

dr hab. inż. Krzysztof Bieńczak
prof. nadzw. Politechniki Poznańskiej
ul. Hugona Kołłątaja 138
61-421 Poznań

Poznań, 17.08.2023 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Kajurka pt.:

„Dostosowanie podstawowych parametrów fali akustycznej oraz geometrii stosu do wydajności chłodniczej termoakustycznego urządzenia chłodniczego z falą stojącą zasilanego przetwornikiem elektroakustycznym”

Opinia została opracowana na zlecenie prof. dr. hab. inż. Janusza Frączka Dziekana Wydziału Mechanicznego, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej (umowa o dzieło nr 1130/.../2023).

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Artur Rusowicz, prof. uczelni, a promotorem pomocniczym dr inż. Andrzej Grzebielec.

1. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa obejmuje 160 stron podzielonych na 6 rozdziałów. Dodatkowo: streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz oznaczeń, załączniki i bibliografię zawierającą 130 pozycji.

W treści rozprawy zawarto:

- 1) Wstęp, gdzie wskazano, iż uwarunkowania środowiskowe i klimatyczne, rosnąca świadomość ekologii, wzrost zapotrzebowania na energię są motorem rozwoju

nowych technologii związanych z wytwarzaniem, transportem i użytkowaniem energii.

W nurt poszukiwań nowych technologii dla chłodnictwa i klimatyzacji wpisują się badania prowadzące do rozwoju urządzeń termoakustycznych.

Zaburzenia gęstości i ciśnienia ośrodka wywołują miejscowe drgania cząsteczek, które powodują oscylację temperatury. W punkcie 1.1 Doktorant omawia podstawy termoakustyki. Przedstawia budowę urządzeń termoakustycznych z falą stojącą. W kolejnym podpunkcie zaprezentował rys historyczny rozwoju urządzeń termoakustycznych poczynając od końca osiemnastego wieku. Z przedstawionego opisu wynika iż urządzenia wykorzystujące zjawisko termoakustyczne znajdują się w początkowym etapie komercjalizacji. W punkcie 1.5 Autor zdefiniował cel pracy i przedstawił jej plan.

- 2) Teoria termoakustyki została omówiona w kolejnym rozdziale. W pierwszej kolejności został przedstawiony opis fali akustycznej. Pokazano przebieg prędkości akustycznej i ciśnienia akustycznego w czasie dla fali biegnącej i fali stojącej. W punkcie 2.2 przedstawiono równania łączące zagadnienia akustyki i termodynamiki. Bilans energii przedstawiony jest w kolejnym punkcie. Następnie Autor omówił obiegi termodynamiczne urządzeń termoakustycznych zbudowane zarówno dla fali biegnącej jak i fali stojącej.
- 3) W kolejnym rozdziale został przedstawiony uproszony model chłodziarek z falą stojącą. Następnie omówione zostały elementy konstrukcyjne i parametry pracy urządzeń. Scharakteryzowano rozwiązanie stosu jako głównego elementu urządzenia termoakustycznego. Następnie omówiono: rezonator, wymiennik ciepła i źródło mocy akustycznej.

Używany w urządzeniach termoakustycznych czynnik roboczy winien cechować się wysoką wartością wykładniczą izentropy.

- 4) Rozważania w rozdziale 3 pozwoliły w rozdziale 4 „Stanowisko badawcze” przedstawić opis stanowiska, które umożliwiło realizację części eksperymentalnej określonej w rozdziale 1.5 „Cel pracy”.

W rozdziale została przedstawiona budowa urządzenia. Scharakteryzowano urządzenia tworzące stanowisko badawcze np. uwzględnione w badaniach wymiary stosów, wymienników ciepła, źródła mocy akustycznej. Omówiono system sterowania i archiwizacji danych. Jako czynniki robocze w badaniach wykorzystano hel i powietrze. Dla wymienionych czynników przeprowadzono badania według procedury przedstawionej w punkcie 4.2.

- 5) W rozdziale 5 „Wyniki badań” w punkcie 5.1 Autor przedstawił wyznaczoną charakterystykę pracy głośnika. Charakterystyka ta pozwoliła na znalezienie punktu, w którym przetwornik zapewnia najwyższe ciśnienie akustyczne, pracował z najwyższą sprawnością czy pracował w sposób nieliniowy. Wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych różnią się. Doktorant podjął próbę wyjaśnienia powstałych różnic. Dokonał charakterystyki pracy urządzenia w różnych konfiguracjach.
- 6) Część merytoryczną rozprawy zamyka rozdział 6 „Podsumowanie i wnioski”. Autor stwierdza iż badania wykonane na zbudowanym stanowisku pozwoliły na zaobserwowanie istotnych cech badanego zjawiska w kontekście ich wykorzystania do budowy urządzeń chłodniczych.

