

Kraków, 17.08. 2022 r.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica  
Wydział Energetyki i Paliw  
Al. A. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków  
[wnowak@agh.edu.pl](mailto:wnowak@agh.edu.pl)  
Tel: 604410913

## **Recenzja**

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Grzywnowicza „Numeryczno-eksperymentalne badania zjawiska chłodzenia termoakustycznego”**

## **Wstęp**

Recenzję rozprawy doktorskiej opracowano na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z 23.06.2022 r.

## **Zasadność tematyki**

Chłodziarki termoakustyczne to systemy, które wykorzystują fale akustyczne do generowania mocy chłodniczej. Składają się one głównie z głośnika przymocowanego do rezonatora akustycznego (rury) wypełnionego gazem. W rezonatorze umieszczony jest stos składający się z szeregu równoległych płyt i dwóch wymienników ciepła. Głośnik

podtrzymuje akustyczną falę stojącą w gazie przy podstawowej częstotliwości rezonansowej rezonatora. Akustyczna fala stojąca przemieszcza gaz w kanałach stosu w kanałach stosu podczas sprężania i rozprężania. Termiczna interakcja pomiędzy oscylującym gazem, a powierzchnią stosu generuje akustyczne przenoszenie ciepła. Wymienniki ciepła wymieniają ciepło z otoczeniem, po zimnej i gorącej stronie stosu.

Thermoakustyczne silniki cieplne mają tę zaletę, że pracują z gazami obojętymi i z niewielką ilością lub brakiem ruchomych części, co czyni je wysoce wydajnymi z prawie zerowymi kosztami operacyjnymi. Nie są potrzebne żadne niebezpieczne dla środowiska czynniki chłodnicze. Stosowane są wyłącznie gazy obojętne, które są bezpieczne dla środowiska. Świadomość o destrukcyjnym wpływie CFC na środowisko oraz zakaz produkcji urządzeń wykorzystujących CFC, stanowiła wyzwanie dla badaczy do znalezienia alternatywnego rozwiązania tego problemu. W tym scenariuszu, chłodziarka termoakustyczna może być jednym z interesujących rozwiązań pozwalających na zastąpienie konwencjonalnych systemów chłodniczych. Ponadto cykl termoakustyczny nadaje się również do bardziej efektywnego sterowania procesowego. Wszystkie te powody czynią chłodziarkę termoakustyczną potencjalnie atrakcyjnym urządzeniem do szerokiego zastosowania w praktyce.

Termoakustyka jest znana od wielu lat, ale wykorzystanie tego zjawiska do budowy silników i pomp jest dość nowe. Mimo, iż teoria termoakustyki jest dobrze ugruntowana, ale ilościowe i jakościowe podejście inżynierskie do projektowania chłodziarek termoakustycznych jest wciąż niewystarczająco prezentowane w dostępnej literaturze.

*Biorąc pod uwagę, iż chłodnictwo termoakustyczne jest innowacyjną alternatywą dla konwencjonalnych systemów chłodniczych uważam, że tematyka rozprawy doktorskiej wiąże się bezpośrednio z nowymi trendami poszukiwania i implementacji takich rozwiązań procesowych, które pozwalają na tworzenie nowych systemów chłodniczych. Problem naukowy został postawiony poprawnie oraz rozwinięty za pośrednictwem sformułowanych tez rozprawy. Cel jak i zakres pracy adekwatnie wynikają z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu oraz postawionego problemu przez Autora.*

## Układ pracy

Praca podzielona jest na siedem rozdziałów i liczy 164 strony. Bibliografia zawiera 122 pozycje, w tym osiem, w której Doktorant jest współautorem. Doktorant jest również współautorem trzech patentów wskazanych w rozdziale Literatura.

