperatur na końcach regeneratora. Są to: długość i materiał regeneratora, długość rezonatora, rodzaj i ciśnienie gazu roboczego. Pojawienie się na końcach regeneratora istotnej różnicy temperatur umożliwia skonstruowanie chłodziarki do zastosowań chłodniczych lub kriogenicznych. Otrzymane wyniki pozwalają na identyfikację trendów zmian różnicy temperatur wzdłuż regeneratora oraz określenie optymalnych wartości parametrów konstrukcyjnych i gazu roboczego, natomiast same wyniki są niefizyczne. Nie jest możliwe uzyskanie na długości regeneratora rzędu 20 mm różnicy temperatur rzędu 1000 K, co Autor określa w pracy jako „nieintuicyjne i nieracjonalne”. Jednocześnie wskazuje że „wyniki analizy ... nie są wiarygodne, a wyznaczone wartości pochodzą z inherentnego błędu wykorzystanego oprogramowania”.

W rozdziale 4 przedstawiono wyniki modelowania chłodziarki termoakustycznej z wykorzystaniem środowiska CFD. Pozwoliło to na odwzorowanie trójwymiarowej struktury urządzenia. Zaprezentowany model bardzo szczegółowo odwzorowuje budowę chłodziarki oraz parametry gazów roboczych. Wyniki są zaprezentowane w formie graficznej w układzie odmiennym od wyników otrzymanych za pomocą oprogramowania DeltaEC, co utrudnia ich porównanie. Otrzymane w modelowaniu CFD różnice temperatur na końcach regeneratora różnią się o dwa rzędy wielkości w porównaniu z rezultatami otrzymanymi przy użyciu oprogramowania DeltaEC. Model CFD został pozytywnie zweryfikowany w oparciu o eksperymentalne dane literaturowe.

W rozdziale 5 opisano stanowisko badawcze będące kompletną chłodziarką termoakustyczną, oczyjnikowaną i wyposażoną w system akwizycji danych. Autor wybrał metodę szybkiego prototypowania dobierając materiały o odpowiednich parametrach cieplnych. Przeprowadził analizę własności dynamicznych czujników niezbędną do prawidłowej interpretacji wyników. Uruchomił stanowisko, przeprowadził kalibracje czujników. Ta część pracy dowodzi biegłości Autora zarówno w pracach projektowych jak i wykorzystaniu nowych technologii szybkiego prototypowania oraz technik pomiarowych.

W rozdziale 6 przedstawiono wyniki pomiarów prototypowej chłodziarki termoakustycznej. Wyniki dotyczą różnicy temperatur na końcach wymiennika ciepła oraz

rozkładów temperatur w wymienniku dla różnych długości i materiałów wymiennika, długości kanału akustycznego, rodzaju i ciśnienia gazu roboczego. Podobnie jak w przypadku modelowania wyniki są przedstawione w postaci tabelarycznej oraz wykresów. W ramach prac doświadczalnych przeprowadzono analizę niepewności pomiarowych oraz statystyczną analizę możliwości wystąpienia błędów grubych.

Rozprawę kończy rozdział 7 z wnioskami końcowymi, spis literatury, oznaczeń oraz załączniki z wynikami symulacji i pomiarów przedstawionymi w postaci tabelarycznej.

Uwagi o tematyce i treści rozprawy

W związku ze stwierdzeniem destrukcyjnego wpływu chlorowcopochodnych czynników chłodniczych na warstwę ozonu w atmosferze, po podpisaniu Protokołu Montrealskiego w roku 1986, rozpoczęły się intensywne prace badawcze mające na celu rozwój technologii chłodniczych niekorzystających z w/w związków chemicznych. Prace te często sięgały do znanych od dziesięcioleci konceptów chłodziarek, które nie były rozwijane przede wszystkim ze względu na opanowanie produkcji chlorowcopochodnych freonów, które uchodziły za wręcz idealne czynniki aż do lat 80-tych XX wieku. Równolegle zaczęto rozwijać technologie, które pozwalają na wykorzystanie niskotemperaturowego ciepła i jego konwersję na pracę mechaniczną. Przykładami urządzeń, które mogą być wykorzystywane zarówno w obiegach prawobieżnych jak i lewobieżnych są maszyny Stirlinga i będące przedmiotem ocenianej rozprawy chłodziarki i silniki termoakustyczne.

