Prof. dr hab. inż. Jerzy Banaszek
Instytut Techniki Cieplnej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska

Warszawa, 03.12.2021

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Rogozińskiego

p.t. *„ Symulacja numeryczna urządzeń termoakustycznych z fala stojącą”*

Podstawą opracowania opinii jest uchwała Rady Dyscypliny *Inżynieria Środowiska, Górnictwo I Energetyka* Politechniki Śląskiej z 16 września 2021 roku o powołaniu na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Rogozińskiego oraz pismo nr RIE-BD/4/IS*.2020/2021 prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina – Przewodniczącego Rady z 6 października 2021 roku.

I. Ocena wyboru tematyki badawczej, zgodność tytułu z treścią rozprawy.

Opiniowana rozprawa doktorska jest pracą teoretyczną podejmującą problem rozbudowy modeli symulacji komputerowej złożonych zjawisk wymiany ciepła w oscylacyjnym przepływie gazu, wywołanym falą akustyczną oraz optymalizacji parametrów pracy urządzeń wykorzystujących zjawiska termo-akustyczne do produkcji energii lub chłodzenia, tj.: silnika i chłodziarki fali stojącej. Głównym przesłaniem przedstawionych w niej badań jest wskazanie potencjalnych możliwości współczesnych metod symulacji komputerowej w głębszym poznaniu fizyki zjawisk, analizie parametrycznej i optymalizacyjnej procesów cieplno-przepływowych niestacjonarnego pola przepływu generowanego przez propagację fali akustycznej w specjalnie ukształtowanej komorze rezonansowej. Podjęcie tej tematyki jest tym bardziej cenne, że dotyczy nowego, wciąż mało zbadanego obszaru potencjalnych zastosowań zaawansowanych modeli obliczeniowej mechaniki płynów.

Urządzenia wykorzystujące efekty termo-akustyczne charakteryzują się prostą budową, niezawodnością ze względu na bardzo małą liczbą elementów, są przyjazne dla otoczenia. Z tych względów w ostatnich latach, znalazły szereg prototypowych zastosowań w chłodzeniu układów elektronicznych, mobilnych systemach chłodniczych, w zero-emisyjnych układach energetycznych, w przemyśle spożywczym, chemicznym, samochodowym i kosmicznym.

Złożone sprzężone procesy cieplno-przepływowe w urządzeniach termo-akustycznych są wciąż mało poznane, zwłaszcza jeśli chodzi o lokalne zakłócenia przepływu i ich wpływ na stabilną pracę oraz wciąż niskie sprawności i współczynniki wydajności silników, chłodziarek i pomp ciepła bazujących na tych zjawiskach. Dlatego w ostatnich latach stały się one przedmiotem intensywnych badań teoretycznych, doświadczalnych i symulacji komputerowych z wykorzystaniem kodów obliczeniowej mechaniki płynów. Te ostatnie dają możliwości szczegółowej analizy stanów nieustalonych, lokalnych zmian parametrów czynnika roboczego wewnątrz poszczególnych elementów i w całym urządzeniu, oceny wpływu cech geometrycznych na charakter ruchu gazu, stabilność i efektywność pracy urządzeń termo-akustycznych. Pełna analiza numeryczna nieustalonych i wieloskalowych procesów (w czasie i przestrzeni) jest jednak czasochłonna i kosztowna, stąd konieczne są poszukiwania uproszczonych, ale wiarygodnych (dobrze oddających rzeczywistość) modeli

symulacyjnych oraz optymalizacja ich algorytmów obliczeniowych.

Podjęta przez Doktoranta tematyka badawcza, wymagająca zaawansowanego aparatu matematycznego i modeli numerycznych, wpisuje się więc dobrze we współczesne trendy badań nad możliwościami wykorzystania chwilowych, niestacjonarnych i falowych zjawisk w przepływach, efektów termo-akustycznych w procesach generacji energii i chłodzenia oraz poszukiwania wiarygodnych i efektywnych metod ich modelowania, wspomagających projektowanie i optymalizację urządzeń termo-akustycznych. Wpisuje się też w nowatorski kierunek badań nad wykorzystaniem efektów termo-akustycznych i aero-akustycznych, prowadzonych od lat w macierzystym instytucie Kandydata – Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej.

Zatem z pełnym przekonaniem stwierdzam, że Doktorant podjął ambitne i trudne badania, których tematyka ma charakter dysertacyjny, a tytuł rozprawy jest zgodny z jej treścią.

