

Prof. dr hab. inż. Stanisław DROBNIAK

e-mail: stanislaw.drobniak@pcz.pl

Częstochowa, 03.09.2023

R e c e n z j a

rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Szwarca:

**„Analiza warunków pracy i dobór parametrów geometrycznych separatora
powietrzno – olejowego dla turbiny gazowej”.**

Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej, Prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak zawarte w piśmie nr RDIME.512.8.2023.

1. Ocena ogólna.

Tematyka pracy dotyczy numerycznej analizy procesów przepływowych w separatorach oleju lotniczych turbin gazowych i optymalizacji ich konstrukcji, co pozwala zakwalifikować rozprawę do obszarów tematycznych „termodynamika” i „mechanika płynów”. **Temat pracy doktorskiej i użyte metody analizy pozwalają zakwalifikować ją do dyscypliny „Inżynieria mechaniczna”.**

Celem badań wykonanych w ramach rozprawy było sprawdzenie możliwości redukcji strat i poprawy jakości oleju smarującego w lotniczej turbinie gazowej poprzez numeryczną optymalizację konstrukcji separatora olejowego. Z przyjętego celu wynikają dwa cele zasadnicze rozprawy (naukowy i aplikacyjny), z których celem naukowym było stworzenie modelu numerycznego przepływu dwufazowego w separatorze oraz opracowanie modelu optymalizacyjnego, umożliwiającego analizę porównawczą możliwych do zastosowania rozwiązań konstrukcyjnych separatora olejowego. Aplikacyjnym celem rozprawy było opracowanie procedury projektowania optymalnych separatorów olejowych do lotniczych silników turbinowych dla potrzeb GE Avio Polska, co należy podkreślić biorąc pod uwagę, że rozprawa została wykonana we współpracy z firmą w ramach programu „doktorat wdrożeniowy”. **Tak sformułowany program pracy jest oryginalny pod względem**

Biurowo Dziekana

wpłynęło dnia 08.09.2023
RDIME/492154/2023
nr zał.

poznawczym i reprezentuje stopień złożoności co najmniej odpowiadający zwyczajowym wymaganiom przyjmowanym w pracach doktorskich. Zastosowane metody badawcze są nowoczesne i odpowiednie do analizowanych zagadnień. Zakres badań wykonanych w ramach pracy przekracza zwyczajowo spotykany w rozprawach doktorskich, gdyż nie tylko zakres badań jest znacznie szerszy niż w większości rozpraw doktorskich które znam, lecz także dlatego, że oprócz wartości poznawczych praca uwzględnia także aspekty aplikacyjne.

Pracę kwalifikuję do badań stosowanych, uzyskane wyniki mogą jednak służyć rozwojowi metod numerycznego modelowania przepływów wielofazowych w separatorach cyklonowych oraz rozwojowi metod optymalizacji separatorów olejowych w lotniczych silnikach turbinowych i dlatego też praca ma również pewną wartość podstawową.

2. Ocena szczegółowa.

Rozdz. 1 pracy jest przeglądem konstrukcji i stanu wiedzy dotyczącej układów olejowych silników lotniczych i nie ma jednolitego charakteru. Pierwszy fragment rozdziału 1 pracy zawiera uzasadnienie istotności tematyki rozprawy, rozdz. 1.1 zawiera opis konstrukcji układu olejowego lotniczego silnika turbinowego oraz charakterystykę zjawisk napowietrzania oleju i separacji kropel oleju, które stanowią o specyfice analizowanego zagadnienia, wynikającej z warunków eksploatacji silników lotniczych. Charakterystyka zjawisk przepływowych w separatorach cyklonowych jest treścią rozdz. 1.2, omówiono tu także podstawowe parametry charakteryzujące efektywność pracy separatorów. Przegląd stanu wiedzy dotyczący badań separatorów cyklonowych zamieszczono w rozdz. 1.3, omówiono tutaj typowe rozwiązania konstrukcyjne i zwrócono uwagę na specyfikę separatorów lotniczych, w których geometria jest podobna do tradycyjnych cyklonów używanych w odpylaniu gazów a zjawiska przepływowe są bardziej zbliżone do cyklonów GLCC, stosowanych w przemyśle petrochemicznym. Istotna część przeglądu literatury z rozdz. 1.3 dotyczy modelowania CFD oraz optymalizacji parametrów geometrycznych separatorów. Cytowana literatura zawiera oprócz pozycji klasycznych także pozycje nowe i najnowsze, które stanowią znaczną część cytowań. Zwracam uwagę, że oprócz zwyczajowych cytowań źródeł literaturowych dotyczących istniejących konstrukcji Doktorant omawia także perspektywiczne rozwiązania (np. PASS), to aspekt wskazujący na aktualność naukową i aplikacyjną tematyki rozprawy.