Tematyka ocenianej rozprawy wpisuje się w pełni w powyższe trendy badawcze i jest bardzo trafiona. Autor dobrze zdefiniował cele i zakres pracy. Przyjmując jako przedmiot badań podstawową konfigurację chłodziarki termoakustycznej w postaci liniowego urządzenia z falą stojącą, jako główny cel badawczy określił identyfikację zbioru parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych chłodziarki, które mają największy wpływ na jej osiągi i podlegają optymalizacji. Cel ten został osiągnięty w sposób jakościowy. Stosując trzy odrębne podejścia badawcze, takie jak wykorzystanie dedykowanego i ogólnie dostępnego oprogramowania DeltaEC, opracowanie własnego modelu numerycznego w środowisku Ansys oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych zbudowanego przez siebie modelu chłodziarki, uzyskał zbieżne wyniki pod względem jakościowym jednak przy bardzo dużych rozbieżnościach ilościowych. Np. różnice temperatur na końcach regeneracyjnego wymiennika ciepła różnią się o trzy rzędy wielkości w przypadku wyników modelowania w środowisku DeltaEC od rezultatów uzyskanych w wyniku modelowania numerycznego oraz przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Stąd też nasuwają się następujące uwagi krytyczne:

1. Wykorzystany do zamodelowania chłodziarki termoakustycznej model liniowy bazuje na podejściu fizykalnym. Obliczenia wykonano wykorzystując dedykowane oprogramowanie DeltaEc, upowszechnione przez Los Alamos National Laboratory i szeroko wykorzystywane przy modelowaniu wybranych parametrów urządzeń termoakustycznych, z dobrym udokumentowaniem rezultatów w literaturze. Model całkuje jednowymiarowe równanie falowe, równania pędu, ciągłości i energii przy warunkach brzegowych zdefiniowanych przez użytkownika. Wyniki modelowania z wykorzystaniem DeltaEC są licznie przedstawione w literaturze i zazwyczaj charakteryzują się dość dobrą zgodnością z eksperymentem. W przypadku ocenianej pracy różnica temperatur obliczona przy wykorzystaniu programu DeltaEC jest o dwa do trzech rzędów wielkości większa od zmierzonej przez Autora na stanowisku badawczym. Jak Autor zauważa maksymalna różnica temperatur przekraczająca 1000 °C jest wartości

„nieracjonalną” (strona 40). Komentując w pracy niefizykalne wyniki pisze, że „można domniemywać, że wyniki analizy otrzymane dla rezonatora o długości 350 mm nie są wiarygodne, a wyznaczone wartości pochodzą z inherentnego błędu wykorzystanego oprogramowania” (strona 41). W związku z powyższym nasuwają się pytania:

