



prof. dr hab. inż. Dariusz Butrymowicz

Katedra Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45C, 15-950 Białystok,
tel. 571 443 089
505 835 170
e-mail: d.butrymowicz@pb.edu.pl

Białystok, 04.07.2023

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Kajurka

Dostosowanie podstawowych parametrów fali akustycznej oraz geometrii stosu do wydajności chłodniczej termoakustycznego urządzenia chłodniczego z falą stojącą zasilanego przetwornikiem elektroakustycznym

Opinia została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej, Pana Prof. Dr hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego, RND-IŚGiE/41/2023 z dnia 25 kwietnia 2023.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest Dr hab. inż. Artur Rusowicz, Prof. Uczelni, zaś promotorem pomocniczym jest Dr inż. Andrzej Grzebielec.

I. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 160 stron. Rozprawa składa się z następujących części: streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazu oznaczeń, wstępu (rozdział 1), prezentacji opisu modelowego zjawisk termoakustycznych i pracy układu chłodniczego termoakustycznego (rozdziały 2 i 3), rozdziałów 5 i 6 prezentujących własny materiał badawczy, podsumowania (rozdział 6), 3 załączników oraz wykazu literatury. Zawartość poszczególnych rozdziałów obejmuje:

1. **Wstęp**, w którym Autor dokonał przeglądu stanu ogólnej wiedzy dotyczącej układów chłodniczych termoakustycznych oraz sformułował cel i plan pracy.
2. **Teoria termoakustyki**. W rozdziale w sposób systematyczny zaprezentowano opis modelowy zjawisk termoakustycznych.
3. **Chłodziarki z falą stojącą**. W rozdziale tym Doktorant przedstawił opis modelowy układu chłodniczego termoakustycznego.
4. **Stanowisko badawcze**. W rozdziale tym Doktorant zamieścił szczegółowy opis metodyki projektowania oraz budowę modelowego układu chłodniczego termoakustycznego.
5. **Wyniki badań**. W rozdziale zaprezentowane szczegółowe wyniki własnych badań eksperymentalnych modelowego układu chłodniczego termoakustycznego.
6. **Podsumowanie i wnioski**. W rozdziale tym Doktorant w sposób syntetyczny podsumował uzyskane wyniki zawarte w rozprawie.

- **Bibliografia** zawierająca wykaz 130 pozycji literatury, obejmująca najnowsze publikacje z renomowanych czasopism międzynarodowych oraz publikacje książkowe z dziedziny termoakustyki, termodynamiki i mechaniki płynów.
- **Załączniki (kody źródłowe modeli numerycznych DeltaEC):**
 Załącznik A.1. Analiza długości, porowatości i położenia stosu w rezonatorze;
 Załącznik A.2. Analiza pracy głośnika;
 Załącznik A.3. Analiza pracy urządzenia eksperymentalnego z uwzględnieniem strat ciepła.

II. Cel i zakres rozprawy

Doktorant sformułował cel, zasadniczy zakres rozprawy oraz tezę w finalnej części Rozdziału 1, wskazując za podstawowy cel realizację badań eksperymentalnych termoakustycznego układu chłodniczego z falą stojącą dla różnych geometrii stosu oraz różnych parametrów fali akustycznej. Sformułowany został w sposób ogólny zakres rzeczowy prac badawczych.

Doktorant sformułował tezę w postaci jawnej w następującej postaci: „Dostosowanie podstawowych parametrów fali akustycznej i geometrii stosu wpływa na poprawę wydajności chłodniczej termoakustycznego urządzenia z falą stojącą”. Tak postawiona bardzo ogólna teza dotyczy kwestii o raczej ugruntowanym charakterze, wobec czego rzeczywistym, kluczowym wyzwaniem podejmowanym w ramach rozprawy jest przeprowadzenie systematycznych badań wpływu parametrów fali akustycznej oraz geometrii stosu w warunkach ustalonych bądź zmiennych w czasie obciążeń cieplnych układu chłodniczego zbudowanego z dostępnych na rynku komponentów składowych, a w tym zwłaszcza głośnika (stanowiącego napęd dla badanego układu).