Zamieszczona w rozdziale 1 dyskusja stanu wiedzy oraz wad i zalet poszczególnych rozwiązań wskazuje na aktualność naukową podjętej tematyki, dyskusja ta wykazuje

również dobrą orientację Doktoranta w rozwiązaniach konstrukcyjnych separatorów oraz rozumieniu fizyki przepływu.

W rozdz. 1 zauważyłem następujące niedociągnięcia:

- tytuł rozdziału jest mylący, oprócz wprowadzenia w zagadnienie rozdział zawiera także przegląd konstrukcji i stanu badań,
- niejasne odniesienie do rys. 4B na str. 17
- brak wyjaśnienia dlaczego na rys. 5 linia dla $C = 130$ przypada w zakresie silników turbowentylatorowych,
- niejasne sformułowania ze str. 20, z których może wynikać, że odpowietrznik bezwładnościowy może być alternatywą dla separatora cyklonowego,
- w komentarzu na str. 21 (poniżej rys. 8) mowa o prędkości obrotowej a wymiar dotyczy prędkości liniowej.

Sformułowanie celu i zakresu rozprawy zawarto w rozdz. 2, w którym Doktorant poprawnie sformułował tezy pracy (hipotezy badawcze) i wybrał poprawne techniki badań (modelowanie CFD oraz numeryczną optymalizację). Sformułowanie tez i technik badawczych wynika z analizy stanu wiedzy przeprowadzonej w rozdziale poprzednim, również i cele pracy (naukowy i aplikacyjny) są logicznym następstwem dyskusji stanu wiedzy. Własnym wkładem Doktoranta jest propozycja objęcia programem badań wpływu poziomu oleju na jakość oleju i jego separacji, wynikająca z zauważonych w rozdz. 1 podobieństw warunków pracy separatorów lotniczych i separatorów GLCC. Ważnym elementem zaproponowanej przez Doktoranta metodyki badawczej jest założona w programie badań weryfikacja wyników obliczeń danymi z eksperymentu, którymi dysponuje firma GE Avio Polska.

Stwierdzam, że sformułowany w pracy cel jest oryginalny i ma odpowiednią wartość poznawczą i aplikacyjną, a założony w pracy program badań odpowiada zakresowi co najmniej odpowiedniemu dla prac doktorskich (oprócz badań poznawczych także i cel aplikacyjny) i zawiera elementy nowatorskie (zaproponowana przez Doktoranta analiza wpływu poziomu oleju).

W rozdz. 2 zauważyłem następujące niedociągnięcia:

- zaproponowana przez Doktoranta analiza wpływu poziomu oleju nie została ujęta w spisie tez pracy, chociaż stanowi ona własną obserwację literaturową i znalazła odzwierciedlenie w zakresie pracy,

- w omówieniu celu aplikacyjnego wspomniano o konieczności uwzględnienia w procedurach projektowej i optymalizacyjnej minimalizacji masy separatora lotniczego, który to parametr nie został uwzględniony w procedurze walidacji modelu numerycznego.

