

Wydział Energetyki i Paliw

KATEDRA TECHNOLOGII PALIW

Kraków, dn. 28.10.2021 r.

dr hab. inż. Rafał Buczyński, prof. AGH  
Katedra Technologii Paliw  
Wydział Energetyki i Paliw  
Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
30-055 Kraków, al. Mickiewicza 30

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Krzysztofa Rogozińskiego nt. *„Symulacja numeryczna urządzeń termoakustycznych z falą stojącą”*.

### Podstawa oceny

Recenzję pracy doktorskiej wykonałem zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 16.09.2021 roku.

Przedstawiona dysertacja Pana mgr inż. Krzysztofa Rogozińskiego została wykonana w obszarze nauk technicznych, dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych. Wybrana przez doktoranta dyscyplina naukowa to inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Poruszona w pracy tematyka związana jest z opisem matematycznym i modelowaniem numerycznym zjawisk zachodzących w termoakustycznych silnikach i chłodziarkach. Można więc stwierdzić, że wybór dyscypliny jest bezsprzecznie uzasadniony.

## Struktura/konstrukcja rozprawy

Praca doktorska zawiera się w 150 stronach formatu A4. 129 stron to część zasadnicza bogata w ilustracje i równania, 10 stron to: strona tytułowa, „recenzenci i podziękowania”, spis treści i symboli. Otrzymany tekst zakończony jest 11-a stronami bibliografii (132 pozycje), spisem rysunków, spisem tablic, streszczeniem i abstraktem.

Większość umieszczonych w bibliografii (strony 129-142) artykułów, opublikowano po 2010 roku. Kilka publikacji natomiast dotyczy początku termoakustyki (XIX w.). Warto w tym miejscu wspomnieć, że wśród cytowanych pozycji znajdują się także 2-e prace doktoranta z 2017 i 2020 roku. Opublikowane zostały w dobrych czasopismach naukowych: *Energy* i *Energy Conversion and Management* (pozycja 130 i 131).

## Zawartość części zasadniczej

Praca „*Symulacja numeryczna urządzeń termoakustycznych z falą stojącą*” zawiera 6 rozdziałów.

W rozdziale pierwszym (*Wprowadzenie*) doktorant przedstawia początki historii badań nad zjawiskiem termoakustycznym, klasyfikację urządzeń opartych na zjawisku termoakustycznym oraz cele i zakres pracy doktorskiej.

Rozdział drugi zawiera opis (również matematyczny) najważniejszych pojęć z teorii termoakustyki:

- wielkości charakteryzujące fale i zjawisko termoakustyczne,
- równania bilansu masy, pędu, energii,
- równanie oraz parametry stanu.

Rozdział trzeci to *Przegląd literatury*. Przegląd literatury dotyczy trzech zagadnień:

- modele analityczne,
- badania eksperymentalne,
- symulacje CFD.



W rozdziale czwartym *Modelowanie jednowymiarowe* oraz piątym *Wyniki modelowania CFD* doktorant przedstawia rezultaty swoich obliczeń analitycznych i symulacji komputerowych dotyczących zachowania fali stojącej. Symulacje komputerowe dotyczą głównie silników i chłodziarek termoakustycznych. Autor przeprowadził swoje obliczenia w takich programach jak: *DeltaEC*, *ANSYS CFX* i *ANSYS Fluent*. Wyniki tych analiz porównuje z wcześniej wspomnianymi rozwiązaniami analitycznymi. Część pracy poświęca na dyskusje wyboru odpowiednich modeli, warunków brzegowych, kroku czasowego w analizie niestacjonarnej, czy też sposobu dyskretyzacji dla właściwego i dokładnego opisu problemów termoakustycznych. Doktorant, porównując poszczególne przypadki bądź modele, wykorzystuje najczęściej takie wielkości jak: parametry stanu: ciśnienie, temperaturę, ale również strumień ciepła, wektory prędkości czy częstotliwość drgań. Warto również wspomnieć, że powstałe modele posiadały różne wymiary (1-D, 2-D i 3-D).

Rozdział szósty zatytułowany *Zakończenie* zawiera trzy podpunkty:

- podsumowanie
- wnioski
- plany dalszych badań

Doktorant opisuje w tym miejscu szereg spostrzeżeń, uwag i wniosków dotyczących wykorzystywanego w dysertacji oprogramowania jak również sposobu modelowania zjawiska termoakustycznego.