Cel, zakres rzeczowy oraz teza rozprawy zostały sformułowane na podstawie ogólnej analizy dotychczasowego stanu wiedzy przedstawionej w Rozdziale 1 rozprawy doktorskiej w zakresie zagadnień dotyczących układów termoakustycznych. Niewątpliwie sformułowany cel oraz wskazany zakres rozprawy ze sobą w pełni korespondują, program prac o charakterze analitycznym oraz projektowym zaproponowany przez Doktoranta ze sformułowanym celem oraz postawioną tezę w pełni korespondują. W układzie pracy, przy tak postawionym celu oraz zakresie - znajdują się wątki o charakterze prac w zakresie projektowania układów termoakustycznych oraz walidacji ich pracy. Należy wziąć pod uwagę, że rozprawa podejmuje zagadnienia aktualne, o otwartym charakterze badawczym, coraz intensywniej rozważane w literaturze naukowej i technicznej. W tym kontekście wskazany cel oraz tezę postawioną w rozprawie uznaję za adekwatne.

Biorąc pod uwagę zawarte w rozprawie rezultaty badań eksperymentalnych proponowanych rozwiązań układu chłodniczego termoakustycznego, uzyskane wyniki analiz teoretycznych oraz obliczeniowych – stwierdzam, że odpowiadają one sformułowanemu celowi rozprawy. Zakres rzeczowy rozprawy oraz zaproponowany jej zakres korespondują ze sformułowaną tezą rozprawy i pozwalają na uzyskanie rezultatów pozwalających na jej udowodnienie.

III. Treść rozprawy

We Wstępie rozprawy Doktorant zamieścił omówienie ogólnych aspektów związanych z budową układów chłodniczych termoakustycznych oraz ich miejscem w aktualnych uwarunkowaniach rozwoju układów chłodniczych o napędzie cieplnym. Przedstawiono

ogólne informacje o zasadzie działania i budowie układów termoakustycznych z falą stojącą i falą biegnącą, a także obszerny przegląd aktualnych zastosowań przemysłowych takich urządzeń. W końcowej części Wstępu zamieszczono sformułowanie celu, zakresu oraz tezy rozprawy – do czego odniosłem się w punkcie II niniejszej recenzji.

W Rozdziale 2 Doktorant przedstawił systematyczny wstęp do teorii zjawisk termoakustycznych na bazie dostępnej literatury naukowej. Podstawą do prezentowanej teorii jest podstawowy opis fali akustycznej. W dalszej części rozdziału zaprezentowano podstawowe równania opisujące falę akustyczną płaską wraz z równaniami zachowania masy, pędu i energii. Zaprezentowano analogię elektro-akustyczną rezonatora oraz zagadnienia modelowania oporu cieplnego i lepkościowego, wraz ze sformułowaniem termicznej i lepkościowej głębokości wnikania. Kolejnym prezentowanym aspektem jest ocena średniego osiowego gradientu temperatury w rezonatorze oraz krytycznej wartości tego parametru warunkującej pracę układu odpowiednio jako układ chłodniczy bądź silnik cieplny. Następnie Doktorant zaprezentował równanie falowe Rotta stanowiące podstawę do formułowania opisu modelowego urządzeń termoakustycznych. Przedstawiono zasadę wykorzystania analogii elektro-akustycznej do opisu modelowego bazującego na równaniu falowym Rotta, w tym model impedancyjny rezonatora. W dalszej części rozdziału przedstawiono opis modelowy transportu energii w zjawiskach termoakustycznych, a w tym transport termoakustycznego strumienia ciepła oraz transportu strumienia ciepła drogą przewodnictwa i konwekcji. Podjęto także analizę efektywności energetycznej układu chłodniczego termoakustycznego, a także analogię pomiędzy pracy układu chłodniczego termoakustycznego z falą stojącą a lewobieźnym obiegiem Braytona, zaś w przypadku układu chłodniczego termoakustycznego z falą biegnącą analogię z lewobieźnym obiegiem Stirlinga. W końcowej części rozdziału zamieszczono ogólne uwagi dotyczące uwarunkowań zastosowania zaprezentowanego uproszczonego opisu zjawisk termoakustycznych z uwagi na efekty związane z turbulencją przepływu, lepkościowego rozpraszania fali kaustycznej, czy też tzw. strumienia ciepła Gedeona występującego w układach z falą biegnącą lub strumienia masy Rayleigha. Rozdział ten kończy ogólny opis programu DeltaEC - powszechnie wykorzystywanego do obliczeń układów termoakustycznych.