Rozdz. 3 poświęcono przeglądowi stanu wiedzy dotyczącej separatorów cyklonowych, w rozdz. 3.1 omówiono modele analityczne, natomiast w rozdz. 3.2. modele numeryczne (CFD), przy czym w dyskusji modeli CFD wyodrębniono modele turbulencji i modele oddziaływań międzyfazowych. W rozdz. 3.1 porównano wyniki obliczeń z danymi eksperymentalnymi dla separatora przebadanego w GE Avio Polska (tabl. 6) stwierdzając nieprzydatność modeli analitycznych nawet dla tych przypadków, gdzie założenia modeli odpowiadały separatorowi badanemu w eksperymencie. Jeśli nawet weryfikację przeprowadzono tylko dla spadku ciśnienia (nie dysponowano danymi dla d_{50}) to jednak zawartość tej analizy uzasadnia ograniczenie dalszych prac tylko do modeli CFD. Rozdz. 4 zawiera opis technik modelowania oddziaływań międzyfazowych i modeli turbulencji stosowanych najczęściej w numerycznym modelowaniu separatorów cyklonowych. **Zawartość rozdz. 3 i 4 wykazuje dobrą orientację Doktoranta w literaturze przedmiotu, technikach modelowania numerycznego i fizyce analizowanych procesów przepływowych.**

W rozdz. 3 i 4 zauważyłem następujące niedociągnięcia:

- tytuł rozdziału 3.1 jest nieprecyzyjny, oprócz analizy literatury zawiera on wyniki obliczeń i ich eksperymentalną weryfikację i ma zatem charakter badań wstępnych,
- wyrażenie „*charakterystyczna długość*” ze str. 51 to poprawnie „skala liniowa przepływu”,
- równania składowe modeli turbulencji to równania transportu wielkości (ostatni akapit str. 55),
- w badaniach wstępnych (rozdz. 6) użyto modelu SST, który nie został tu omówiony.

Rozdz. 5 to bardzo skrótowy opis eksperymentu, w którym na stanowisku testowym przeprowadzono pomiar sprawności separacji oraz jakości oleju dla czterech punktów pracy. Wyniki eksperymentu stanowiły niezastąpioną podstawę do oceny poprawności metodyki modelowania numerycznego. **Mimo bardzo lakonicznego opisu bardzo wysoko oceniam ten fragment pracy, rozumiejąc niechęć firmy do publikowania tego typu wyników i omawiania procedur eksperymentalnych.** Niedociągnięciem tego fragmentu pracy jest na pewno brak oceny dokładności pomiaru, co dla badań doświadczalnych jest niezbędne. Nie skomentowano również nieuwzględnienia spadku ciśnienia w procesie walidacji modelu numerycznego (patrz uwagi do rozdz. 2).

Rozdziały 6 i 7 to bardzo obszerna analiza adekwatności dostępnych w literaturze metod modelowania i własne opracowanie modelu numerycznego obejmujące:

- identyfikację struktury przepływu i zjawisk przepływowych wymagających modelowania,
- wybór sposobu aproksymacji domeny obliczeniowej i elementów składowych instalacji (np. zaworu barostatycznego),
- dobór optymalnej metodyki modelowania (oddziaływań międzyfazowych i modelowania turbulencji),
- wybór lub opracowanie odpowiednich procedur numerycznych (rodzaje elementów i sposoby inicjalizacji obliczeń) stacjonarnych i niestacjonarnych,
- wybór siatki stanowiący kompromis między wymogiem niezależności rozwiązania od siatki i możliwym do zaakceptowania czasem obliczeń.