II. Zakres, walory naukowe i oryginalność badań, ocena metod badawczych uzyskanych wyników.

W opiniowanej rozprawie doktorskiej, w 6-ciu rozdziałach na 150 stronach, mgr inż. Krzysztof Rogoziński przedstawił wyniki własnych modeli symulacji komputerowej procesu wymiany ciepła, w niestacjonarnym polu przepływu, generowanym przez propagację fali akustycznej, powstającej w specjalnie ukształtowanej komorze rezonansowej. Zakres opisanych w rozprawie badań obejmuje budowę jedno dwu i trójwymiarowych modeli zjawisk cieplno-przepływowych wywołanych stojącą falą akustyczną oraz ich zastosowań w analizie pracy silnika i chłodziarki termo-akustycznej.

W Rozdziale 1, po krótkim omówieniu historii badań nad efektem termo-akustycznym, od ich początków sięgających osiemnastego wieku do lat siedemdziesiątych dwudziestego stulecia, oraz elementów budowy silnika i chłodziarki fali stojącej, Doktorant sformułował cel i zakres swoich badań, jako: „porównanie najczęściej wykorzystywanych podejść do modelowania urządzeń termoakustycznych i zjawisk w nich zachodzących wraz ze wskazaniem różnic, ograniczeń i trudności poszczególnych metod". Dla osiągnięcia tego celu zaplanował: analizę pracy silnika termo-akustycznego przy pomocy uproszczonego jednowymiarowego modelu analitycznego; zastosowanie dwuwymiarowego modelu symulacji komputerowej pojedynczego i podwójnego silnika oraz trójwymiarowego modelu numerycznego chłodziarki termoelektrycznej. W poszukiwaniu optymalnego narzędzia analizy ilościowej procesu konwersji ciepła w energię fali akustycznej i procesu odwrotnego, mgr inż. K. Rogoziński zapowiedział wykorzystanie powszechnie stosowanego programu DeltaEC, opartego na jednowymiarowym modelu Rotta i komercyjnych kodów numerycznej mechaniki płynów (CFD) oraz przeprowadzenie studiów ich funkcjonalności w aplikacji do złożonych zjawisk przenoszenia fali akustycznej w płynie sprzężonych z wymianą ciepła.

Wydaje się, że sformułowanie celu i zakresu pracy nie zostało do końca przemyślane. Doktorant kładzie w nim nacisk na analizę zalet i wad dostępnych kodów symulacyjnych i na stworzenie, na tej podstawie, zbioru wskazówek dla potencjalnego użytkownika planującego wykorzystanie tych kodów w modelowaniu zagadnień termo-akustyki. To zadanie ważne, ale nie najistotniejsze w rozprawie dysertacyjnej z zakresu badań podstawowych. W takich badaniach chodzi głównie o lepsze poznanie fizyki słabo rozpoznanych procesów i/lub doskonalenie metod badawczych. Te oba elementy znajdują odzwierciedlenie w recenzowanej pracy doktorskiej, nie zostały jednak uznane za cel najważniejszy. Dziwi też, że tak istotna część dysertacji, jak opis celu i zakresu badań, została umieszczona jako podrozdział w części zatytułowanej „Wprowadzenie".

W Rozdziale 2 Kandydat przybliża potencjalnemu czytelnikowi aktualny stan wiedzy z zakresu matematycznego opisu zjawisk termo-akustycznych. Wprowadza podstawowe pojęcia charakterystyczne dla modelowania tych zjawisk, w tym w szczególności takie jak amplituda oscylacyjnego ruchu cząstek swobodnych gazu, głębokości penetracji termicznej i lepkościowej, zależnych od właściwości gazu i częstotliwości fali dźwiękowej; impedancja i moc akustyczna, i inne. Wychodząc z ogólnych postaci równań zachowania pędu, masy i energii oraz zakładając jednokierunkową propagację fali akustycznej i związane z tym rozkłady ciśnienia, temperatury, gęstości i entropii gazu (będące sumą ich wielkości średniej i sinusoidalnych oscylacji w czasie), przedstawia uproszczoną akustyczną formę tych równań, znaną w literaturze jako analityczny model Rotta, pokazuje ich rozwiązania analityczne.

