



prof. dr hab. inż. Dariusz Butrymowicz

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

Białystok, 17.05.2017

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Michała Palacza
„Mathematical modeling of transcritical fluid flow
inside a two-phase ejector for refrigeration systems
(Modelowanie matematyczne transkrytycznego przepływu
przez dwufazowy eżektor przeznaczony do układów chłodniczych)”

Opinia została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, pismo RIE-DB/4/206/2016/2017 dnia 08 marca 2017.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest Dr hab. inż. Jacek Smółka, Prof. nadzw. Politechniki Śląskiej.

I. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 84 strony i została sporządzona w języku angielskim. Praca składa się z następujących części:

wykazu czterech publikacji stanowiących zasadniczy wkład Doktoranta w przedmiotowym zakresie:

- [1] Palacz M., Smolka J., Fic A., Buliński Z., Nowak A.J., Banasiak K., Hafner A., Application range of the HEM approach for CO₂ expansion inside two-phase ejectors for supermarket refrigeration systems, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 59, 2015, str. 251-258;
- [2] Palacz M., Smolka J., Kuś W., Fic A., Buliński Z., Nowak A.J., Banasiak K., Hafner A., CFD-based shape optimisation for CO₂ two-phase ejector mixing section, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 95, 2016, str. 62-69;
- [3] Palacz M., Smolka J., Nowak A.J., Banasiak K., Hafner A., Shape optimisation of a two-phase ejector for CO₂ refrigeration systems, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 74, 2017, str. 210-221;
- [4] Palacz M., Haida M., Smolka J., Nowak A.J., Banasiak K., Hafner A., HEM and HRM accuracy comparison for the simulation of CO₂ expansion in two-phase ejectors for supermarket refrigeration systems, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 115, 2017, str. 160-169;

dalej - listę 6 publikacji uzupełniających, których współautorem jest Doktorant, wykaz oznaczeń, rozdział wprowadzający, cztery rozdziały podsumowujące rezultaty uzyskane w

publikacjach [1÷4], podsumowanie, zestawienie bibliograficzne, streszczenie w języku angielskim oraz polskim, zaś załącznik stanowią publikacje [1÷4].

Wkład własny Doktoranta w zakresie publikacji [1÷4], stanowiących zasadniczą część rozprawy doktorskiej został w sposób szczegółowy zamieszczony na stronach I i II rozprawy i stanowi co najmniej 50 % jego udział.

II. Cel i zakres rozprawy

Doktorant sformułował następująco cel rozprawy w Rozdziale 1.5 rozprawy: Celem pracy doktorskiej jest zaproponowanie uniwersalnej i dokładnej metody obliczeniowej, która może być skutecznie wykorzystana na przykład w obliczeniach przepływu w strumienicy, metoda optymalizacji geometrii strumienicy, ewaluację modeli przepływu dwufazowego zachodzącego w strumienicy. W zakres przedmiotowej rozprawy wchodzi:

- analiza i ewaluacja modelu przepływu dwufazowego HEM równowagowego homogenicznego (Homogenous Equilibrium Model) w zastosowaniu do modelowania przepływu dwutlenku węgla w strumienicach działających w układach chłodniczych;
- zagadnienia optymalizacji geometrii strumienicy komory mieszania strumienicy;
- zagadnienia optymalizacji pełnej geometrii strumienicy;
- zagadnienia implementacji modelu przepływu dwufazowego homogenicznego relaksacyjnego HRM (Homogenous Relaxation Model) do modelowania przepływu w strumienicy oraz ocenę jego dokładności.

Cel oraz zakres rozprawy zostały sformułowane na podstawie analizy dotychczasowego stanu wiedzy w zakresie modelowania pracy strumienic dwufazowych w układach chłodniczych z dwutlenkiem węgla jako czynnikiem roboczym. Należy wziąć pod uwagę, że w dostępnej literaturze nie były dostatecznie rozwinięte oraz dokładne metody modelowania strumienic dwufazowych dla układów chłodniczych z dwutlenkiem węgla jako czynnikiem roboczym, a także metod optymalizacji geometrii takich strumienic.

