



Prof. dr hab. inż. Waldemar Kuczyński  
Politechnika Koszalińska Wydział Mechaniczny  
Katedra Energetyki  
75 – 620 Koszalin, ul. Raławicka 15-17  
Tel. 94 3478-420, 437  
email: waldemar.kuczynski@tu.koszalin.pl



Koszalin 06.06.2023

## 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”

Recenzję wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej, w oparciu o pismo nr RND-1ŚGiE/41/2023 z dnia 25.04.2023 r.

Rozprawa doktorska powstała i została zredagowana pod kierunkiem **dr hab. inż. Artura Rusowicza prof. PW** oraz **dr inż. Andrzeja Grzebielca**, jako promotora pomocniczego.

### 1. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem przedłożonej do oceny rozprawy doktorskiej było przeprowadzenie badań, mających na celu określenie wpływu podstawowych parametrów przemieszczania się fali dźwiękowej w termoakustycznym urządzeniu chłodniczym. Przemieszczający się sygnał, mający charakter termoakustycznej fali stojącej jest zależny od geometrii wykorzystywanych w tego typu urządzeniach tzw. stosów. Cechą główną chłodniczego urządzenia o tej konstrukcji jest wykorzystanie odpowiednich wymienników ciepła, z których dolny określany niskotemperaturowym obciążony jest ciepłem o równej wartości. Istotnym parametrem, który ma wpływ na sprawność zarówno od strony chłodniczej (EER), jak i wykorzystania, jako pompy ciepła (COP) zaproponowanych układów, jest konstrukcja tzw. stosów, o czym wspomniano powyżej. Decydujące znaczenie w tych działaniach ma materiał, z jakiego są wykonane te elementy, ich geometria w postaci modelowanych szczelin oraz rozmieszczenie w całym układzie. Elementy te decydują przede wszystkim o prędkościach rozchodzenia się sygnału ciśnieniowego oraz dźwiękowego w zależności od częstotliwości ich generowania. Kolejnym istotnym segmentem w urządzeniach termoakustycznych, są generatory sygnału dźwiękowego, potocznie określanymi głośnikami. Parametry pracy tych urządzeń mają ścisły związek z osiąganymi mocami oraz sprawnościami tych systemów.

Analiza literatury przeprowadzona przez Autora opracowania, wskazuje, obszar związany z badaniami nad wykorzystaniem układów termoakustycznych, sięga prawie 250 lat wstecz. Na przestrzeni tych lat, wielu autorów w oparciu o teorie falowe przemieszczania się sygnałów ciśnieniowych oraz temperaturowych w ośrodkach jedno- i wielofazowych, zaproponowało różne aplikacyjne rozwiązania wykorzystania wiedzy z tego obszar. Podstawowym założeniem w tej

teorii jest odniesienie przemieszczających się zmian ciśnienia i temperatury do prędkości dźwięku. Pozwala to na identyfikację prędkości przemieszczania się masy wykorzystywanego w danym rozwiązaniu technicznym czynnika termodynamicznego oraz określenia tzw. przesunięcia pomiędzy sygnałem zadany a przemieszczającym się w określonym ośrodku. Proces ten jest charakterystyczny dla układów z falą przemieszczającą się, natomiast w przypadku tzw. fali stojącej dotyczy on układu, gdzie teoretycznie może nie dochodzić do przemieszczania się czynnika termodynamicznego. W rzeczywistości zjawisko to identyfikuje się w odniesieniu do procesów realizowanych w tzw. zamkniętej objętości. W takim przypadku pojawiają się oddziaływania o charakterze rezonansowym oraz przesunięcia fazowe, mające w przypadku urządzeń termoakustycznych fundamentalne znaczenie w określeniu sprawności jakości procesu. Prowadzi to do wystąpienia funkcyjnych zależności parametrów intensywnych układu od wartości ciśnieniowych oraz termicznych realizacji procesu termodynamicznego w tych układach, niezależnie od rodzaju występujących oddziaływań falowych.