Wynikiem badań opisanych w rozdz. 6 i 7 jest metodyka numerycznego modelowania przepływu w separatorze olejowym, umożliwiająca poprawne (bo zweryfikowane eksperymentem) modelowanie przepływu w separatorze olejowym silnika lotniczego. Liczba wniosków szczegółowych uzyskanych w poszczególnych etapach obliczeń opisanych w rozdz. 6 i 7 jest zbyt duża aby przedyskutować je tutaj, jednak są one dowodem na systematyczne i bardzo fachowe podejście Doktoranta do problematyki modelowania numerycznego. Zwracam uwagę, że analiza wyników obliczeń i ich weryfikacja nie ogranicza się do oceny zgodności z eksperymentem globalnych parametrów (jakości oleju, sprawności separacji) lecz jest ona rozszerzona o analizę poprawności modelowania zjawisk fizycznych, takich jak struktura przepływu (obecność wiru) i rozkłady pól prędkości, które pozwoliły ocenić ich zgodność z innymi niż własne danymi literaturowymi. Uzyskane wyniki potwierdziły ponadto tezę o istotnym wpływie poziomu oleju, chociaż jego uwzględnienie wymagało zastosowania złożonych procedur numerycznych. **Stwierdzam, że zarówno użyte kody obliczeniowe jak i metody numeryczne zastosowane w badaniach są nowoczesne i poprawnie dobrane do analizowanych zagadnień. Doktorant rozwiązał zagadnienie o bardzo dużym stopniu złożoności, gdyż opracował poprawnie działający i zweryfikowany doświadczeniem model numeryczny umożliwiający niestacjonarne modelowanie przepływu wielofazowego w złożonej geometrii. Zarówno w ocenie badań wstępnych z rozdz. 6 a także i w przypadku badań zasadniczych omówionych w rozdz. 7 stwierdzam, że stanowią one wzorowe rozwiązanie postawionego przed Doktorantem problemu a wyniki omówionych w tych rozdziałach badań są przekonującym potwierdzeniem sformułowanej w rozprawie hipotezy badawczej.** Słabym punktem tego fragmentu pracy jest brak uzasadnienia wyboru modelowanych konfiguracji przepływowych

dla niektórych fragmentów pracy (np. różne punkty pracy separatora z Tab. 6 dla obliczeń stacjonarnych i niestacjonarnych).

Rozdz. 8 i 9 poświęcono wielokryterialnej optymalizacji, do której wybrano metodę RSM a do tworzenia powierzchni odpowiedzi wybrano regresję nieparametryczną, realizowaną z pomocą programu Design Xplorer. Optymalizację prowadzono metodą MOGA, jako funkcje celu wybrano maksymalizację sprawności separacji i jakości oleju i minimalizację spadku ciśnienia. Analizie poddano 5 parametrów geometrycznych a dla ułatwienia obliczeń geometria optymalizowanego separatora została sparametryzowana. Istotność poszczególnych parametrów zbadano metodą frontu Pareto, przeprowadzono również analizę wrażliwości zoptymalizowanego separatora na zmianę warunków pracy. **Stwierdzam , że także i w tym przypadku użyte kody obliczeniowe jak i procedury numeryczne zostały poprawnie dobrane do analizowanych zagadnień a badania optymalizacyjne przeprowadzono wnikliwie i uwzględniono w nich potrzeby praktyki eksploatacyjnej.** Podobnie jak w rozdziałach poprzednich liczba analizowanych czynników i przebadanych przypadków jest zbyt duża aby przedyskutować je tutaj, jednak są one dowodem na systematyczne i bardzo fachowe podejście Doktoranta do problematyki modelowania numerycznego. W analizie wyników badań optymalizacyjnych Doktorant nie ograniczył dyskusji do analizy globalnych parametrów lecz podjął także próbę wyjaśnienia zauważonych trendów przez analizę pola prędkości w separatorze. **Stwierdzam, że zawartość rozdz. 8 i 9 stanowi wzorowe rozwiązanie postawionego przed Doktorantem problemu, wybór optymalizowanych parametrów i konfiguracji jest przekonująco uzasadniony potrzebami praktyki i fizyką przepływu a wyniki zamieszczone w rozdz. 9 nie tylko potwierdzają sformułowane przez Doktoranta hipotezy badawcze lecz także pokazują skuteczność opracowanej procedury modelowania i optymalizacji oraz wskazują perspektywiczne kierunki badań. W mojej ocenie obszerność podjętych badań (rozumiana jako liczba analizowanych aspektów zagadnienia) przekracza zakres zwyczajowo spotykany w rozprawach.**