Cel rozprawy jest sformułowany w sposób jasny i precyzyjny, zaś program prac o charakterze analitycznym zaproponowany przez Doktoranta ze sformułowanym celem w pełni koresponduje. Biorąc powyższe pod uwagę można stwierdzić, że cel oraz zakres rozprawy doktorskiej zostały tak sformułowane, że rezultaty uzyskane w ramach niniejszej pracy wnoszą istotny wkład poznawczy oraz metodyczny w zakresie modelowania złożonych zjawisk przepływowych zachodzących w strumienicach dwufazowych zasilanych czynnikiem roboczym w stanie okołokrytycznym.

Podsumowując - w moim przekonaniu zawarty w recenzowanej rozprawie doktorskiej materiał badawczy w postaci kompleksowo przeprowadzonych analiz teoretycznych skonfrontowanych z wynikami badań eksperymentalnych - w pełni odpowiada sformułowanemu celowi oraz zakresowi rozprawy.

III. Treść rozprawy

We Wstępie Doktorant w sposób ogólny scharakteryzował potrzebę rozwoju układów chłodniczych w aspekcie zastosowań bardziej przyjaznych dla środowiska czynników roboczych. W dalszej części rozdziału wstępnego omówiono ogólne aspekty zastosowania dwutlenku węgla jako czynnika roboczego, a w tym znaczną stratę dławienia. Przedstawiono

oraz omówiono trzy generacje układów chłodniczych sprężarkowych pracujących z CO₂ jako czynnikiem roboczym. Wskazano na dotychczas podejmowane prace w zakresie układów chłodniczych z zastosowaniem strumienic dwufazowych w układach chłodniczych sprężarkowych jako sprężarek pierwszego stopnia. Przedstawiono zasadę działania oraz parametry wydajnościowe strumienicy dwufazowej oraz definicję jej sprawności. Przedstawiono w sposób zwięzły przegląd literatury obejmujący prace badawcze w zakresie zastosowań strumienic dwufazowych w układach chłodniczych oraz modelowanie numeryczne strumienic dwufazowych, zwłaszcza w aspekcie ich pracy dla dwutlenku węgla jako czynnika roboczego. W oparciu o zaprezentowany materiał sformułowano cel oraz zakres pracy, które zostały omówione powyżej w punkcie II recenzji.

W Rozdziałach II ÷ V przedstawiono w sposób zwięzły zasadnicze osiągnięcia zawarte odpowiednio w pracach [1÷4] stanowiących zasadniczy wkład Doktoranta w przedmiotowym zakresie.

W Rozdziale II przedstawiono zatem wyniki prac opublikowanych w artykule [1] w zakresie ewaluacji modelu homogenicznego równowagowego (HEM) w zastosowaniu do strumienic dwufazowych. Obliczenia w systemie Ansys Fluent wykonano dla parametrów wlotowych do dyszy napędowej strumienicy począwszy od parametrów podkrytycznych (ciecz dochłodzona) do nadkrytycznych (ciśnienie i temperatura powyżej wartości krytycznych). Uzyskane wyniki w zakresie strumienia masy czynnika przepływającego przez dyszę napędową strumienicy porównano z wynikami badań eksperymentalnych dostępnych w literaturze. Wskazano na tej podstawie na obszar parametrów wlotowych do dyszy zlokalizowany dla parametrów nadkrytycznych oraz okołokrytycznych – w którym uzyskano dobrą zgodność pomiędzy danymi eksperymentalnymi oraz obliczeniami (z różnicą nie przekraczającą 10%). Dla pozostałego obszaru, zwłaszcza w dla cieczy dochłodzonej (ciśnienia niższe od krytycznego, obszar zlokalizowany w pobliżu linii nasycenia cieczy) uzyskano zdecydowanie gorsze dokładności, co stało się motywacją po podjęciu dalszych prac w zakresie aplikacji modelu przepływu dwufazowego uwzględniającego nierównowagę termodynamiczną – co jest przedmiotem pracy [4].