W przedstawionej do oceny rozprawie doktorskiej podjęto próbę przeprowadzenia eksperymentalnych badań dotyczących rozpatrywanej tematyki oraz weryfikacji uzyskanych wyników za pomocą analizy numerycznej. W tym celu wykorzystano standardowe równania stanu a także kody oprogramowania typu DeltaEC. Badania eksperymentalne przeprowadzono na zbudowanym w tym celu stanowisku badawczym o określonych parametrach technicznych.

## 2. Struktura redakcyjna pracy

Rozprawę doktorską zredagowano na 160 stronach w postaci zwartej publikacji Politechniki Warszawskiej. Zawiera ona Streszczenie w języku polskim oraz angielskim, spis treści, wymagany wykaz oznaczeń, wykaz pozycji bibliograficznych Załączniki. Treść opracowania zawarta jest natomiast w 6 rozdziałach, gdzie ostatni to Podsumowanie i wnioski.

W rozdziale 1 zatytułowanym **Wstęp**, podano syntetycznie, czego dotyczy rozprawa doktorska. Podano tutaj również cel, zakres i plan zrealizowanej rozprawy doktorskiej.

**Rozdział 2** to informacje dotyczące teorii termoakustyki, gdzie również przedstawiono w sposób czytelny zagadnienia historyczne dotyczące rozwoju tego obszaru technicznego. W opisie zawarto informacje, dotyczące teorii falowych, które rozwijane na przestrzeni minionych lat coraz częściej znajdują aplikacyjne zastosowanie m.in. w chłodnictwie.

W kolejnym **rozdziale 3** przedstawiono teoretyczne i praktyczne aspekty powstałych do tej pory konstrukcji określanych chłodziarkami termoakustycznymi. W tym przypadku dotyczy to takich rozwiązań, w których rozpatruje się urządzenia z tzw. falą stojącą. Opisano tutaj wszystkie aspekty funkcjonowania tego typu systemów, wraz z ich teoretycznymi założeniami odnoszącymi się do wykorzystania równań stanu zachowania masy, pędu i energii. W zakresie praktycznym, przedstawiono opis poszczególnych elementów konstrukcyjnych składających się na budowę tych urządzeń. Zwrócono również uwagę na wykorzystywane czynniki termodynamiczne pozwalające zrealizować obieg termodynamiczny określany termoakustycznym.

**Rozdział 4** to opis stanowiska eksperymentalnego oraz zaproponowana metodyka badań. Należy podkreślić, że w przypadku stanowiska badawczego przedstawiono bardzo szczegółowo wszelkie aspekty dotyczące jego wykonania. Zwrócić należy uwagę na fakt, że przy braku szerokiej dostępności tego typu urządzeń, realizacja pod względem wykonawczym musiała być oparta o wiedzę zdobytą z literatury przedmiotu. Wystąpiły tutaj również z tego powodu ograniczenia techniczne odnoszące się chociażby do materiału, z jakiego wykonano stopy oraz zastosowanego rezonatora w postaci komercyjnego głośnika.

**Rozdział 5** zawiera przedstawione wyniki badań eksperymentalnych zrealizowanych na stanowisku badawczym oraz ich weryfikację przeprowadzoną za pomocą oprogramowania DeltaEC. Wyniki te ujęto w formie zależności funkcyjnych w postaci graficznej, czyli wykresów. Badania zrealizowano zgodnie z metodologią określoną w rozdziale poprzednim na dwóch czynnikach termodynamicznych, jakimi były powietrze oraz hel. Zastosowano różne warianty pracy termoakustycznego urządzenia chłodniczego w postaci zmiennych obciążeń chłodniczych. Eksperyment poprzedzany był badaniami czynnościami kalibrującym stanowisko.

