

Politechnika Śląska  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych  
Dyscyplina: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka

Rozprawa doktorska

**Numeryczno-eksperymentalne badania  
zjawiska chłodzenia termoakustycznego**

mgr inż. Krzysztof Grzywnowicz

Promotor: dr hab. inż. Leszek Remiorz, prof. PŚ

Gliwice 2022

Rozprawa dotyczy analizy efektów pracy urządzenia termoakustycznego przy uzmiennionych w szerokim zakresie jego cechach konstrukcyjnych i parametrach operacyjnych. Głównym celem założonych prac było określenie zależności parametrów pracy kompaktowej chłodziarki termoakustycznej od jej cech oraz środowiska pracy oraz określenie jej szczególnie korzystnych cech konstrukcyjnych.

W ramach przeprowadzonych badań wykorzystano zróżnicowane metody analizy obliczeniowej tego typu urządzeń, uwzględniając badania modeli jedno- i trójwymiarowych. Rezultaty przeprowadzonych badań numerycznych odniesiono do wyników złożonych badań eksperymentalnych, przeprowadzonych na dedykowanym stanowisku badawczym.

Jednym z najczęściej stosowanych narzędzi dedykowanych numerycznej analizie urządzeń termoakustycznych jest oprogramowanie DeltaEC, którego istota działania bazuje na numerycznym rozwiązywaniu równań dla modelu jednowymiarowego. Oprogramowanie to charakteryzuje się szeregiem cech, które zarówno umożliwiają jego szerokie zastosowanie (np. krótki czas realizacji obliczeń), jak i wymuszają ocenę spodziewanych parametrów procesowych przed rozpoczęciem badań (np. ograniczenia dopuszczalnych parametrów fali akustycznej). Z tej przyczyny, w pracy omówiono podstawy teoretyczne procesu obliczeniowego realizowanego w aplikacji oraz uwypuklono uproszczenia potencjalnie szczególnie istotne dla analiz urządzeń kompaktowych. Przedstawiono metodykę opracowania modelu kompaktowego urządzenia termoakustycznego przy uwzględnieniu charakterystyk sub-modeli dostępnych w wykorzystanej platformie obliczeniowej. Opracowano model kompaktowego urządzenia termoakustycznego, uwzględniający uzmiennienie cech geometrycznych, materiałowych i parametrów środowiskowych analogiczne do założonego na dalszych etapach prac. W dalszej kolejności, wykorzystując przygotowany model, przeprowadzono analizę parametryczną.

W kolejnym etapie badań modelowych wykorzystano oprogramowanie obliczeniowej dynamiki płynów (CFD) Ansys CFX. Wykorzystanie narzędzi CFD jest powszechnie stosowaną praktyką w numerycznej analizie urządzeń termoakustycznych, ze względu na możliwość odwzorowania lokalnie zachodzących zjawisk, co daje szansę na uzyskanie rezultatów istotnie zbliżonych do rzeczywistych parametrów operacyjnych urządzeń. Jednakże, zastosowanie tej metody obarczone jest niejednokrotnie trudnością w postaci znaczącego czasu symulacji, co stanowi zasadnicze ograniczenie w rozpowszechnieniu jej stosowania. W pracy przedstawiono proponowaną metodykę przygotowania modelu urządzenia termoakustycznego, ze szczególnym uwzględnieniem wyboru sub-modeli dostępnych w wybranym środowisku obliczeniowym. Omówiono istotę weryfikacji i walidacji modelu, zarówno w kontekście analizy wrażliwości rezultatów od inherentnych parametrów modelu, jak i porównania wyników analiz wstępnych z literaturą. Na tym etapie badań sporządzono zestaw trójwymiarowych modeli urządzenia termoakustycznego, zbliżony zestawem cech geometrycznych do cech układu wykorzystanego w badaniach eksperymentalnych. Następnie zestaw ten poddano analizie przy uzmiennieniu parametrów materiałowych oraz środowiskowych.