W Rozdziale III przedstawiono wyniki prac opublikowanych w artykule [2] w zakresie optymalizacji geometrii komory mieszania przyjmując trzy wielkości do analizy, tj. średnicę i długość cylindrycznej komory mieszania oraz część komory wlotowej stożkowej od przekroju wylotowego z dyszy napędowej do wlotu do cylindrycznej części komory mieszania. Geometrię zoptymalizowaną porównywano z geometrią bazową opracowaną dla wybranych strumienic wchodzących w skład zespołu strumienicowego. Przyjęto w analizie dwa podejścia: zastosowanie algorytmu genetycznego oraz algorytmu ewolucyjnego do procedury optymalizacyjnej. Przyjęto jako kryterium optymalizacyjne uzyskanie maksymalnych wartości stosunków zasysania, co uzasadniono tym, że w przypadku założonych ciśnień roboczych w układzie chłodniczym – stosunek zasysania przekłada się proporcjonalnie na sprawność strumienicy. Przyjęto do analizy wstępnie funkcję celu jako średnią ważoną dwóch stosunków zasysania dla dwóch warunków pracy (projektowych oraz poza-projektowych), co nie dało oczekiwanego rezultatu w postaci poprawy sprawności strumienicy dla różnych warunków pracy. W związku z tym przyjęto jako funkcję celu średnią ważoną stosunków zasysania dla ośmiu warunków pracy, przyjmując jednakowe wagi. Porównano wyniki uzyskane z zastosowaniem algorytmu genetycznego oraz ewolucyjnego. Uzyskano zbliżone rezultaty i z uwagi na znacznie mniejszy koszt czasowy obliczeń dla optymalizacji drugiej z analizowanych strumienic – zastosowano algorytm ewolucyjny. Wskazano na istotną poprawę

sprawności strumienic ze zoptymalizowaną geometrią. Obliczenia optymalizacyjne wskazały na znacznie dłuższą komorę mieszania oraz praktycznie nie zmienioną średnicę komory mieszania w odniesieniu do geometrii bazowej.

W Rozdziale IV przedstawiono wyniki prac opublikowanych w artykule [3] w zakresie optymalizacji pełnej geometrii strumienicy, oprócz wielkości analizowanych w pracy [2], także kąt rozwarcia części stożkowej komory mieszania, średnicę wylotową dyszy napędowej oraz jej kąt rozwarcia. Przyjęto jako funkcję celu średnią ważoną stosunków zasysania dla czterech warunków pracy, przyjmując jednakowe wagi. Zastosowano algorytm generacyjny, opracowany i zastosowany przy okazji realizacji pracy [2]. Analizę wykonano dla czterech strumienic zespołu. W zakresie geometrii komory mieszania uzyskano rezultaty zbliżone do uzyskanych w pracy [2]. Dla geometrii zoptymalizowanej uzyskano znacznie dłuższą część stożkową komory mieszania, od 7 do 12% większą średnicę wylotową oraz od 34 do 74 % większy kąt rozwarcia dyszy napędowej. W oparciu o przykładowe rozkłady prędkości, ciśnień oraz intensywność turbulencji przeanalizowano warunki uzyskania korzystniejszego procesu wymiany pędu w komorze mieszania dla zoptymalizowanej geometrii strumienicy, co w efekcie przyniosło poprawę sprawności strumienicy o około 4.5 do 6.5 %.

W Rozdziale V przedstawiono wyniki prac opublikowanych w artykule [4] w zakresie ewaluacji modelu relaksacyjnego homogenicznego (HRM) w zastosowaniu do strumienic dwufazowych. Obliczenia w systemie Ansys Fluent wykonano dla parametrów wlotowych do dyszy napędowej strumienicy począwszy od parametrów podkrytycznych (ciecz dochłodzona) do nadkrytycznych (ciśnienie i temperatura powyżej wartości krytycznych). Zastosowano równanie na czas relaksacji w postaci zaproponowanej przez Angielczyka i in. (2010). Uzyskane wyniki w zakresie strumienia masy czynnika przepływającego przez dyszę napędową strumienicy porównano z wynikami uzyskanymi z zastosowaniem modelu równowagowego (HEM) oraz z wynikami badań eksperymentalnych dostępnych w literaturze. Dodatkowo – przeanalizowano wartości stosunków zasysania uzyskane z obliczeń strumienicy z zastosowaniem obydwu modeli. Wskazano na istotny aspekt związany z niejednoznacznością pomiędzy dokładnością predykcji strumienia masy przepływającego przez dyszę z dokładnością predykcji stosunku zasysania z zastosowaniem omawianych modeli. Efekty te powiązano z różnicami stopni suchości uzyskiwanymi w procesie odparowania rozprężnego w dyszy i wynikającymi z tego różnicami w rozkładach wartości prędkości oraz ciśnień, co zobrazowano dla przykładowych warunków pracy. Wskazano na potrzebę dalszych analiz w zakresie zastosowania modelu HRM, zwłaszcza w obszarze podkrytycznym, co jednak wymaga opracowania odpowiedniej modyfikacji w zakresie zależności na czas relaksacji.