W Rozdziale 3 Doktorant zaprezentował obszerny, obejmujący ponad 110 pozycji, przegląd dostępnych w literaturze publikacji poświęconych badaniom eksperymentalnym oraz modelowaniu analitycznemu i symulacjom numerycznym procesów termo-akustycznych. Rozwiązania analityczne wykorzystywane są głównie w wielokryterialnych studiach optymalizacyjnych silników i chłodziarek, opartych na konwersji energii w płynie z pulsacjami ciśnienia, gęstości i temperatury. Badano w nich wpływ rodzaju gazu, długości, położenia i porowatości stosu, gradientu temperatury oraz liczby stopni urządzeń na współczynnik wydajności chłodziarki, sprawność silnika, strumień odbieranego ciepła, czy minimalizację strat akustycznych. Wykorzystano różne algorytmy wielokryterialnych optymalizacji (sieci neuronowe) oraz program DeltaEC. Obszerne studia eksperymentalne dotyczyły głównie weryfikacji, na etapie projektowania, różnych konstrukcji urządzeń termo-akustycznych, w poszukiwaniu najbardziej optymalnych rozwiązań poprzez analizę wpływu geometrii stosu, wymiany ciepła na powierzchniach wymienników, rodzaju użytego gazu, długości rezonatora, średniego ciśnienia gazu, mocy doprowadzonej do gorącego końca stosu, etc., na wielkość mocy akustycznej, współczynnik, wydajności chłodziarki, sprawność silnika, odzysk energii z silnika, sprawność cieplno-elektryczną silnika z generatorem i inne kluczowe parametry pracy urządzeń termo-akustycznych fali stojącej i biegnącej. Z punktu widzenia przedstawionych w dysertacji badań, najistotniejsza jest część przeglądu literaturowego dotycząca prac z zakresu modelowania komputerowego zjawisk i urządzeń termo-akustycznych. Doktorant dokonał tu analizy 27 artkułów z ostatnich 13 lat. Współczesne możliwości sprzętowe i rozwinięte metody symulacyjne pozwalają na zaawansowane obliczenia, szerokie analizy parametryczne służące lepszemu poznaniu złożonych niestacjonarnych zjawisk cieplno-przepływowych, lokalnych struktur przepływów laminarnych i turbulentnych. W symulacjach komputerowych podstawowym problemem jest modelowanie poprawnego sprzężenia pomiędzy polem akustycznym i przepływowym, gdzie wymagana jest bardzo gęsta siatka przestrzenna i czasowa. W modelowaniu numerycznym wykorzystuje się metody obliczeniowej mechaniki płynów oparte na uśrednionych równaniach Reynoldsa (RANS) z wybranymi modelami turbulencji, metodę przestrzennej filtracji wirów turbulentnych (LES) czy siatek Boltzmana. W przytoczonych pozycjach literaturowych badano wymianę ciepła podczas przepływu gazu przez kanał stosu płytowego, różne warianty geometrii, wlotowe i wylotowe odcinki stosu, wpływ grawitacji i wymiany ciepła przez promieniowanie, zjawisko turbulencji podczas oscylacyjnego przepływu gazu przez płytowy wymiennik urządzenia termo-akustycznego, formowanie się zawirowań na końcach stosu, w urządzeniach fali stojącej i biegnącej.

Niestety, mimo zapowiedzi „dokonania krytycznego przeglądu literatury” (rozdział 1.3) Kandydat, jedynie przedstawił, a nie przeanalizował obecny stanu wiedzy. Rozdział 3 jest więc zbiorowiskiem szczegółów i “rupieciarnią” faktograficzną. Krytyczny przegląd dotychczasowych prac prowadzi się pod kątem wskazania braków i niedostatków, by otworzyć przestrzeń do własnych badań i uzasadnić ich potrzebę.