Ze względu na znaczący koszt obliczeniowy badań numerycznych, prowadzonych przy użyciu narzędzi CFD, ich zastosowanie w szerokich analizach parametrycznych jest ograniczone. Ponadto, opracowanie modelu właściwego do przeprowadzenia tego typu analiz wymaga jego walidacji w oparciu o dane pomiarowe. Podobnie, ze względu na istotne uproszczenia w matematycznym opisie zjawiska termoakustycznego zaimplementowane w rozwiązywanym zestawie równań, rozpowszechnione wykorzystanie aplikacji DeltaEC wydaje się nieuzasadnione. Z tej przyczyny, zdecydowano się na przeprowadzenie referencyjnych badań eksperymentalnych. W badaniach tych uwzględniono dokonanie pomiarów na dedykowanym stanowisku badawczym, dla wszystkich zestawów cech konstrukcyjnych i parametrów środowiskowych przeanalizowanych w trakcie realizacji badań numerycznych. W celu redukcji czasu niezbędnego do realizacji prac, dobór zestawów cech konstrukcyjnych i parametrów urządzenia wykorzystanych w analizie numerycznej oparto o adekwatny plan eksperymentu.

W etapie tym omówiono dobór planu eksperymentalnego, właściwego dla założonej ilości parametrów uziemiennych oraz ich poziomów wartości. Zaprezentowano przesłanki konstrukcyjne kompaktowego urządzenia chłodniczego, wchodzącego w skład stanowiska, a także omówiono kluczowe aspekty torów pomiarowych oraz urządzeń kontrolnych, znajdujących się na stanowisku. Zaznaczono także istotę doboru i kalibracji zastosowanych sensorów oraz podstawy automatyzacji pomiarów. Przedstawiono wykorzystane stanowisko eksperymentalne, a także omówiono wpływ parametrów najważniejszych jego elementów na możliwość obserwacji zjawiska termoakustycznego. Omówiono także procedurę pomiarową oraz metodykę identyfikacji parametrów akustycznych badanego urządzenia przy wykorzystaniu wybranych narzędzi matematycznego przetwarzania i analizy sygnałów.

W ostatnim etapie prac omówiono procedurę oszacowania występowania błędów grubych w uzyskanych wynikach eksperymentalnych oraz metodykę szacowania błędów pomiarowych. Przedstawiono również metodykę prezentacji wyników badań eksperymentalnych.

Zaprezentowano oraz omówiono rezultaty badań numerycznych, wykorzystujących zarówno analizy jedno- i trójwymiarowe. Przedstawiono również wyniki badań eksperymentalnych wraz z oszacowanymi wartościami błędów pomiarowych.

Przeprowadzone analizy wykazały satysfakcjonującą zbieżność rezultatów symulacji CFD z danymi eksperymentalnymi przy uwzględnieniu szacowanych błędów pomiarowych. Ujawniono zasadniczy wpływ geometrii wymiennika regeneracyjnego i ciśnienia gazu roboczego na obserwowaną różnicę temperatur wewnątrz urządzenia termoakustycznego. Stwierdzono, że istnieje zakres wartości parametrów opisujących cechy geometryczne urządzenia kompaktowego, dla którego obserwuje się maksymalne wartości różnicy temperatur wewnątrz niego. Wykazano, że zakres ten jest jedynie w niewielkim stopniu zależny od parametrów środowiskowych urządzenia.

Ponadto, wykazano możliwość zastosowania oprogramowania DeltaEC do wyznaczenia ogólnych zależności parametrów operacyjnych od cech konstrukcyjnych i

parametrów środowiskowych. Zebrane dane wykazały satysfakcjonującą zgodność z obserwowanymi danymi eksperymentalnymi w zakresie trendu analizowanych parametrów pracy, przy uwzględnieniu eliminacji błędów grubych. Jednocześnie wykazano ograniczone zastosowanie wybranej platformy do prowadzenia analiz parametrycznych w szerokim zakresie zmienności danych wejściowych ze względu na ryzyko wystąpienia utajonych błędów obliczeniowych.

Rezultaty przeprowadzonych badań numerycznych w środowisku CFD wykazały satysfakcjonującą zgodność wyników z rezultatami eksperymentu przy uwzględnieniu szacowanych błędów pomiarowych. Wyniki symulacji wskazują na zasadniczą zależność parametrów pracy urządzenia od jego cech geometrycznych, a także w mniejszym stopniu od rodzaju i ciśnienia zastosowanego gazu roboczego. Ponadto, przeprowadzone symulacje wykazały istnienie ryzyka załamania zjawiska termoakustycznego dla urządzeń, cechujących się niekorzystnymi cechami geometrycznymi wymiennika regeneracyjnego.

Rezultaty przeprowadzonych badań pozwoliły zidentyfikować wpływ cech konstrukcyjnych i parametrów środowiska na parametry operacyjne kompaktowej chłodziarki termoakustycznej. Zebrane dane umożliwiły ponadto identyfikację szczególnie korzystnych cech takiego urządzenia.