W Rozdziale 3 przedstawiono opis modelowy układu chłodniczego termoakustycznego z falą stojącą na podstawie dostępnych źródeł literaturowych z wykorzystaniem formalizmu teorii zjawisk termoakustycznych. Podstawą opisu modelowego jest równanie transportu całkowitego strumienia energii oraz zmiany mocy akustycznej z uwzględnieniem standardowego opisu modelowego stosu w rezonatorze. Szczególną uwagę zwrócono na aspekty modelowania średniego i krytycznego gradientu temperatury, które warunkują pracę układu chłodniczego. Istotnym aspektem jest wyspecyfikowanie kluczowych parametrów pracy układu, jego parametrów geometrycznych oraz parametrów materiałowych niezbędnych do opisu modelowego rozważanego układu. W dalszej części rozdziału przedstawiono podstawowy opis modelowy wymienników ciepła oraz źródła mocy akustycznej (głośnika) z rezonatorem oraz ogólny opis budowy stosu oraz rezonatora. Rozdział kończą ogólne uwagi dotyczące doboru czynnika roboczego (zwłaszcza w aspekcie wykładnika izentropy oraz liczby Prandtla) oraz uwarunkowania zakładanego stosunku amplitudy ciśnienia akustycznego do średniego ciśnienia w rezonatorze.

Rozdziały 4 – 6 zawierają materiał badawczy stanowiący własne osiągnięcia Doktoranta prezentowane w ocenianej rozprawie. W Rozdziale 4 przedstawiono zagadnienia projektowe oraz budowy modelowego układu chłodniczego termoakustycznego. W pierwszej kolejności

Doktorant podjął zagadnienia doboru czynnika roboczego, wobec czego uzasadnił on dobór helu oraz powietrza do celów prowadzonych badań eksperymentalnych. W dalszej kolejności Doktorant uzasadnił przyjęty stosunek ciśnień oraz podstawowe parametry geometryczne budowanego stosu dla modelowego układu chłodniczego, w tym w szczególności jego długości oraz stosunku położenia środka stosu do długości fali akustycznej. Zamieszczono podstawowe wymiary stosu oraz technologię jego wykonania dla badanego modelowego układu. Następnie Doktorant przedstawił własne rozwiązanie wymienników ciepła wraz z zastosowaną technologią ich wykonania. Przedstawiony został także dobór źródła mocy akustycznej w aspekcie zastosowania helu i powietrza jako czynników roboczych w modelowym układzie. Przedstawiona została konstrukcja komory rezonatora. W końcowej części rozdziału Doktorant przedstawił system akwizycji danych pomiarowych oraz zastosowane czujniki pomiarowe, a także procedurę badawczą.