Analiza wyników dotyczyła określenia wpływu zmienności częstotliwości napięcia zasilającego rezonator oraz geometrii stosu na uzyskiwane prędkości ciśnieniowe w odniesieniu do propagacji zadanego sygnału dźwiękowego. Zidentyfikowane różnice między wynikami badań numerycznych a eksperymentalnych interpretowano brakiem możliwości technicznych uzyskania odpowiednich warunków brzegowych na obiekcie rzeczywistym. Niemniej zgromadzony materiał jest bardzo cenny ze względu na jego poznawczy charakter w rozpatrywanym obszarze tematycznym.

W ostatnim **rozdziale 6** podano podsumowanie zrealizowanej rozprawy doktorskiej. Wykonano to w sposób prawidłowy skupiając się na meritum oraz wskazując na istotne elementy związane z interpretacją uzyskanych wyników.

Następnie w opracowaniu umieszczono **Załączniki**, w których znalazły się kody obliczeniowe wykorzystane w ramach zastosowanego oprogramowania DeltaEC. Odnoszą się one do zastosowanych wariantów przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Na końcu opracowania umieszczono wykaz pozycji bibliograficznych, na których oparto redakcję przedstawionej do oceny dysertacji. Zawiera on 130 publikacji o różnym charakterze, czyli artykuły i książki. Pośród nich znalazłem tylko jedną współautorską Doktoranta, która znajduje się na poz. 115. Liczba pozycji, jakie zostały wykorzystane oraz ich zakres tematyczny jest na odpowiednim poziomie.

### 3. Uwagi krytyczne redakcyjne i dyskusyjne do pracy.

Oceniając pod względem redakcyjnym przedstawioną do recenzji rozprawę należy zwrócić uwagę na zwięzły a zarazem klarowny sposób przedstawienia rozpatrywanej tematyki. Zarówno część będąca analizą literatury jak i praktyczna opisująca metodykę i wyniki badań jest zredagowana dobrym językiem z prawidłowymi określeniami technicznymi. Na uwagę zasługuje bardzo niewielka liczba błędów językowych, które zapewne pojawiły się na etapie ostatecznej redakcji tego opracowania. Natomiast na uwagę krytyczną zasługuje nieczytelne umieszczanie rysunków. W wielu miejscach pracy nie pojawiają się one w miejscach odniesienia do wskazani ich występowania w tekście. Przykładowo 1.4, 1.5 itd., Pojawiają się na 2 lub nawet 3 stronie po ich wskazaniu w treści. Utrudnia to znacznie zaznajomienie się z przedstawioną tematyką badawczą. Uwaga ta dotyczy praktycznie całego opracowania. Zaznaczyć należy, że niedogodność ta nie ma wpływu na część merytoryczną dysertacji.

W uwagach dyskusyjnych chciałbym zwrócić uwagę, że Autor dość bezwiednie podaje tylko wyniki badań nie skupiając się na ich interpretacji pod względem fizyki zjawiska. Ma to miejsce chociażby już w pierwszym podrozdziale rozdziału 5 pt. **Charakterystyka pracy źródła dźwięku**, gdzie na rys. 5.1. przedstawiono gwałtowny wzrost sygnału ciśnieniowego w zależności od częstotliwości generowanego dźwięku pojawiającego się w przypadku badań realizowanych dla



helu i powietrza. Uważam, że bardzo interesującym byłoby nie tylko wykonanie opisu przedstawionych zależności, ale również interpretacji tych charakterystyk. Odniesienie się jedynie z informacją, że wpływ mają tutaj zastosowane czynniki chłodnicze jest zbyt lakoniczne. W literaturze znajdują się informacje, mówiące m.in. o tym, że parametry chociażby takie jak gęstość i ściśliwość mają silne oddziaływanie na propagację prędkości dźwięku w danym ośrodku. Zmiany w zasadzie gwałtowny spadek wielkości tego parametru ma miejsce w przypadku przemian fazowych, gdzie w obszarze mieszaniny dwu- lub wielofazowych dochodzi do gwałtownego obniżenia tej prędkości. W rozpatrywanym przez Doktoranta zagadnieniu raczej nie powinna mieć miejsca przemiana fazowa, a jednak pojawiają się nagłe fluktuacje sygnału ciśnieniowego. Widać to chociażby na rys. 5.2. Wy tłumaczenie, że jest to spowodowane pracą rezonatora i pojawia się w pewnym zakresie częstotliwości jego pracy, moim zdaniem nie wyczerpuje tematu. Wskazana powyżej uwaga ma charakter dyskusyjny i powinna być przyczynkiem do jej rozwiązania.