- a. Czy Autor próbował zdefiniować przyczyny tak dużych odstępstw wyników obliczeń od uzyskanych wyników eksperymentalnych i czy modyfikował warunki brzegowe modelu chcąc zidentyfikować źródło błędu?
 - b. Czy skontaktował się z dostawcą oprogramowania DeltaEC w celu wyjaśnienia możliwości usunięcia błędów z kodów źródłowych oprogramowania, które nie są powszechnie dostępne? Czy uzyskał odpowiedź?
2. Definiując cel pracy autor zaproponował szeroki zbiór parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych chłodziarki, które uzmienniał szukając ich wpływu na parametry użytkowe urządzenia. Natomiast ograniczył się jedynie do wyznaczania różnicy temperatur na końcu wymiennika ciepła, pomijając takie parametry urządzenia jak efektywność termodynamiczna COP, moc chłodnicza (cieplna), czas rozruchu, które decydują o funkcjonalności chłodziarek i pomp ciepła. Jakie było kryterium wyboru różnicy temperatur i dlaczego w pracy nie przedstawiono wyników modelowania i pomiarów innych parametrów chłodziarki/pompy ciepła?
 3. Zmierzone różnice temperatur przeciwległych krawędzi wymiennika ciepła mają niewielkie wartości (rzędu dwóch °C) i nie są wystarczające aby prototyp miał cechy funkcjonalne chłodziarki. Czy mierzone niskie różnice temperatur wynikają z zaproponowanej konstrukcji prototypu, czy mają również swoje źródło w wymianie ciepła z otoczeniem?
 4. Czy podjęto próbę zdefiniowania wartości wytypowanego zbioru parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych aby uzyskać parametry robocze pozwalające na skonstruowanie funkcjonalnej chłodziarki?
 5. Czym się Autor kierował proponując konkretne parametry konstrukcyjne prototypu chłodziarki oraz dokonując wyboru gazów roboczych. Czy urządzenie było projektowane przy założeniu np. określonej mocy chłodniczej i docelowej temperatury, czy celem było jedynie wychwycenie trendów zmian pola temperatur w regeneracyjnych wymienniku ciepła?
 6. W jaki sposób uchwycone zależności można skalować na konstrukcje o większych mocach? Czy podstawowym kryterium skalowania powinien być stosunek długości kanału akustycznego do długości regeneratora?
 7. Jakimi przesłankami należy się kierować dokonując wyboru gazu roboczego?

Uwagi redakcyjne.

- Wyniki obliczeń i pomiarów przedstawiono w postaci wykresów (w treści pracy) i tabel (w załącznikach). Część wykresów jest praktycznie nieczytelna, w szczególności podpisy pod osiami, np. rys. 4.10.
- W pracy wykorzystywane są pojęcia niejednoznaczne jak np. „czynniki fikcyjne” (strona 58), do których w odnośniku napisano „Może dać tu jakieś wyjaśnienie”. Ta i inne

niejasności i niejednoznaczności utrudniają czytanie i śledzenie toku rozumowania Autora.

- Niektóre ze sformułowań użytych przez Autora są mało precyzyjne i mają cechy tautologii, np. „podniesienie parametrów akustycznych urządzeń w celu zwiększenia ich parametrów pracy”.

Wniosek końcowy

Recenzowana praca potwierdza oryginalność problemu naukowego określonego przez mgr. inż. Krzysztofa Grzywnowicza. Mając na uwadze szerokie zainteresowanie nowymi urządzeniami chłodniczymi charakteryzującymi się wysoką niezawodnością oraz brakiem niekorzystnego wpływu na środowisko w przypadku rozszczelnienia, chłodziarki termoakustyczne są szeroko badane i kompleksowe podejście Autora zasługuje na uznanie. Za szczególnie wartościową część pracy uważam skonstruowanie stanowiska badawczego, przeprowadzenie pomiarów i ich walidacja w oparciu o własny model numeryczny, uprzednio zwalidowany w oparciu o dane literaturowe. Uzyskane wyniki mają znaczenie przede wszystkim jakościowe, pozwalają na opracowanie planu rozwoju urządzeń termoakustycznych w oparciu o dobrze zdefiniowane parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne, które mogą być uziemiennie i optymalizowane.

Autor jest biegły w formułowaniu złożonych modeli analitycznych oraz numerycznych, charakteryzuje Go bardzo dobry warsztat eksperymentalny. Na podkreślenie zasługuje staranność wykazana podczas uruchamiania stanowiska oraz analiza błędów. Autor wykazał się umiejętnością prowadzenia prac naukowych zarówno opartych na modelowaniu jak i pracach eksperymentalnych. Recenzowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez stosowne przepisy.

Wnioskuje o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Grzywnowicza „Numeryczno-eksperymentalne badania zjawiska termoakustycznego” przez Radę Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