W Rozdziale 4 Doktorant dokonuje analizy dokładności i przydatności kodu obliczeniowego DeltaEC, powszechnie wykorzystywanego w projektowaniu i optymalizacji pracy układów akustycznych i termo-akustycznych. Program ten, opracowany w Los Alamos National Laboratory, oparty jest na numerycznym całkowaniu modelu Rotta dla jednowymiarowego równania falowego w złożonych konfiguracjach geometrycznych, w tym kompletnych silników i chłodziarek termo-akustycznych. Wykorzystując dostępne w DeltaEC moduły obliczeniowe, Pan mgr inż. K. Rogoziński zbudował model silnika fali stojącej składający się z rezonatora otwartego na jednym końcu, dwóch wymienników płytowych, stosu płytowego, i kanałów łączących wymienniki z zamkniętym i otwartym końcem rezonatora. Po wnikliwej analizie wpływu czynnika roboczego i średniego ciśnienia na moc silnika termo-akustycznego, wskazującą na gazy o niskiej liczbie atomowej (duża prędkość dźwięku, wysokie wartości przewodności cieplnej i głębokości penetracji cieplnej) do badań wybrano hel o ciśnieniu 100kPa. Wyniki uzyskane z kodu DeltaEC, dla dwóch geometrii silnika (o długościach 250mm i 500mm) zostały przedstawione w formie wykresów zmian składowej rzeczywistej ciśnienia i składowej urojonej prędkości wzdłuż kierunku rozchodzenia się fali dla dwóch długości silnika. Ich dokładność została zweryfikowana przez porównania z rozwiązaniem analitycznym równań różniczkowych pierwszego rzędu, zaproponowanych przez GW. Swifta („Thermoacoustics: a unifying perspective for some engines and refrigerators.", New York: American Institute of Physics; 2002.); opisujących zmiany ciśnienia i strumienia objętościowego gazu przy założonym stałym lub zerowym gradiencie temperatury, oddzielnie dla kanałów, stosu i wymienników. Analityczna forma rozwiązania tych równań, oparta na analizie wartości własnych macierzy układu równań różniczkowych, została opublikowana w artykule Nowak I, Rulik S, et.al. "Analytical and numerical approach in the simple modelling of thermoacoustic engines. Int J Heat Mass Transfer 2014;77:369-76. Bardzo dobra zgodność wyników uzyskanych z programu DeltaEC i z rozwiązania analitycznego układu równań różniczkowych potwierdziła użyteczność pierwszego i poprawność, zaproponowanego przez Doktoranta, sekwencyjnego algorytmu rozwiązywania analitycznego, gdzie wyniki obliczeń uzyskane na końcu kolejnego segmentu silnika były warunkiem brzegowym dla następnego.

W rozdziale tym Kandydat bardzo wiele miejsca poświęcił opisowi dostępnych modułów obliczeniowych w programie DeltaEC, również tych z których nie korzystał w omówionych powyżej obliczeniach, oraz cennym dla potencjalnego użytkownika uwagom praktycznym dotyczącym ograniczeń kodu, trudności w jego eksploatacji, możliwości ich obejścia.

Rozdział 5 jest najważniejszą częścią rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. K. Rogozińskiego.

W pierwszej kolejności, Doktorant, budując dwuwymiarowy model symulacji stosu płytowego chłodziarki termo-akustycznej i wykorzystując komercyjny kod CFD (niestety nie podano jaki), dokonał analizy wpływu parametrów geometrycznych, gradientów temperatury i ciśnienia oraz częstotliwości fali akustycznej na intensywność wymiany ciepła w urządzeniu. Model obliczeniowy ograniczono do stosu i fragmentów rezonatora po obu jego stronach, zaś wpływ wymienników ciepła symulowano dynamicznymi warunkami brzegowymi. Parametry stosu zostały tak dobrane, że powtarzalność przepływu w poszczególnych kanałach pozwoliła na ograniczenie modelu do pojedynczego kanału z odcinkiem wlotowym i wylotowym. Zamiast modelowania wymienników ciepła przyjęto liniowy rozkład temperatury w stosie. Jako gaz roboczy wykorzystano hel o znanej funkcyjnej zależności lepkości i przewodności cieplnej od temperatury. Ze względu na duże chwilowe prędkości gazu i zmianę reżimu przepływu z laminarnego na turbulentny w ramach pojedynczego okresu oscylacji gazu, zastosowano dostępny w kodzie model turbulencji k-ω SST. Zaproponowano funkcję rozkładu ciśnienia w czasie i wzdłuż analizowanego fragmentu urządzenia, którą wykorzystano do

zdefiniowania warunków brzegowych na gorącym i zimnym końcu. Doktorant przeprowadził analizę wpływu gęstości siatki na uzyskiwane wyniki obliczeń wybierając taką, której dalsze zagęszczanie nie daje widocznej poprawy dokładności. Tak zweryfikowany model numeryczny zastosował do zbadania 71 różnych przypadków. Ich szczegółowa analiza pozwoliła Kandydatowi na sformułowanie następujących, ważnych poznawczo, wniosków: (1) – maksymalny strumień ciepła jest osiągany, gdy głębokość penetracji termicznej jest porównywalna z promieniem hydraulicznym stosu; (2) - wzrost gradientu temperatury w stosie zwiększa gęstość uśrednionego w cyklu strumienia ciepła oraz częstotliwość fali stojącej, przy której uzyskiwany jest maksymalny strumień ciepła; (3) - model 2D pozwala zaobserwować zjawisko formowania się wiru w rejonie wylotu stosu, które zanikając pozostawia obszar obniżonej prędkości gazu.