Autor analizując pracę w pakiecie DeltaEC zauważa, że wielką wadą programu jest brak możliwości dodawania własnych i ingerencji w istniejące moduły obliczeniowe.

Symulacje numeryczne pokazują, że wymiana ciepła w stosach i wymiennikach ciepła jest największa, gdy grubości warstwy penetracji termicznej jest zbliżony do promienia hydraulicznego kanału. Doktorant wskazuje także na fakt, że wzrost amplitudy ciśnienia fali stojącej intensyfikuje wymianę ciepła.

Analizy możliwości uproszczenia stosu wewnątrz pojedynczego silnika termoakustycznego wykazały, że trzy jest minimalną liczbą kanałów, które muszą zostać ujęte w modelu numerycznym. Tak zbudowana geometria



pozwała uwzględnić występowanie najważniejszych zawirowań i interakcji pomiędzy poszczególnymi kanałami stosu/wymiennika ciepła. Ponadto doktorant zauważył, że warunek brzegowy translacji „daje” lepsze wyniki w porównaniu do symetrii.

Autor wymienia również spostrzeżenia dotyczące modelowania pracy silników podwójnych (wykorzystujących tłoki). Czas obliczeń, bezwładność konstrukcji oraz amplituda ruchu falowego wzrastają przy zwiększeniu masy tłoka. Spadek częstotliwości wynikający ze wzrostu masy tłoka może osiągnąć wartość graniczną, przy której praca silnika jest już niemożliwa.

Analiza COP dla chłodziarki pokazuje, że dla  $DR=0.2$  uzyskujemy najwyższą wydajność urządzenia.

Czas obliczeń za pomocą oprogramowania DeltaEC jest znacznie krótszy (kilka sekund) w porównaniu do bardziej skomplikowanych modeli budowanych w ANSYS Fluent i ANSYS CFX (kilka tygodni). DeltaEC umożliwia szybkie obliczenia stacjonarne. Symulacje nieustalone możliwe są jedynie w pakiecie ANSYS Fluent i ANSYS CFX. Wynika z tego, że uproszczone modele 1D sprawdzają się w wymiarze do wstępnej analizy. Zaawansowane modele 2-D i 3-D nadają się natomiast, do dopracowania analizowanego problemu.

W zależności od celu przeprowadzanych analiz oraz stabilności obliczeń w modelach niestacjonarnych 2-D i 3-D można zastosować dwa odmienne warunki początkowe:

- opisane równaniem oscylacje ciśnienia statycznego,
- wykorzystanie ruchomego warunku brzegowego.

Autor wymienia także swoje plany związane z tematyką termoakustyki. Najważniejsze z nich to:

- badanie wymiany ciepła w stosach,
- badanie rozmiaru kanałów stosu,
- badanie przepływu ciepła na styku wymiennika stosu,
- analiza pracy stosu mokrego,
- analiza zespołów urządzeń (np. praca silnika i chłodziarki termo akustycznej),



- badanie zachowania się fali biegnącej.

## **Opinia o pracy**

Praca doktorska pana mgr inż. Krzysztofa Rogozińskiego porusza ciekawą i trudną, z punktu widzenia modelowania numerycznego, tematykę. Doktorant podjął się teoretyczno-obliczeniowej analizy pracy urządzeń termoakustycznych wykorzystujących falę stojącą. Przeprowadzone, za pomocą kilku programów (DeltaEC, CFX, Fluent), symulacje komputerowe pozwoliły opracować metodologię modelowania zjawiska termoakustycznego. Bardzo pomocne dla badaczy zajmujących się podobną tematyką są przede wszystkim informacje o doborze odpowiednich modeli (np. turbulencji) sposobie dyskretyzacji czy warunkach brzegowych i początkowych.

Modele, które powstały w recenzowanej pracy, jak również przyszłe modele opracowane w oparciu o cenne informacje zawarte w tej dysertacji pozwolą lepiej zrozumieć i opisać działanie urządzeń termoakustycznych oraz zoptymalizować silniki, chłodziarki, czy też pompy ciepła pracujące w oparciu o zjawisko termoakustyczne.

Warto tutaj wspomnieć, że opracowanie metodologii modelowania numerycznego zjawisk termoakustycznych wymagało od doktoranta opanowania sporej wiedzy nt. modelowania numerycznego oraz teorii zjawiska termoakustycznego.