Rezultaty przeprowadzonych własnych systematycznych badań eksperymentalnych zostały przedstawione oraz przeanalizowane w Rozdziale 5. Kluczowym aspektem do oceny pracy termoakustycznego układu chłodniczego było przeprowadzenie badań charakterystyki pracy źródła dźwięku dla helu oraz powietrza w oparciu o rozkłady ciśnienia akustycznego. Wykazano, że nie została w pełni osiągnięta założona projektowa częstotliwość układu pozwalająca na uzyskanie maksimum ciśnienia akustycznego. Doktorant przeprowadził analizę obliczeniową dobranej głośnicy jako źródła mocy akustycznej dla modelowego układu i wykazał na znaczne rozbieżności pomiędzy rozkładami ciśnienia akustycznego obliczonymi oraz zmierzonymi. Doktorant przeanalizował szczegółowo przyczyny tego stanu rzeczy, w tym rzeczywiste i zmienne wartości parametrów elektroakustycznych głośnika odmienne od deklarowanych, a także efekty nieliniowe zachodzące w rezonatorze głośnika. Doktorant przeanalizował charakterystykę impedancyjną zastosowanego głośnika współpracującego z rezonatorem oraz przeanalizował wartości pomiarowe oraz predykcyjne (w oparciu o wyniki obliczeń z programu DeltaEC) skutecznego natężenia prądu zasilającego głośnik, uzyskując satysfakcjonującą zgodność. Przeanalizowane zostały także liniowe charakterystyki pracy głośnika współpracującego z rezonatorem dla helu i powietrza w postaci zależności ciśnienia akustycznego na końcu rezonatora od napięcia zasilającego głośnik oraz mocy elektrycznej pobieranej przez wzmacniacz. W dalszej części rozdziału Doktorant przedstawił wyodrębnione wyniki badań eksperymentalnych dla helu oraz dla powietrza jako czynników roboczych. Analiza obejmuje badania dla obydwu czynników wpływu częstotliwości, napięcia zasilającego oraz geometrii stosu (rozstaw szczelin stosu) na osiągalną różnicę temperatur, wydajność chłodniczą, efektywność energetyczną oraz sprawność energetyczną dla pracy w warunkach ustalonych oraz dla warunków nieustalonych, dla zmieniającego się w czasie obciążenia cieplnego wymiennika zimnego. W końcowej części rozdziału przeanalizowano porównanie uzyskiwanych zależności osiągalnej różnicy temperatur od częstotliwości fali akustycznej dla wybranych przypadków geometrycznych stosu dla helu oraz powietrza uzyskanych eksperymentalnie oraz obliczonych z zastosowaniem programu DeltaEC. Uzyskano bardzo duże rozbieżności, wobec czego Doktorant zaproponował zastosowanie zmodyfikowanej analizy obliczeniowej. Przyjęto w niej, że strumień ciepła transportowany pomiędzy niskotemperaturową stroną stosu a punktem pomiaru temperatury jest modelowany jako transport ciepła przez dodatkowy stos o wymiarach rury rezonansowej. Przyjęto także w skorygowanej procedurze obliczeniowej, że straty ciepła do otoczenia są modelowane z zastosowaniem dodatkowego zastępczego wymiennika ciepła. W efekcie przy przyjętych dodatkowych zastępczych elementach korygujących - możliwe jest uzyskanie satysfakcjonującej dokładności predykcji.

Uzyskane w rozprawie rezultaty zostały podsumowane w Rozdziale 6. Doktorant w Rozdziale tym przedstawił syntetyczny przegląd zamieszczonych w recenzowanej pracy podejmowanych prac badawczych. Wskazał na szczególne osiągnięcia w zakresie badań dla różnych geometrii stosu oraz warunków pracy układu, a także osiągnięcia metodyczne, w tym propozycję korekty opisu modelowego termoakustycznego układu chłodniczego.

IV. Oryginalność i wartości poznawcze rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy z jednej strony rozpoznania zasadniczych kwestii związanych z osiągalnym poziomem wytwarzanej różnicy temperatur przez układ chłodniczy termoakustyczny oraz osiągalny poziom efektywności energetycznej uwarunkowany możliwościami konstrukcyjnymi takiego urządzenia. Z drugiej jednak strony, w rozprawie podjęto zagadnienia metodyczne stanowiące istotne osiągnięcie Doktoranta. W rozprawie podjęto w sposób oryginalny zagadnienia doboru kluczowych parametrów geometrycznych oraz parametrów pracy warunkujących prawidłową pracę układu. Należy podkreślić, że podejmowane zagadnienie dotyczy w istocie zagadnień interdyscyplinarnych, łączących zagadnienia techniki chłodniczej, zagadnienia termoakustyki właściwe dla obszaru termodynamiki i mechaniki płynów z zagadnieniami elektroakustyki. Podejmowane zagadnienia badawcze należą do obszaru dopiero rozwijanego w literaturze naukowej, stąd samo podjęcie prac badawczych w kompleksowy sposób stanowiło dla Doktoranta wyzwanie. Warto podkreślić, że badania eksperymentalne wzbogacone szczegółowymi analizami obliczeniowymi zostały podjęte przez Doktoranta w sposób oryginalny, twórczy oraz z zastosowaniem właściwych narzędzi metodycznych.