W Rozdziale VI w sposób zwięzły dokonano podsumowania uzyskanych wyników.

IV. Oryginalność i wartości poznawcze rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy modelowania złożonych zagadnień przepływowych występujących w strumienicy dwufazowej w zastosowaniu do układów chłodniczych z dwutlenkiem węgla jako czynnikiem roboczym. Do rozważanej strumienicy dopływa czynnik roboczy w stanie cieczy dochłodzonej bądź płynu w stanie okołokrytycznym lub nadkrytycznym, zaś zasysana jest para przegrzana. W dyszy napędowej następuje proces odparowania rozprężnego, pociągając za sobą wystąpienie nierównowagi termodynamicznej w przepływie. Na wylocie z dyszy napędowej formowane są fale zgęszczeniowo-

rozrzedzeniowe, charakterystyczne dla przepływów nadkrytycznych. W komorze mieszania występują złożone warunki wymiany pędu pomiędzy zasysaną parą a dwufazowym przepływem.

W przedmiotowej rozprawie doktorskiej uzyskano znaczący postęp w zakresie modelowania numerycznego powyższych procesów. Zaproponowano racjonalne i efektywne podejście do optymalizacji geometrii strumienicy dwufazowej dla dwutlenku węgla jako czynnika roboczego. Rezultaty uzyskane w publikacjach [1 ÷ 4] stanowiący zasadniczy wkład Doktoranta w przedmiotowym zakresie wnoszą fundamentalny wkład w rozwój zagadnień modelowania złożonych zjawisk przepływowych zachodzących w strumienicach dwufazowych. Uzyskane rezultaty wnoszą więc istotny wkład zarówno w dziedzinie modelowania przepływów dwufazowych, jak również w dziedzinie chłodnictwa.

Za szczególne osiągnięcia Doktoranta uważam:

- opracowanie kompleksowej analizy zastosowania modeli homogenicznych do modelowania pracy strumienicy dwufazowej dla dwutlenku węgla jako czynnika roboczego, zasilanej płynem w warunkach od podkrytycznych do nadkrytycznych;
- opracowanie efektywnej metody pełnej optymalizacji geometrii strumienicy dwufazowej.

Prezentowane w rozprawie rezultaty prac mają niewątpliwie w pełni oryginalny charakter. Uzyskany materiał badawczy w pełni pozwala na stwierdzenie, że cel oraz zakres recenzowanej rozprawy zostały zrealizowane.

V. Wartości użytkowe rozprawy

Należy podkreślić istotne walory podejmowanych prac w aspekcie aktualnych regulacji prawnych Unii Europejskiej, które w zdecydowany sposób preferują zastosowanie dwutlenku węgla jako czynnika roboczego. Z oczywistych względów oczekuje się od nowoczesnych układów chłodniczych także odpowiednio wysokiej efektywności energetycznej. Z racji wysokich strat dławienia występujących w układach chłodniczych z zastosowaniem dwutlenku węgla jako czynnika roboczego, co w efekcie powoduje pogorszenie efektywności energetycznej. Istnieje zatem potrzeba efektywnego ograniczenia tejże straty, zaś rozważany w rozprawie zespół strumienic dwufazowych stanowi efektywne rozwiązanie tego problemu. Aplikacja tego rozwiązania wymaga jednakże posiadania odpowiednich, wiarygodnych narzędzi do modelowania zjawisk przepływowych w strumienicach, a także narzędzi do predykcji odpowiedniej geometrii strumienic. Zagadnienia te podejmowane są w przedmiotowej rozprawie doktorskiej.