#### 4. Podsumowanie

Podsumowując, należy stwierdzić, że przedstawiona do recenzji praca doktorska charakteryzuje się pod względem merytorycznym znaczną nowością tematyczną. Zagadnienia termoakustyczne wydają się być jednym z przyszłościowych rozwiązań prowadzących do zero emisyjnych urządzeń chłodniczych mających znikomy wpływ na środowisko. Obecnie trwa proces wycofywania związków chemicznych stosowanych, jako czynniki chłodnicze, ze względu na ich oddziaływanie na otoczenie, co zostało określone współczynnikami ODP (wpływ na warstwę ozonową) oraz GWP (tworzenie efektu cieplarnianego). Perspektywiczne zastosowanie przedstawionych rozwiązań, może doprowadzić do całkowitego wyeliminowania tych szkodliwych czynników termodynamicznych. Kolejnym aspektem jest konieczność rozwijania tych konstrukcji, aby osiągnąć sprawności na poziomie przynajmniej obecnie uzyskiwanych w typowych urządzeniach chłodniczych. Działania w tym zakresie należy uznać za wpisujące się w ogólnosiwiatową działalność na rzecz ochrony klimatu i obniżenia wykorzystania energii pierwotnej zawartej przede wszystkim w kopalinach.

Oceniając pracę pod względem redakcyjnym, stwierdzam jej bardzo wysoki poziom. Znajdują się w niej nieliczne błędy językowe, które ewidentnie mogły powstać na etapie ostatnich redakcji treści. Zastosowany język i terminologia mają w zupełności charakter techniczny, wymagany w tego typu opracowaniach.

#### 5. Ocena pracy i wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę przedstawionego do oceny opracowania jego treść i cechy merytoryczne, stwierdzam, że spełnia ono wymogi dysertacji doktorskiej. Określony zakres tematyczny, sposób realizacji założonych przez Autora celów wskazuje na osiągnięcie odpowiednich kompetencji wymaganych zapisami ustawy dla osób ubiegających się o stopień naukowy doktora.

Należy podkreślić, że rozpatrywana tematyka ma charakter naukowy o specyficznym, bardzo wąskim zakresie. Wykorzystanie zjawisk falowych w urządzeniach chłodniczych, mających nazwę termoakustycznych, można uznać za przyszłościowe w tej dziedzinie nauki i techniki. Wieloletnie badania coraz częściej wskazują na ich aplikacyjny charakter. Należy również podkreślić, że obszar ten jest bezpośrednio związany z szeroko rozumianą energetyką.

**Podsumowując** stwierdzam, że przedłożona mi do oceny praca zawiera oryginalne ujęcie problemu naukowego i świadczy o opanowaniu przez jej Autora mgr inż. Jakuba Kajurkanaukowych metod doświadczalnych, stosowanych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, a tym samym wyczerpuje warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz.U.2018 poz. 1668 z późn. zm.) co uzasadnia **dopuszczenie** jej do publicznej obrony o co wnioskuję.

Jednocześnie, ze względu na wysoki poziom opracowania pod względem merytorycznym rozpatrywanej tematyki i interpretacji osiągniętych wyników, a także wysokiej jakości edycyjnej, co wskazano w pkt. 4 tej recenzji, wnioskuję o **wyróżnienie** tej rozprawy doktorskiej.



*prof. dr hab. inż. Waldemar Kuczyński*