Za szczególne osiągnięcia Doktoranta uważam:

- przeprowadzenie systematycznych badań eksperymentalnych w zakresie wpływu częstotliwości, napięcia zasilającego oraz geometrii stosu (rozstaw szczelin stosu) na osiągalną różnicę temperatur, wydajność chłodniczą, efektywność energetyczną oraz sprawność energetyczną dla pracy w warunkach ustalonych oraz dla warunków nieustalonych;
- opracowanie metodyki projektowania termoakustycznego układu chłodniczego z falą stojącą z zastosowaniem krytycznej analizy dostępnego w literaturze opisu modelowego zjawisk termoakustycznych.

Prezentowane w rozprawie rezultaty prac mają niewątpliwie oryginalny charakter. Uzyskany materiał badawczy pozwala na stwierdzenie, że cel oraz zakres recenzowanej rozprawy zostały w całości zrealizowane. Zaprezentowane w rozprawie rezultaty wnoszą wkład poznawczy w dziedzinie chłodnictwa – mieszczący się w obszarze dotyczącym dyscypliny: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

V. Wartości użytkowe rozprawy

W recenzowanej rozprawie podjęto zagadnienia o charakterze badań podstawowych w obszarze aplikacji zjawisk termoakustycznych do wytwarzania efektu chłodniczego. Osiągalny poziom efektywności energetycznej jest co prawda daleki od zadawalającego z aplikacyjnego punktu widzenia, tym niemniej kwestia wypracowania technologii pozwalających na konwersję ciepła odpadowego bądź pochodzącego z odnawialnych źródeł energii stanowi aktualnie kluczowe wyzwanie dla energetyki. Dotyczy to zwłaszcza

możliwości konwersji ciepła na chłód z zastosowaniem układów nie wykorzystujących substancji zagrażających środowisku, nie posiadających elementów ruchomych i wobec tego znacznie tańszych i trwalszych w odniesieniu do technologii alternatywnych. Bardzo ważnym osiągnięciem Doktoranta jest prezentacja metodyki projektowania termoakustycznych układów chłodniczych w oparciu o krytyczną analizę dostępnych metod modelowania zjawisk termoakustycznych. Niewątpliwie przeprowadzone w ramach rozprawy doktorskiej prace badawcze otwierają nowe możliwości aplikacyjne w obszarze związanym z nowoczesną techniką chłodniczą i energetyką cieplną.

VI. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

VI.1. Uwagi o charakterze merytorycznym

W rozprawie zaprezentowano oryginalne ujęcie podejmowanego zagadnienia. Zaprezentowany w rozprawie materiał wymagał znacznego nakładu pracy oraz inwencji i stanowi niewątpliwie oryginalne i twórcze osiągnięcia naukowe Doktoranta. Poniższe uwagi, mające w dużej mierze charakter komentarzy bądź sugestii - nie umniejszają mojej jednoznacznie pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej i w znacznej mierze mają raczej charakter porządkowy, formalny bądź dyskusyjny.