Praca zaczyna się od Wprowadzenia (Rozdział 1), w którym Doktorant omawia podstawy zjawiska termoakustycznego oraz podaje przykłady konstrukcji urządzenia termoakustycznego z falą stojącą i biegnącą. Pokazano również konstrukcję układu wytwórczego, wykorzystującego układ szeregowo połączonych dwóch silników termoakustycznych, z równolegle umieszczonym alternatorem liniowym. Intensywnie rozwijaną grupę urządzeń stanowią także termoakustyczne pompy ciepła oraz urządzenia do separacji gazów. Tej tematyce Doktorant poświęca sporo uwagi.

W dorobku Doktoranta znajdują się opracowania, za które przyznano patenty RP (nr 240641, nr 237213 oraz nr 220560). W opisie patentowym nr 240641 będącym dorobkiem Doktoranta, opisano układ wykorzystujący zjawisko termoakustyczne do chwilowej modyfikacji warunków wymiany ciepła między dwoma płynami. W opisie patentów nr 220560 i 237213 odwołano się do wykorzystania urządzeń termoakustycznych w procesach separacji gazów.

Rozdział 2 przedstawia motywację, zakres i cel rozprawy. Celem głównym rozprawy doktorskiej jest określenie zależności parametrów pracy kompaktowej chłodziarki termoakustycznej od jej cech konstrukcyjnych oraz określenie szczególnie korzystnych cech konstrukcyjnych. Następnie omówiono cele cząstkowe, takie jak:

- przygotowanie matematycznego modelu urządzenia w wariantach odwzorowujących niektóre z przebadanych eksperymentalnie konfiguracji oraz przeprowadzenie analiz obliczeniowych z wykorzystaniem dostępnych narzędzi obliczeniowej dynamiki płynów,
- przygotowanie matematycznego modelu urządzenia w wariantach odwzorowujących wszystkie przebadane eksperymentalnie konfiguracje oraz przeprowadzenie analiz obliczeniowych z wykorzystaniem modelu liniowego w oparciu o niekomercyjne narzędzia obliczeniowe,

- modyfikację i rozbudowę stanowiska do badań eksperymentalnych zjawiska chłodzenia termoakustycznego,
- przebadanie szeregu wymiennych elementów stanowiska eksperymentalnego, umożliwiających realizację badań w poszerzonym zakresie zmienności parametrów konstrukcyjnych urządzenia termoakustycznego,
- wyznaczenie parametrów operacyjnych urządzenia termoakustycznego, funkcjonującego jako chłodziarka, w funkcji uzmiennionych parametrów konstrukcyjnych (długości kanału akustycznego, wymiarów geometrycznych wymiennika regeneracyjnego, materiału wykonania wymiennika regeneracyjnego) i środowiskowych (kompozycji gazu roboczego, ciśnienia gazu roboczego),
- wykonanie szeregu serii pomiarowych i oszacowanie błędów pomiarowych oraz przeprowadzenie podstawowej diagnostyki stanu pracy urządzenia z wykorzystaniem elementów matematycznego przetwarzania i analizy sygnałów.

Badania z wykorzystaniem modelu liniowego opisano w Rozdziale 3. Na potrzeby analizy obliczeniowej, w środowisku DeltaEC<sup>TM</sup> przygotowano model urządzenia składający się z szeregu segmentów. Model wyposażono w blok danych zawierający zestawienie warunków brzegowych oraz warunków początkowych układu. Bloki te wprowadzono w celu wyznaczenia różnicy temperatur między wymiennikiem gorącym oraz wymiennikiem zimnym, mocy cieplnej odebranej z wymiennika zimnego z uwzględnieniem strat przewodzenia, wartości stosunku temperatur na wymienniku zimnym, wartości współczynnika COP urządzenia oraz wartości współczynnika COP odniesionej do wartości COP wyznaczonego dla obiegu Carnota. Obliczenia z wykorzystaniem modelu liniowego wymagały założenia szeregu warunków brzegowych, które opisano w Rozdziale 3.2. Natomiast w Rozdziale 3.3. pokazano rezultaty obliczeń z wykorzystaniem modelu liniowego z ich analizą. Analiza uzyskanych wyników, przekształconych na drodze interpolacji oraz przedstawionych pozwoliła między innymi stwierdzić, iż zasadniczy wpływ na uzyskiwaną różnicę temperatur ma rodzaj zastosowanego materiału regeneratora i związanych z nim założonych różnic konstrukcyjnych. Ponadto, układy wykorzystujące regeneratory wykonane z żywicy wykazują istotnie niższą zależność obserwowanej różnicy temperatur od długości regeneratora. Analizując wyniki, otrzymane dla urządzenia wykorzystującego powietrze jako