W rozdziale 5.2 Doktorant przedstawił dwuwymiarowy nieustalony model symulacji numerycznej silnika termo-akustycznego fali stojącej i wykorzystał go do analizy roli lokalnych efektów w przepływie wywołanych gwałtownymi zmianami pola przepływu, turbulencją ruchu oscylującego gazu oraz brakiem symetrii przepływu w sąsiednich kanałach stosu. Wymiary silnika były zdeterminowane przez założoną częstotliwość 600Hz; rozważono 3 warianty obszaru obliczeniowego stosu płytowego badając wpływ przyjętych uproszczeń dot. przepływu w stosie na parametry pracy silnika. W pierwszym modelu zakładając symetryczność przepływu w każdym kanale stosu, analizowano jedynie połowę pojedynczego kanału; w drugim odwzorowano dwa pełne kanały dopuszczając możliwość zróżnicowanego przepływu w każdym z nich; w trzecim rozszerzono obszar obliczeń do trzech sąsiednich kanałów. W tworzeniu siatki dyskretyzacji programem Ansys ICEM CFD, zwrócono szczególna uwagę na dyskretyzację w rejonie wylotów kanałów stosów oraz w okolicach ścianek, gdzie tworzy się warstwa przyścienna. Analizując uzyskane z symulacji numerycznej rozkłady ciśnienia statycznego na wylocie z urządzenia zaobserwowano różnice amplitudy ciśnienia dla trzech wariantów modelu stosu, wynikające z braku lub nadmiernego oddziaływania sąsiednich kanałów. Założenie symetrii osiowej kanału stosu uniemożliwia formowanie zawirowań na ich końcach. Otrzymane z modelu numerycznego z trzema kanałami pole temperatury i rozkłady prędkości w poszczególnych fazach pojedynczej oscylacji gazu pokazują lokalne fluktuacje temperatury i prędkości w obszarze wylotu ze stosu wywołane gwałtowną zmianą przekroju i ostrymi krawędziami płyt stosu oraz zwiększoną lokalną turbulencją przepływu. Doktorant porównał wyniki symulacji numerycznej z jedno-wymiarowym modelem analitycznym stwierdzając niewielkie różnice w przebiegach ciśnienia statycznego w pojedynczej oscylacji gazu i wyraźne rozbieżności w rozkładach prędkości w pobliżu wylotu stosu w obu modelach. Wynikają one z faktu, że model jednowymiarowy nie rejestruje zmian przekroju przepływu i zjawisk nim wywołanych.

W kolejnej części rozdziału 5 Kandydat przedstawił oryginalną koncepcję podwójnego silnika termo-akustycznego, gdzie zimne końce dwóch identycznych silników fali stojącej są połączone poprzez ruchomy tłok, umożliwiając konwersję fal akustycznych na energię mechaniczną i zapewniając stabilną pracę urządzenia. Zbudował własny dwuwymiarowy model obliczeniowy z wykorzystaniem komercyjnego kodu numerycznej mechaniki płynów (Ansys Fluent); przeprowadził symulację rozruchu i ustalonej pracy silnika. Ruch tłoka i jego odziaływanie na pracę obu części urządzenia symulował w specjalnie przygotowanym skrypcie UDF i przez zastosowanie dynamicznie zmieniającej się siatki dyskretyzacji. Skrypt, na podstawie bilansu sił ciśnienia i bezwładności działających na tłok na końcu kolejnego kroku czasowego, wyznaczał kierunek ruchu tłoka, jego przyśpieszenie i chwilową prędkość jako warunek brzegowy po obu stronach tłoka. W celu zainicjowania przesunięcia fazowego w początkowym etapie symulacji pracy silnika, Doktorant zaproponował zastosowanie wstępnego wymuszenia ruchu tłoka przez zadanie stałej prędkości w pierwszych krokach

czasowych. Symulacje pracy silnika przeprowadził dla trzech różnych mas tłoka analizując ich wpływ na chwilowe położenie, amplitudę i przebieg oscylacji tłoka, pole prędkości podczas maksymalnego wychylenia tłoka oraz rozkłady temperatury wzdłuż długości silnika. Zwiększenie masy tłoka, i tym samym jego bezwładności, zwiększa amplitudę jego ruchu, wydłuża czas potrzebny do uzyskania ustalonej pracy silnika, obniża częstotliwość pracy urządzenia. Tendencja ta ma charakter nieliniowy, przyrost amplitudy i spadek częstotliwości są coraz mniejsze wraz ze zwiększaniem masy tłoka. Oznacza to, że składowa ruchu wynikająca z bezwładności nie jest dominująca. Efekt sprężania gazu podczas maksymalnego wychylenia tłoka wywołuje chwilowy wzrost temperatury gazu i dyssypację ciepła po gorącej stronie stosu. Może to spowodować ograniczenie mocy urządzenia, co powinno być wzięte pod uwagę na etapie projektowania silnika.