Recenzowana rozprawa ma zatem niewątpliwie nie tylko walor poznawczy i metodyczny, lecz także walor aplikacyjny. Podejmowane w rozprawie zagadnienia dotyczą aplikacji systemów chłodniczych z dwutlenkiem węgla jako czynnikiem roboczym w chłodnictwie komercyjnym (supermarkety) i obejmują analizę przypadków odnoszących się do potrzeb aplikacyjnych. Opracowane rozwiązanie zespołu strumienicowego zostało wdrożone w ostatnim okresie przez koncern Danfoss w skali międzynarodowej. Prace badawcze podejmowane przez Doktoranta wykonywane były w ramach projektu realizowanego w projekcie międzynarodowym, którego obszar skoncentrowany był na zagadnieniach mających zasadnicze znaczenie z punktu widzenia aplikacji zespołu strumienicowego w układach chłodniczych obsługujących supermarkety.

Uzyskane przez Doktoranta osiągnięcia mogą znaleźć także zastosowanie dla zagadnień modelowania w zakresie aplikacji strumieni dwufazowych nie tylko w technice chłodniczej, lecz także w technice pomp ciepła, inżynierii procesowej, bądź energetyce cieplnej.

VI. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

VI.1. Uwagi o charakterze merytorycznym

W rozprawie zaprezentowano oryginalne oraz kompleksowe ujęcie podejmowanego zagadnienia. Zaprezentowany w rozprawie materiał analityczny wymagał znacznego nakładu pracy oraz inwencji i stanowi niewątpliwie oryginalne osiągnięcia naukowe Doktoranta. Poniższe uwagi, mające w dużej mierze charakter komentarzy bądź sugestii - nie umniejszają mojej jednoznacznie pozytywnej oraz bardzo wysokiej oceny rozprawy doktorskiej.

1. W pracy [1] oraz w Rozdziale II podjęto zagadnienia oceny zastosowania modelu równowagowego HEM do opisu przepływu przez dyszę napędową w strumienicy dwufazowej. Ewaluację modelu przeprowadzono poprzez porównanie wydatku dyszy obliczonego z modelu z wydatkiem uzyskanym z pomiarów dla tych samych parametrów wlotowych do dyszy. Nie są znane jednak parametry wylotowe z dyszy, podano natomiast w pracy [1] parametry wlotowe na ssaniu strumienicy, na ogół znacząco różne dla różnych parametrów wlotowych do dyszy napędowej. W tej sytuacji rodzi się wątpliwość co do uzasadnienia zaproponowanego podejścia ewaluacji modelu HEM.
W klasycznej gazodynamice dla przepływów krytycznych wystarczy bazować do oceny dokładności modelu zasadniczo na parametrach wlotowych, gdyż parametry krytyczne od których zależy wydatek są niezmiennikiem przepływu. W rozważanych przypadkach nie wiadomo, czy mamy do czynienia z przepływem krytycznym czy nie, w związku z czym przy ocenie dokładności modelu przepływu dwufazowego przez dysze należałoby się spodziewać analizy uwzględniającej parametry wylotowe bądź w przypadku przepływów krytycznych parametry krytyczne w dyszy. Uzasadnionym byłoby zatem rozważenie krytycznego stopnia suchości bądź innych parametrów od niego zależnych, wskazujących na zasadność stosowania modelu HEM, np. parametru Martinellego.
2. W Rozdziale III oraz w pracy [2] omawia się warunki pracy projektowej (tzw. on-design) oraz pozaprojektowej (tzw. off-design). Nie zostały one jednak zdefiniowane dla specyficznej strumienicy, jaką jest strumienica dwufazowa analizowana w pracy. Dla strumieni gazowych oraz parowych praca w warunkach on-design oznacza pracę w warunkach przepływu nadkrytycznego dla czynnika napędowego oraz krytycznego dla czynnika zasysanego. Powyżej progowej wartości ciśnienia wylotowego ze strumienicy przepływ zasysanego czynnika staje się podkrytyczny, co definiuje się jako off-design. Stąd podstawą do oceny pracy strumienicy jest sporządzenie charakterystyki w warunkach on- oraz off-design. W związku z powyższym należałoby oczekiwać precyzyjnej definicji pojęć warunków pracy projektowej oraz pozaprojektowej.
3. W Rozdziale III oraz w pracy [2] przedstawiono zagadnienia predykcji optymalnej geometrii komory mieszania strumienicy dwufazowej. Zasadniczym wnioskiem, jaki można wyciągnąć w oparciu o uzyskane rezultaty jest znacznie dłuższa komora mieszania w odniesieniu do geometrii przyjętej jako bazowa, zaś średnica komory mieszania dla zoptymalizowanej geometrii – nie uległa znacznym modyfikacjom. Należałoby jednak spodziewać się analizy powiązania pomiędzy uzyskanymi geometriami optymalnymi a parametrami przepływowymi zachodzącymi w komorze mieszania.