gaz roboczy, należy zauważyć negatywny wpływ wzrostu ciśnienia gazu na otrzymaną różnicę temperatur. Należy również podkreślić zasadniczą zależność obserwowanego efektu cieplnego od długości kanału akustycznego.

Badania z wykorzystaniem środowiska CFD przedstawiono w Rozdziale 4. Opracowano trójwymiarowy model urządzenia termoakustycznego, wchodzącego w skład stanowiska eksperymentalnego. Przeprowadzono analizy numeryczne, mające na celu wyznaczenie charakterystyki zależności amplitudy ciśnienia akustycznego, obserwowanej na regeneracyjnym wymienniku ciepła, od amplitudy drgań sztywnej ścianki (wzбудnika). Przed rozpoczęciem właściwych symulacji, przeprowadzono weryfikację i walidację opracowanego modelu, które opisano w Rozdziale 4.3. Założona weryfikacja i walidacja modelu polegała na analizie wrażliwości rezultatów symulacji testowych od kroku czasowego oraz jakości siatkowania geometrii, a także na odniesieniu wyników do danych eksperymentalnych. Wyniki symulacji wykazały dobrą zgodność rezultatów obliczeń i danych eksperymentalnych. Maksymalna różnica między zaobserwowanymi eksperymentalnie i obliczeniowo różnicami temperatur po sześciu sekundach od rozpoczęcia emisji fali akustycznej dla przeciwległych powierzchni frontalnych regeneratora wyniosła  $0,7^{\circ}\text{C}$ , a maksymalna obserwowana różnica temperatur zidentyfikowana po dziesięciu sekundach od rozpoczęcia emisji fali nie przekroczyła  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

Wyniki i dyskusję obliczeń pokazano w Rozdziale 4.4. Rezultaty przeprowadzonych symulacji wskazują na istotną zależność parametrów pracy urządzenia od cech geometrycznych i parametrów środowiskowych. Na podstawie przeprowadzonych badań Doktorant stwierdza, że zestaw cech konstrukcyjnych i materiałowych wymiennika regeneracyjnego ma zasadniczy wpływ na maksymalne parametry pracy kompaktowej chłodziarki termoakustycznej. Niezależnie od zastosowanego zestawu cech, korzystne jest wykorzystanie helu jako gazu roboczego.

Konstrukcję urządzenia, umożliwiającego analizę znacznej liczby parametrów środowiskowych i konstrukcyjnych podano w Rozdziale 5, a metodykę badań opisano w Rozdziale 5.2. Procedurę pomiarową, a szczególnie kalibrację czujników pomiarowych podano w Rozdziale 5.3. Na podstawie rezultatów przeprowadzonej kalibracji stwierdzono, że wskazania poszczególnych czujników pomiarowych są zgodne z oczekiwaną klasą, a zaobserwowane odchyłki mieszczą się w granicy błęd pomiarowego.

Rozdział 6 poświęcony jest badaniom eksperymentalnym. Procedura pomiarowa została szczegółowo opisana w Rozdziale 6.1. W celu identyfikacji jakości przeprowadzonych pomiarów oraz wpływu błęd pomiarowego na otrzymane wyniki,

dokonano matematycznej oceny otrzymanych wyników w Rozdziale 6.2. Wyniki badań eksperymentalnych przedstawiono w Rozdziale 6.3. Zaobserwowano istotną zależność zakresu wartości obserwowanej różnicy temperatur od ciśnienia gazu roboczego oraz różnicy temperatur zarówno od długości kanału akustycznego, jak i ciśnienia gazu roboczego. Najwyższe wartości różnicy temperatur zaobserwowano dla stosunku  $Lac/Lr$  wynoszącego około 12 oraz około 16. Z przeprowadzonych eksperymentów można jednoznacznie stwierdzić, że cechą urządzenia o decydującym znaczeniu w kontekście obserwowanych parametrów pracy jest geometria wymiennika regeneracyjnego. Zauważono satysfakcjonującą zgodność wyników symulacji numerycznych CFD z danymi eksperymentalnymi. Wnioski końcowe opisano w Rozdziale 7.