2. Cel pracy

Cel pracy Autor zdefiniował w punkcie 1.5, w którym najpierw wskazał potencjalne zalety chłodnictwa termoakustycznego. Warto podkreślić iż chłodnictwo to znajduje się we wczesnej fazie rozwoju. Jako cel pracy rozprawy przyjęto „zbadanie wpływu podstawowych parametrów fali akustycznej oraz geometrii stosu na parametry pracy termoakustycznego urządzenia chłodniczego z falą stojącą”. Realizacja przyjętego celu wymagała realizacji zadań nazwanych w pracy celami cząstkowymi. Teza pracy brzmi „Dostosowanie podstawowych parametrów fali akustycznej i geometrii stosu wpływa na poprawę wydajności chłodniczej termoakustycznego urządzenia z falą stojącą”.

3. Ocena merytoryczna pracy

Praca poświęcona jest rozwojowi niekonwencjonalnych termoakustycznych urządzeń chłodniczych. Urządzenia termoakustyczne mogą w przyszłości stanowić alternatywne

rozwiązania do użytkowanych systemów sprężarkowych, absorpcyjnych, strumienicowych czy też termoelektrycznych. Urządzenia termoakustyczne są w początkowej fazie rozwoju. Dlatego też można stwierdzić, iż opiniowana praca dobrze wpisuje się w działania zmierzające do budowy szeroko rozumianych urządzeń chłodniczych przyjaznych dla środowiska.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć zbudowanie według własnego projektu, termoakustycznego urządzenia chłodniczego z falą stojącą. Urządzenie to pozwoliło między innymi ocenić właściwości helu i powietrza jako czynników roboczych. Konstrukcja urządzenia pozwalała realizować badania dla różnych geometrii stosów, których technologię wykonania musiał opracować Doktorant.

Zapewne Autor rozprawy włożył wiele pracy aby na zbudowanym stanowisku uzyskać wiarygodne wyniki pozwalające zwalidować dostępny do symulacji i projektowania urządzeń termoakustycznych program DeltaEC. Wykonane badania wykazały obszary, w których istnieją rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów. Informacje te są bardzo istotne dla przyszłych projektantów urządzeń termoakustycznych wykorzystujących w swojej pracy wspomniany program obliczeniowy.

Autor rozprawy szeroko omawia zależności opisujące procesy zachodzące w urządzeniach termoakustycznych z falą stojącą i biegnącą, ta część pracy ma charakter podręcznika wyjaśniającego zasady działania urządzeń. Pozwala to czytelnikom zrozumieć zasady działania tychże urządzeń, chociaż w rozprawie doktorskiej nie jest koniecznie potrzebna. Myślę, iż w przyszłości warto przygotować podręcznik poświęcony teorii urządzeń termoakustycznych dzięki czemu wiedza ta dotrze do szerszego kręgu odbiorców. Omawiając potencjalne czynniki robocze warto byłoby zebrać ich parametry w tablicy np. wykładnik izentropii i liczbę Prandtla w znacznie większej ilości niż w tablicy 4.1.

Wymiary urządzenia eksperymentalnego dobrano dla helu jako czynnika roboczego, dlatego też różnice w efektywności pracy tegoż urządzenia wypełnionego powietrzem jako czynnika roboczego nie pokazują rzeczywistych różnic poza wspomnianym czynnikiem. Aby dokonać pełnej oceny należałoby wykonać porównanie pomiędzy urządzeniami zaprojektowanymi dla konkretnego czynnika.

Realizacja tegoż postulatu zwiększyłaby nakłady na realizację badań eksperymentalnych i wydłużyła ich czas realizacji.

W przypadku zastosowanych torów pomiarowych temperatury warto jest dokonać sprawdzenia ich dokładności oraz pokazać sposób montażu czujników pomiarowych.

4. Wartość użyteczna pracy

Urządzenia termoakustyczne są we wczesnej fazie rozwoju, dlatego też wyniki badań Doktoranta nie mogą posłużyć do budowy urządzenia komercyjnego. Jednakże z całą pewnością można stwierdzić, iż dzięki temu urządzenia te będą mogły stanowić alternatywę dla układów parowych (sprężarkowych, absorpcyjnych, strumienicowych) i termoelektrycznych.

5. Uwagi końcowe

Prezentowana rozprawa doktorska napisana jest rzeczowo i w sposób komunikatywny. Autor w pełni zrealizował postawiony sobie cel i potwierdził sformułowaną w punkcie 1.5 tezę. Godnym podkreślenia jest fakt budowy stanowiska badawczego. Świadczy to o zdolnościach nie tylko naukowych ale i o umiejętnościach organizacyjnych Doktoranta. Sformułowane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i powinny być inspiracją do dalszej działalności badawczej. Uwagi te nie pomniejszają wartości opiniowanej pracy, którą oceniam bardzo wysoko.

6. Wniosek do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych oraz doбором metod ich rozwiązania.

Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr. inż. Jakuba Kajurka jako rozprawy doktorskiej spełniającej wymagania określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j. t. Dz. U. z 2023 r., poz. 212) i jej dopuszczenie do publicznej obrony. Praca ta stanowi znaczące osiągnięcie Autora i jest wkładem do poszukiwania efektywnych ekonomicznie i przyjaznych dla środowiska urządzeń chłodniczych i klimatyzacyjnych wykorzystujących zjawisko termoakustyczne.