Ostatnia część rozdziału 5 dysertacji poświęcona jest prezentacji trójwymiarowego (3D) modelu chłodziarki termo-akustycznej Hoflera, o wymiarach odpowiadających częstości fali stojącej wynoszącej 600Hz, zbudowanego przez Doktoranta w środowisku komercyjnego kodu Ansys CFX. W obliczeniach przyjęto stos o strukturze perforowanych płyt z kordieritu o kwadratowym przekroju kanałów, co wymagało budowy modelu 3D. Model ten pozwolił też na sformułowanie temperaturowych warunków brzegowych bezpośrednio na zewnętrznej powierzchni wymiennika. Dla możliwie wiernego odwzorowania pomijalnej wymiany ciepła przez membranę głośnika oraz uwzględnienia zmian objętości w trakcie jej oscylacji, Kandydat zaproponował zastosowanie ruchomego warunku brzegowego wraz z dynamiczną zmianą siatki w pobliżu membrany. Podobnie jak w przypadku silnika, zastosował dwuetapowy algorytm obliczeń, tj. rozwiązał najpierw zagadnienie ustalone, a następnie wykorzystał je w sformułowaniu warunków brzegowych w analizie nieustalonej. W celu określenia wpływu wielkości amplitudy drgań membrany głośnika na rozkład ciśnienia statycznego i prędkości gazu wzdłuż długości chłodziarki w cyklu pojedynczej oscylacji oraz na wielkość współczynnika wydajności chłodziarki (COP), a także różnicy temperatur między powierzchniami obu wymienników, przeprowadził obliczenia dla 5-ciu różnych wielkości stosunku amplitudy ciśnienia do jego średniej wartości (DR). Wyniki tych analiz pokazały wzrastającą wraz z DR asymetrię amplitudy ciśnienia, wyraźny wzrost prędkości w obszarze stosu, spadek COP ze wzrostem DR, monotoniczny po stronie gorącej i niemonotoniczny po stronie zimnej wzrost temperatur wymiennika oraz nieliniowy wzrost ich różnicy. Dla wyższych DR rośnie ciśnienie i temperatura gazu, co powinno być wzięte pod uwagę w optymalizacji konstrukcji chłodziarki termo-elektrycznej.

Wnikliwa lektura tej najważniejszej części dysertacji (Rozdział 5) pozwala wskazać następujące ważne, oryginalne, osiągnięcia Doktoranta w zakresie poznania złożonej fizyki zjawisk, doskonalenia aparatu badawczego i wniosków o charakterze praktycznym:

- przeprowadzenie dwu- i trój-wymiarowej analizy numerycznej zjawisk cieplno-przepływowych w kanalikach stosu, trudnych do badań eksperymentalnych i nie rejestrowanych przez powszechnie stosowany jednowymiarowy model liniowy i oparty na nim kod DeltaEC;
- opisanie zjawiska wzajemnego odziaływania strug gazu przepływających przez kanały stosu oraz lokalnych zawirowań na jego końcach;
- przeprowadzenie analizy wpływu stosunku promienia hydraulicznego do grubości warstwy penetracji termicznej i wskazanie jego optymalnej wartości z punktu widzenia wymiany ciepła w stosie;
- autorska propozycja zastąpienia zachowania rezonatora dynamicznymi warunkami brzegowymi w modelu numerycznym;

- opracowanie oryginalnej koncepcji podwójnego silnika termo-akustycznego i jego dwuwymiarowego modelu obliczeniowego z wykorzystaniem komercyjnego kodu numerycznej mechaniki płynów, w połączeniu z autorskim modelem ruchu tłoka i inicjacji pracy silnika oraz przeprowadzenie symulacji rozruchu i ustalonej pracy urządzenia.