Uwaga ogólna:

Istotnym mankamentem przyjętej prezentacji materiału badawczego jest to, że nie zastosowano ogólnie przyjętego układu pracy doktorskiej, w którym wskazany cel i zakres rozprawy wynikają z krytycznego przeglądu stanu wiedzy w podejmowanym obszarze, zaś osiągnięcia własne Doktoranta są w czytelny sposób wskazane w odniesieniu do stanu wiedzy. Powyższe nie oznacza, że wnoszę zastrzeżenia odnośnie wypracowanych własnych osiągnięć Doktoranta, lecz wskazuję na zastrzeżenie dotyczące prezentacji krytycznego przeglądu stanu wiedzy w kontekście zdefiniowanego celu i zakresu rozprawy.

Uwagi szczegółowe:

1. W końcowej części Rozdziału 3.1 Doktorant wskazał na uproszczony charakter opisu modelowego i ujął, że jest on właściwy do wstępnego projektowania. Należałoby zatem oczekiwać uzupełniającej informacji o możliwym do zastosowania modelu o dokładniejszym poziomie predykcji.
2. W wielu miejscach rozprawy Doktorant powołuje się na pojęcie porowatości stosu. Należy jednakże zauważyć, że wielkość ta nie została w rozprawie w sposób czytelny zdefiniowana i nie występuje w opisie modelowym zastosowanym w rozprawie.
3. Kwestią o otwartym charakterze jest zagadnienie predykcji współczynnika wnikania ciepła, którego charakter jest odmienny od klasycznych zagadnień wnikania ciepła w warunkach konwekcji w warunkach ustalonych. Zagadnienie to w ogólny sposób podjęto w Rozdz. 3.2.3 rozprawy. Rozprawa w moim przekonaniu dodatkowo zyskałaby, gdyby w ramach prowadzonych prac badawczych możliwa była identyfikacja współczynnika wnikania ciepła dla opracowanego rozwiązania wymiennika ciepła.
4. W rozprawie należałoby zamieścić analizę błędu pomiaru wydajności chłodniczej oraz współczynnika efektywności energetycznej badanego układu modelowego. Pomiar temperatur w zastosowanej konfiguracji wyposażenia pomiarowego wymagałby kalibracji toru pomiarowego temperatur, do czego nie odniesiono się w opisie procedury pomiarowej.

5. W Rozdziale 4.1.1, punkt Wymienniki ciepła stwierdza się, że „wysokotemperaturowy wymiennik ciepła oddaje do górnego źródła ciepła niemal dwa razy tyle ciepła, co niskotemperaturowy wymiennik ciepła pobiera ze źródła dolnego”. Jest to założenie prawdziwe tylko dla współczynnika efektywności energetycznej równego jedności, co dla przypadku analizowanego układu nie zachodzi. W rozprawie należałoby zatem wyjaśnić tę kwestię.

VI. 2. Uwagi porządkowe

Należy podkreślić staranne przygotowanie rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Zwraca uwagę przejrzystość tekstu, a także wysoka jakość rysunków. Poniżej zawarte uwagi nie wpływają na moją jednoznacznie bardzo wysoką ocenę rozprawy i mają w dużej mierze charakter sugestii, które pozwalam sobie wypunktować mając na uwadze potencjalne wykorzystanie materiału zawartego w rozprawie w dalszych publikacjach Doktoranta.

Uwagi ogólne:

- W rozprawie w wielu miejscach Rozdziałów 2 i 3 nie są stosowane w sposób systematyczny odwołania literaturowe, zwłaszcza zaś w Rozdziale 2.2 oraz w Rozdziale 2.3. W istocie materiał prezentowany w tych rozdziałach oparty jest na dostępnych źródłach literaturowych. Bardziej systematyczne odwołania literaturowe pozwoliłyby czytelnikowi także zorientować się, na ile prezentacja dość złożonych pod względem formalizmu opisu modelowego zagadnień zawiera oryginalne ujęcie prezentacyjne bądź syntezę opracowane przez Autora.
- W rozprawie należałoby również zamieścić bardziej szczegółowe rysunki konstrukcyjne wymienników ciepła.