4. W Rozdziale IV oraz w pracy [3] przedstawiono zagadnienia predykcji optymalnej geometrii całej strumienicy dwufazowej za wyjątkiem dyfuzora, a w tym analizie podlega geometria dyszy napędowej: kąt rozwarcia dyszy oraz jej średnica wylotowa, a także jej odsunięcie od wlotu do cylindrycznej części komory mieszania. Z Fig. 3 w pracy [3] można wnioskować, że zastosowano jednakże dość nietypową geometrię dyszy napędowej, w której dysza w płaszczyźnie wylotowej posiada pewną znaczną grubość, nie podlegającą optymalizacji. Można spodziewać się, że taka geometria wylotu z dyszy sprzyja powstawaniu zawirowań wpływających negatywnie na wydatek strumienia zasysanego, co jest obserwowane w strumienicach jednofazowych.
5. W pracy [3] analizuje się obszar przepływu pary mokrej napędowej (ang.: primary fluid core), jednakże w zamieszczonym materiale nie zamieszczono rozkładów prędkości oraz nie omówiono co w przypadku analizowanej strumienicy rozumie się pod tym pojęciem.
6. W pracy [3] (str. 217 publikacji/str. 64 rozprawy) wyciągnięto wniosek, że dla zoptymalizowanej geometrii nie tylko poprawia się wymianę pędu, lecz także przemianę fazową czynnika napędowego. Jednakże w pracy tej nie dyskutowano zagadnień związanych z przemianą fazową zachodzącą w dyszy napędowej oraz w obszarze poza dyszą.

VI. 2. Uwagi porządkowe

Należy podkreślić staranne przygotowanie rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim.. Poniżej zawarte uwagi nie wpływają na moją jednoznacznie pozytywną 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.

- Str. 1 – powinno być NH_3 , nie zaś NH_4 .
- Str. 1 – ograniczenia zastosowań amoniaku w domowym lub mobilnym chłodnictwie nie wynikają tylko z kwestii silnego zapachu.
- Str. 5, Rozdział 1.3 – w pierwszym akapicie mowa jest o iniektorze parowo-cieczowym, nie zaś o strumienicy.

VII. Wniosek do Rady Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska, której zasadniczą część stanowią publikacje w renomowanych czasopismach naukowych, w których wkład Doktoranta wynosi co najmniej 50% oraz stanowiące spójną całość - jest wartościową pracą naukową wnoszącą fundamentalny wkład w rozwój metod modelowania strumienic dwufazowych. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod właściwych dla zagadnień badawczych mechaniki płynów, termodynamiki oraz techniki cieplnej. Zastosowane przez Doktoranta podejście w zakresie przeprowadzenia kompleksowej analizy modeli przepływów dwufazowych w zastosowaniu do strumienic dwufazowych oraz zaproponowanej metody optymalizacji geometrii strumienicy - uważam za właściwe. Praca doktorska stanowi rozwiązanie zadania naukowego i spełnia w moim przekonaniu z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Należy także wziąć pod uwagę wyjątkowo obszerny dorobek naukowy Doktoranta w postaci współautorstwa w 10 publikacjach z tzw. listy JCR o bardzo wysokich wskaźnikach naukometrycznych.