W rozdziale 10 Doktorant przedstawił wnioski wynikające z modelowania CFD i badań optymalizacyjnych, wyodrębniając wnioski o charakterze naukowym i użytkowym. Jest to w moim przekonaniu podział sztuczny, biorąc pod uwagę praktyczny (wdrożeńowy) charakter rozprawy. W rozdz. 10 przedstawiono również sugestie dotyczące dalszych kierunków badań, biorąc pod uwagę bardzo szeroki zakres rozprawy i mnogość wartościowych wyników z pewnością nie było to zadanie łatwe. Doktorant sformułował tu

zalecenia dotyczące procedury projektowania separatorów olejowych, które wynikają z uzyskanych w pracy wyników.

Praca jest napisana w sposób jasny i komunikatywny, jednak język i redakcja pracy budzą wiele zastrzeżeń, liczba błędów stylistycznych jest zbyt duża aby przedstawić ich listę. Mimo iż badania zaplanowano w sposób jasny i logiczny to układ pracy jest dyskusyjny, niektóre z rozdziałów są wyraźnie mniej obszerne i zostały opatrzone mylącymi tytułami (np. rozdz. 5). Materiał graficzny jest w zdecydowanej większości opracowany bardzo starannie. Edycja tekstu nie jest staranna, w trakcie lektury znalazłem liczne błędy stylistyczne i literowe, ich liczba stanowczo przekracza możliwości przedstawienia ich spisu. Raportowanie wyników to nieodłączna część pracy naukowej i Doktorant stanowczo powinien poprawić swe umiejętności w tym zakresie.

3. K o n k l u z j a

Reasumując, przedstawiona do recenzji rozprawa jest samodzielnym rozwiązaniem złożonego zadania naukowego. Doktorant wniósł oryginalny wkład w rozwój wiedzy o modelowaniu i optymalizacji procesów w cyklonowych separatorach olejowych. Uzyskane wyniki badań mają dużą wartość poznawczą i praktyczną a ich analiza pozwala stwierdzić, że zrealizowane zostały założone cele pracy. Przeprowadzone badania dowodzą wiedzy Doktoranta w zakresie modelowania numerycznego i optymalizacji konstrukcji i stanowią potwierdzenie umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Szwarca spełnia wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.) i wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.

Lektura pracy i analiza wyników upoważniają mnie do sformułowania wniosku o wyróżnienie rozprawy, uzasadnieniem są poniższe stwierdzenia:

- Doktorant samodzielnie rozwiązał skomplikowane zagadnienie modelowania przepływu wielofazowego w złożonej geometrii i równie złożone zagadnienie optymalizacji wielokryterialnej,
- zakres badań wykonanych w pracy jest znacznie szerszy niż w większości rozpraw doktorskich także dlatego, że oprócz wartości poznawczych praca uwzględnia także aspekty aplikacyjne w sposób znacznie bliższy praktyce niż spotykany zwyczajowo w rozprawach doktorskich,

- Doktorant wykonał szeroki zakres badań nie tylko numerycznych (co jest spotykane w większości rozpraw doktorskich) lecz także potwierdził poprawność zarówno modelu numerycznego jak i zaproponowanej w pracy hipotezy badawczej eksperymentem,
- obszerność podjętych przez Doktoranta badań (rozumiana jako liczba analizowanych aspektów zagadnienia) przekracza zakres zwyczajowo spotykany w rozprawach,
- Doktorant nie poprzestał na analizie wyników badań, lecz zaproponował sposób ich wykorzystania w procedurze projektowej,
- uzyskane przez Doktoranta oryginalne wyniki wskazują kierunki dalszych, obiecujących badań.

Prof. Stanisław Drobniak

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)