Uwagi szczegółowe:

- Należałoby w rozprawie wskazać, co rozumie się poprzez ciepło niskotemperaturowe (pojęcie to pojawia się w rozprawie wielokrotnie).
- W Rozdziale 2.5 ujęto ogólny opis zjawiska turbulencji zależącej tylko od liczby Reynoldsa, nie wskazując na istnienie stosu jako potencjalnego źródła turbulencji.
- W opisie zamieszczonym w Rozdziale 2.5 nie wyjaśniono istoty strumieni dla przypadków pokazanych na Rys. 2.22c oraz Rys. 2.22d.
- W Rozdziale 2.5.3 stwierdza się, że: „w układach sprężarkowych regulacja wydajności chłodniczej może odbywać się przez odpowiedni dobór ciśnienia parowania i skraplania”, co na ogół nie jest działaniem praktykowanym w tego typu układach, należałoby zatem tę kwestię uściślić w rozprawie.
- W opisie równ. (3.13) zastosowano niejasny zapis: „przy przyjęciu założenia warstwy granicznej”.
- Str. 34, w ostatnim akapicie Rozdziału 2.1 należałoby sformułować: „jeśli średnia prędkość akustyczna na zamkniętym końcu rury i ciśnienie akustyczne na otwartym końcu rury będą równe zero”.
- Str. 36, z treści nad równ. (2.34) wynikałoby, że założenie pominięcia lepkości jest ważne dla równania ciągłości, co jest zagadnieniem o dyskusyjnym charakterze. Należałoby tę kwestię uściślić.
- Str. 44, równ. (2.69) zawiera pomyłkowo wzór z równ. (2.68).
- Str. 65, w równ. (3.8) zastosowano niewłaściwe oznaczenie gradientu temperatury.

Uwagi edytorskie:

- Str. 30 – błąd w numeracji Rozdziału 6.
- Str. 50 – w tekście nad Rys. 2.11 „cząstka porcja”.

VII. Uwagi końcowe

Praca jest bardzo starannie zredagowana, stosowana jest poprawna nomenklatura naukowa oraz techniczna. W pracy zamieszczono w niej wiele informacji pozwalających na szczegółowe przeanalizowanie materiału badawczego. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny bądź porządkowy i powinny być traktowane raczej jako pomoc w zakresie wykorzystania uzyskanego materiału w dalszej pracy nad bardzo złożonymi zagadnieniami termoakustycznymi w zastosowaniu dla nowoczesnej techniki chłodniczej. Uwagi te nie pomniejszają wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy.

VIII. Wniosek do Rady Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest poważną, wnoszącą wkład poznawczy oraz metodyczny pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod właściwych dla termodynamiki i mechaniki płynów. W moim przekonaniu przedstawiona do recenzji rozprawa jednoznacznie spełnia zwyczajowe ramy stawiane pracom doktorskim, zarówno pod względem zakresu rzeczowego, jak poziomowi oryginalności osiągnięć technicznych, konstrukcyjnych oraz metodycznych. Co więcej – istotnym walorem pracy są aspekty poznawcze dotyczące zagadnień naukowych o wciąż otwartym charakterze. Należy podkreślić, że Doktorant realizując prace badawcze musiał zmierzyć się z koniecznością zdobycia wiedzy o charakterze interdyscyplinarnym, rozwiązywanie wielu problemów natury konstrukcyjnej wymagało bardzo dużego poziomu kreatywności Doktoranta. Przy podejmowaniu prac badawczych nie posiadał on wzorca z racji tego, że podejmowana praca w zakresie termoakustycznych układów chłodniczych jest po raz pierwszy w krajowym środowisku akademickim. Uwagę zwraca także bardzo dobrze opanowany, dojrzały warsztat pracy naukowej, czego efektem jest wiele krytycznych analiz zawartych w rozprawie. Zaprezentowana w rozprawie analiza stanowi rozwiązanie zadania naukowego i spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zaś oryginalność osiągnięć badawczych Doktoranta skłania mnie do wniosku o jej wyróżnienie.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

1. Rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Kajurka spełnia wymagania Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. 2018 z. 1668 z późn. zmianami) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.
3. Wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Dariusz Bityński