Niestety największym niedostatkiem badań doktoranta jest brak pełnej analizy dotyczącej uwiarygodnienia wyników modeli symulacyjnych. Jest to szczególnie istotne, gdy wprowadzane są własne modyfikacje w reprezentacji warunków brzegowych i algorytmów obliczeniowych. Analiza taka obejmuje dwie procedury: weryfikacji i walidacji. W pierwszej dowodzi się, że model dyskretny daje zadawalającą, niezależną od siatki podziału, dokładność. W modelowaniu dyskretnym złożonych zagadnień termo-akustyki jest to możliwe przez analizę czułości modelu na gęstość siatki numerycznej. Doktorant świadom tego problemu, informuje, nie pokazując szczegółów, że przeprowadził analizę wpływu gęstości siatki na uzyskiwane wyniki obliczeń wymiany ciepła w stosie płytowym (rozdział 5.1) i w 3D modelu chłodziarki (rozdział 5.4). Analizy takie prowadzą jedynie do wniosku, że model matematyczny został rozwiązany numerycznie z akceptowalną dokładnością. Nie mówią nic o poprawności odwzorowania rzeczywistości. Taką odpowiedź daje porównanie obliczeń z wynikami eksperymentów; np. z obrazami pola prędkości uzyskanymi techniką PIV, opublikowanymi w cytowanej pozycji [56] wykazu literatury. Niestety, takich porównań w rozprawie nie pokazano.

Ostatni rozdział pracy poświęcony jest podsumowaniom, wnioskom i planom dalszych prac. Doktorant podsumował tutaj zakres przeprowadzonych badań, zebrał najważniejsze wnioski zaprezentowane wcześniej w kolejnych rozdziałach pracy. Można tu wyróżnić ich dwie grupy: do pierwszej zaliczyć można wnioski dotyczące złożonej fizyki analizowanych procesów i ich wpływu na pracę urządzeń termo-akustycznych oraz propozycje Doktoranta w zakresie doskonalenia metod i algorytmów symulacji komputerowej służącej tym badaniom. Drugą grupę stanowią cenne, detaliczne rady i wskazówki Kandydata, dotyczące implementacji dostępnych kodów do numerycznej analizy urządzeń termoelektrycznych, kierowane jak sam Autor pisze do „potencjalnego czytelnika, który chciałby przeprowadzić zbliżone tematycznie symulacje".

Na podstawie dotychczas zdobytej wiedzy i doświadczenia Doktorant formułuje obszerne plany dalszych badań jako: symulacje numeryczne urządzeń termo-akustycznych ze stosami i wymiennikami ciepła o różnych, także zmiennych z długością, geometriach kanałów oraz ze stosem mokrym; analizę strat ciepła na powierzchni styku wymiennika i stosu; poszerzenie symulacji kompletnych urządzeń termo-akustycznych w większej skali geometrycznej; modelowanie termo-akustycznego zespołu chłodziarka-silnik, czy urządzeń termo-akustycznych z falą biegnącą.

Podsumowując ocenę pracy, uważam że opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Rogozińskiego zawiera wyniki oryginalnych badań teoretycznych, wnoszących widoczny wkład w rozwój modeli symulacyjnych termo-akustyki. Moim zdaniem, Doktorant udowodnił tezę, że powszechnie dziś stosowane kody numerycznej mechaniki płynów pozwalają na dokładniejszą (w porównaniu do powszechnie stosowanego w optymalizacji liniowego modelu Rotta) symulację procesów wymiany ciepła i pędu w niestacjonarnym polu przepływu, generowanym przez propagację fali akustycznej. Umożliwiają one uwzględnienie złożonych geometrii stosu i wymienników ciepła, lepkości płynu, nieliniowości, turbulencji i lokalnych zawirowań oraz dokładniejszą analizę wpływu tych efektów na pracę silników i chłodziarek termo-akustycznych. Symulacja wielowymiarowych i nieustalonych przepływów sprzężonych z wymianą ciepła wymaga jednak znacznych czasów obliczeń.

W celu ich skrócenia Kandydat zaproponował własne rozwiązania dotyczące wielkości analizowanego obszaru, dynamicznych warunków brzegowych i algorytmów obliczeniowych.

III. Uwagi dotyczące redakcji pracy.

Pozytywnie należy ocenić staranną redakcję rozprawy, jej język (niewiele literówek) oraz szatę graficzną (czytelne kolorowe rysunki). W tak obszernej pracy Autor nie ustrzegł się jednak niedociągnięć i pomyłek, utrudniających jej lekturę. Ważniejsze z nich przedstawiono poniżej.