## **Elementy nowości naukowej rozprawy doktorskiej**

### ***Najważniejsze oryginalne osiągnięcia recenzowanej pracy doktorskiej to:***

- opracowania jedno- i trójwymiarowych modeli urządzenia termoakustycznego, uwzględniającej uzmiennienie parametrów materiałowych oraz cech środowiskowych,
- autorskie oprogramowanie umożliwiające automatyczne wywoływanie poleceń pozycjonowania elementów stanowiska,
- szeroka analiza parametryczna z wykorzystaniem modeli kompaktowego urządzenia termoakustycznego, opracowanych w środowisku CFD oraz algorytmu liniowego,
- zaproponowanie podstaw doboru cech konstrukcyjnych kompaktowej chłodziarki termoakustycznej,
- określenie wpływu szeregu cech konstrukcyjnych i operacyjnych na parametry pracy kompaktowej chłodziarki termoakustycznej na podstawie rezultatów badań eksperymentalnych i numerycznych.

### ***Najważniejsze osiągnięcia praktyczne to:***

- wskazanie na trudności w przygotowaniu i realizacji analiz obliczeniowych urządzenia termoakustycznego, które mogą być przydatne na etapie konstrukcyjnym,
- omówienie podstawowych zagadnień metrologicznych ze szczególnym uwzględnieniem trudności pomiarowych występujących przy identyfikacji parametrów pracy kompaktowej chłodziarki termoakustycznej,

- przedstawienie i uzasadnienie metodyki doboru materiałów oraz wybranych cech geometrycznych chłodziarki termoakustycznej,
- podano wytyczne konstrukcyjne kompaktowych urządzeń termoakustycznych, niedostępne dotychczas w literaturze,
- wykazano, że zastosowane w pracy narzędzia CFD umożliwiają detekcję zestawów cech konstrukcyjnych i parametrów procesowych uniemożliwiających stabilizację zjawiska w kompaktowych urządzeniach termoakustycznych.

## **Poziom warsztatowy**

Przedstawiona rozprawa napisana jest wynikiem bardzo trudnych i uciążliwych prac zarówno obliczeniowych jak i laboratoryjnych.

Doktorant wykazał bardzo dobre przygotowanie eksperymentalne. Posiada głęboką wiedzę teoretyczną, a także wysokie umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W szczególności podkreślić należy na swobodę z jaką Doktorant posługuje się stosowanymi metodami badawczymi i interpretacja otrzymanych wyników. Zarówno dobór tematyki jak i analizowanych źródeł uznać należy za prawidłowy. Praca posiada przejrzysty układ treści, konsekwentnie stosowane nazewnictwo oraz symbolikę. Drobne uwagi redakcyjne, w tym dotyczące terminologii naukowej i używanych sformułowań zaznaczyłem w maszynopisie. Uwagi te mają postać całkowicie drugorzędą stosowane sformułowania uważam ogólnie za właściwe i całkowicie poprawne. Nie mam żadnych zastrzeżeń do materiału ilustracyjnego, pomijając drobne usterki redakcyjne zaznaczone w tekście. Materiał ilustracyjny jest celowy i dobrany właściwie.

## **Uwagi krytyczne**

W trakcie czytania pracy nasunęły mi się pewne uwagi krytyczne, które nie mają jednak istotnego wpływu na wysoką wartość merytoryczną przedstawionej rozprawy, a dotyczą zagadnień omówionych poniżej.

1. Brakuje mi w pracy analizy współczynnika wydajności chłodziarki COP, definiowanego jako stosunek mocy chłodniczej uzyskiwanej przez układ do mocy akustycznej.