Od strony edytorskiej tekst jest przygotowany starannie. Napisany jest w sposób logiczny i poprawnie językiem technicznym. Konstrukcja dysertacji jest również poprawna.

## **Uwagi krytyczne**

Jak wcześniej wspomniano ogólna ocena pracy doktorskiej jest pozytywna. Niemniej jednak, moim zdaniem, obowiązkiem recenzenta jest wskazać dostrzeżone, w trakcie czytania, niedoskonałości wykonanej pracy. Z tego też powodu wymieniam niektóre z nich:



1. Co to jest strumień mocy ? Wyrażony jest w Watach wydaje się więc, że jest to strumień ciepła/energii?
2. W publikacjach naukowych stara się unikać konfliktu oznaczeń. W dysertacji literą R oznaczamy indywidualną stałą gazową oraz rezystancję. Z drugiej jednak strony czasem ciężko tego uniknąć.
3. W pracy stosuje się pojęcia „lepkość dynamiczna” oraz „lepkość kinematyczna” co sugeruje istnienie dwóch różnych lepkości. Lepszym określeniem jest współczynnik lepkości dynamicznej i kinematycznej.
4. Obce ilustracje należy zacytować np. Rysunek 1.1 i 1.2 itd. ...
5. Zauważono kilka „literówek” np. str. 19 „Nikolaus Rott, **które**my udało się ...”
6. Str. 20: jest: „*ilość wystąpień pełnego okresu*” powinno być *liczba wystąpień* ...
7. Równania, definicje zaczerpnięte z literatury powinny być zacytowane. Ułatwia to czytanie. Np. równania 2.1 - 2.7.
8. Str. 20: jest: „amplituda ruchu cząstek ....”. Być może lepiej byłoby: „amplituda drgań cząstek...”
9. Stwierdzenie na stronie 21: „*Równanie pędu wyraża drugą zasadę dynamiki Newtona dla gazów. Równanie to powszechnie nazywa się także równaniem Naviera-Stokesa*” nie jest precyzyjne. Równanie N-S opisuje ruch płynów newtonowskich, więc jest szczególną postacią drugiej zasady dynamiki ....
10. Równanie pędu 2.9 nie jest równaniem uogólnionym. Brakuje np. wpływu grawitacji
11. Str. 46: jest „*ilość zmiennych*” powinno być *liczba zmiennych* ....
12. Przy opisie wykorzystywanego oprogramowania warto zacytować stronę internetową pakietu
13. Str. 71: jest „*możliwość tworzenia własnych alternatywnych modułów*” zamiast *tworzenia* powinno być *opracowywania*
14. Zdarza się, że ilustracja znajduje się w pewnym oddaleniu od opisującego ją tekstu. Utrudnia to czytanie pracy
15. Równania 4.13 . Czy s to entropia?
16. Równania 5.1 i 5.2 . Brakuje cytowania. Skąd zaczerpnięto podane wzory?
17. Str. 88: jest „*dwu etapowo*” a powinno być *dwuetapowo*.
18. Rysunki 5.7 – 5.8: brakuje legendy
19. Rysunek 5.7. Co to jest x?
20. STR 98: skąd założenie 5% intensywności turbulencji



21. Zamiast spisu tablic można wykorzystać określenie spis tabel

### Zbiorcza ocena pracy doktorskiej

Dokładna analiza rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Krzysztofa Rogozińskiego pt. *„Symulacja numeryczna urządzeń termoakustycznych z falą stojącą”* utwierdziła mnie w przekonaniu, że doktorant posiada umiejętności pozwalające samodzielnie zaobserwować, sformułować i znaleźć rozwiązanie otaczających nas problemów naukowo-badawczych. Treść pracy wskazuje, że doktorant jest samodzielnym i dojrzałym naukowcem. W pracy poruszono istotny temat badawczy i dogłębnie go przeanalizowano.

### Wniosek

Po zapoznaniu się z przedstawioną mi do recenzji pracą doktorską pt. *„Symulacja numeryczna urządzeń termoakustycznych z falą stojącą”* mogę stwierdzić, że odpowiada ona wymogom określonym w art.13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U.2003.65.595 z późn. zm.). W związku z tym faktem wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Krzysztofa Rogozińskiego do dalszego postępowania w ramach przewodu doktorskiego.

Rafał Budyń