1. W rozdziałach 2.2 i dalszych zaprezentowano szereg wzorów, których większość nie jest autorstwa Rotta czy Doktoranta, nie zamieszczono jednak odwołań do ich źródeł; dotyczy to też wzorów (4.10)-(4.13).
2. Autor powszechnie używa słownictwa charakterystycznego dla komercyjnych kodów obliczeniowych mechaniki płynów, co nie ułatwia czytania niezaznajomionym z programem. Dotyczy to np. warunków brzegowych, które przecież wynikają z fizyki analizowanych zjawisk i układów, mogą więc być opisane w sposób przejrzysty, zwłaszcza gdy pojawiają się w tekście po raz pierwszy.
3. Równanie (2.13) jest powtórzeniem równania (2.9) na sąsiadujących ze sobą stronach.
4. Stosowane są różne oznaczenia dla tych samych wielkości: k - jest w pracy oznaczeniem współczynnika przewodzenia ciepła, ale we wzorach (2.33) i(2.34) pojawia się jako liczba falowa; we wzorach (4.10) – (4.13) zmieniono oznaczenie prędkości dźwięku z “a” na “c”; a także ‘gama” na “kappa”; co oznacza “epsilon-s”?
5. Z jakich zależności bądź źródła bibliograficznego pochodzą rys. 4.1 i 4.2?
6. Zbyt skromne i niewystarczające podpisy pod rysunkami: rys. 4.2 ilustruje zależność liczby Prandtla od temperatury i składu molowego mieszaniny gazowej, co powinno być zapisane explicite pod rysunkiem; podobny komentarz dotyczy rys.4.4.
7. W kilku miejscach w tekście, np. przy opisie wzoru (5.4), pomylono liniowy gradient z liniową zmianą temperatury wzdłuż stosu; przy liniowych zmianach temperatury jej gradient jest stały.
8. Brak skali kolorów na rys. 5.7; rys. 5.8; rys.5.13.
9. Błędne podpisy pod rys. 5.18 i 5.20 – pokazują one zmiany położenia tłoka a nie ciśnienia.
10. Od 1997 roku, kiedy ukazała się publikacja AIAA Committee on Standards for CFD pt.: „Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations” dokonano unifikacji pojęć dot. procedur uwiarygodnienia wyników symulacji komputerowej. Procedura *weryfikacji* dotyczy porównania dokładności dwóch różnych numerycznych i/bądź analitycznych rozwiązań, zaś procedura *walidacji* to porówanie wyników obliczeń z eksperymentem. Dlatego słowo “walidacja”, pojawiające się na str.48, trzeci wiersz od góry oraz w pierwszym wierszu od góry na str. 87, powinno być zastapione przez słowo “weryfikacja.

III. Wniosek końcowy.

Opiniowana rozprawa doktorska ma walory naukowe i dysertacyjne. Jej tematyka została zainspirowana potrzebą doskonalenia modeli komputerowej symulacji złożonych zjawisk termo-akustycznych, w celu stworzenia efektywnego i wiarygodnego narzędzia obliczeniowego wspomagającego projektowanie i optymalizacje konstrukcji urządzeń opartych na tych zjawiskach. Realizując ambitny i obszerny program badawczy, budując

własne modele symulacyjne, Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego rozwiązania trudnego zagadnienia naukowego, szeroką i rzetelną wiedzą z zakresu akustyki, przepływów płynów ściśliwych, wymiany ciepła, teorii i metod numerycznych mechaniki płynów, dużą umiejętnością wykorzystania możliwości obliczeniowych komercyjnych kodów ANSYS Fluent, i ICEM CFD oraz Delta EC. Na podkreślenie zasługuje fakt, że wyniki Jego prac, dotyczących prostego i podwójnego silnika termo-akustycznego, zostały opublikowane w dwóch współautorskich artykułach, zamieszczonych w prestiżowych czasopismach z listy JCR (*Energy,* IF>7 oraz *Energy Conversion and management*, IF>9).

Większość moich uwag przedstawionych w niniejszej recenzji ma charakter dyskusyjny, inne dotyczą niewielkich niedociągnięć w redakcji pracy. Nie zmieniają one mojej pozytywnej oceny zrealizowanych badań i poziomu opiniowanej pracy.

Dlatego z przekonaniem stwierdzam, że rozprawa dysertacyjna mgr inż. Krzysztofa Rogozińskiego spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez *Ustawę o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki* z dnia 14 marca 2003 roku (Dz.U. 2003 Nr 65 poz. 595) i wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o jej dopuszczenie do publicznej obrony.