2. Celem konstrukcji chłodziarki termoakustycznej jest spełnienie wymagań dotyczących wymaganej mocy chłodniczej i wymaganej niskiej temperatury. Proszę o komentarz.
3. Ponieważ gęstość mocy w urządzeniu termoakustycznym jest proporcjonalna do średniego ciśnienia, korzystne wydaje się być wybranie jak największej wartości tego ciśnienia. Ale wybór tej wartości jest uwarunkowany wytrzymałością mechaniczną rezonatora. Czy Doktorant brał pod uwagę te aspekty ?
4. Jak dobierane były ciśnienia gazu roboczego dla powietrza, helu i CO<sub>2</sub> ? Dlaczego nie stosowano większych ciśnień ?
5. Proszę o komentarz do Tablicy 4.5. - aby zminimalizować przewodzenie ciepła z gorącej strony do strony zimnej, należy zastosować wymiennik regeneracyjny wykonany z materiału o niskiej przewodności cieplnej, czyli ABS lub inny nie uwzględniony w pracy.
6. W Rozdziale 5.2 dokonano analizy częstotliwości wzbudzenia od 125 Hz do 2000 Hz i odrzucono częstotliwości wyższych i równych 1000 Hz. Którą ostatecznie wybrano częstotliwość ?
7. Hel ma największą prędkość dźwięku i w moim przekonaniu to ten gaz powinien być wykorzystywany jako gaz roboczy w chłodziarce termoakustycznej – proszę o komentarz. Wprawdzie na str. 69 Doktorant pisze, iż *korzystne jest wykorzystanie helu*, ale brakuje uzasadnienia.
8. Brakuje mi w pracy analizy COP w funkcji długości kanału akustycznego i ciśnienia roboczego. Ile wynosi COP chłodziarki termoakustycznej na tle innych urządzeń chłodniczych ?

## **Wnioski końcowe**

Reasumując można stwierdzić, iż tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Grzywnowicza p.t.: „Numeryczno-eksperymentalne badania zjawiska chłodzenia termoakustycznego” wiąże się bezpośrednio z koniecznością wprowadzenia nowego podejścia i rozwiązań procesowych do zastąpienia konwencjonalnych urządzeń chłodniczych chłodziarkami termoakustycznymi.

Praca mieści się w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*.



Do najważniejszych walorów recenzowanej rozprawy zaliczam:

- poprawnie postawiony problem naukowy oraz rozwinięty za pośrednictwem sformułowanych tez rozprawy. Cel jak i zakres pracy adekwatnie wynikają z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu oraz postawionego problemu przez Doktoranta,
- rozprawa doktorska zawiera rozwiązanie ważnego zadania naukowego jakim jest szczegółowa analiza chłodziarki termoakustycznej,
- przeprowadzenie trudnych prac obliczeniowych i eksperymentalnych na wysokim poziomie naukowym,
- umiejętność praktycznego wykorzystania wyników badań naukowych,
- poprawnie wybrano przedmiot analiz i metodykę, uzyskano ważne kompleksowe wyniki,
- Doktorant wykazał się dużymi umiejętnościami i talentem w prowadzeniu trudnych badań eksperymentalnych.

Reasumując, stwierdzam że oceniona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytułach naukowych. Wobec powyższego **wniosuję, by Wysoka Rada Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej dopuściła mgr inż. Krzysztofa Grzywnowicza do dalszego etapu postępowania doktorskiego.**

Jednocześnie biorąc pod uwagę zarówno walory naukowe jak i praktyczne opisane powyżej **wniosuję o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej.** Wysoka wartość naukowa recenzowanej pracy jest rzeczą niewątpliwą. Ujęto w niej w dotychczas niespotykany, kompleksowy sposób problematykę chłodzenia termoakustycznego. Obszerne rozważania zawierają zarówno elementy o charakterze naukowo – poznawczym, wyniki analiz eksperymentalnych, jak też analizy mające znaczenie praktyczne.

