

## Recenzja pracy doktorskiej

**mgra inż. Tomasza Szwarca**

pt.: „Analiza warunków pracy i dobór parametrów geometrycznych separatora powietrzno-olejowego dla turbiny gazowej”

Recenzja pracy doktorskiej została przygotowana na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej oraz pisma, nr RDIMe.512.8.2023 z dnia 26.04.2023, przesłanego przez Panią prof. dr hab. inż. Ewę Majchrzak, Przewodniczącą Rady Dyscypliny.

### 1. Wstęp

Praca doktorska Pana mgra inż. Tomasza Szwarca została zrealizowana i napisana w ramach programu doktorat wdrożeniowy we współpracy z Avio Polska. Promotorem pracy jest Pan prof. Włodzimierz Wróblewski, a promotorem pomocniczym Pan dr inż. Tomasz Borzęcki.

Motywacją podjęcia badań prezentowanych w pracy jest rozwój transportu lotniczego i potrzeba poszukiwania nowych rozwiązań celem poprawy sprawności i bezpieczeństwa pracy układów napędowych. Biorąc pod uwagę cele strategiczne, jakie dla lotnictwa wyznacza ACARE (Advisory Council for Aviation Research in Europe) w dokumencie „Flight Path 2050 Europe’s Vision for Aviation” oraz obecne wymagania dotyczące redukcji emisji dwutlenku węgla, dwutlenku siarki, tlenków azotu i sadzy, poprawa sprawności całego napędu lotniczego ma szczególne znaczenie. Sektor lotniczy charakteryzuje się ciągłym wzrostem rozwoju, przyrostem liczby realizowanych lotów oraz wzrostem liczby pasażerów. Ostatnio publikowane dane statystyczne wskazują, że pomimo gwałtownego spadku realizowanych lotów spowodowanego pandemią Covid-19, zainteresowanie transportem lotniczym bardzo szybko się regeneruje i udział tej formy transportu w globalnym rynku jest znaczący i notuje kilku procentowy przyrost rocznie. To potwierdza duże znaczenie badań nad rozwojem technologii lotniczych. Jednym z układów w napędach lotniczych, od którego zależy bezpieczeństwo pracy oraz istotnie wpływa na parametry ekologiczne i ekonomiczne całego napędu, jest system smarowania. Wobec rozwijanych koncepcji i nowych konstrukcji silników lotniczych system smarowania musi sprostać wymaganiom dotyczącym redukcji masy całego układu przy jednoczesnej poprawie efektywności smarowania i chłodzenia oleju. Należy podkreślić, że koncepcje typu „open rotor”, czy „geared turbo fan” są przykładem konieczności rozwoju przekładni lotniczych i układów wspomagających, jakim jest system smarowania.

Istotnym zagadnieniem, z jakim należy się zmierzyć w trakcie projektowania układu smarowania jest separacja powietrza od oleju. Od efektywności tego procesu zależy skuteczność smarowania i chłodzenia powierzchni par ciernych, co bezpośrednio wpływa na

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 17.08.2023  
20.08.2023  
nr ..... zat. ....



trwałość elementów i bezpieczeństwo pracy całego napędu. Efektywność separacji powietrza od oleju zależy od zastosowanego separatora, a optymalizacja jego kształtu wymaga zrozumienia zjawisk zachodzących w przepływie dwufazowym.

Doktorant definiując cele swojej pracy podzielił je na dwie grupy, cele naukowe i utylitarne. Celem naukowym jest opracowanie modelu przepływu dwufazowego w separatorze powietrzno-olejowym i wykonanie obliczeń z wykorzystaniem komercyjnego kodu CFD. Natomiast celem utylitarnym jest zaproponowanie wytycznych do projektowania separatorów w cywilnych silnikach lotniczych, co przyczyni się do opracowania nowego separatora powietrzno-olejowego spełniającego zadane ograniczenia konstrukcyjne, a jednocześnie charakteryzującego się wysoką sprawnością.

Wobec powyższego można stwierdzić, że wybrana tematyka ma istotne znaczenie poznawcze i aplikacyjne oraz spełnia kryteria prac w ramach dyscypliny „inżynieria mechaniczna”.

## 2. Charakterystyka pracy i uwagi ogólne

Praca doktorska Pana mgra inż. Tomasza Szwarca została zredagowana na 153 stronach. Materiał diskutowany w pracy ujęto w 10 rozdziałach. Pierwszy rozdział poprzedzony jest spisem symboli, natomiast spis literatury (112 pozycji), rysunków i tabel jest zamieszczony na końcu pracy.

Pierwszy rozdział jest interesującym wprowadzeniem, w którym Doktorant argumentuje znaczenie badanego zagadnienia. W pierwszej części rozdział zawiera opis układu olejowego w turbinowym silniku lotniczym oraz istotę separacji powietrza i oleju. Na tym tle przedstawione są zagadnienia przepływu w separatorze cyklonowym, konstrukcje separatorów, prowadzone badania oraz ich optymalizacja. W kolejnym rozdziale wymienione są cele i zakres pracy oraz teza i zaproponowana metodyka badawcza.

Rozdział trzeci i czwarty zawierają charakterystykę modeli separatorów cyklonowych i przepływu dwufazowego. Modele separatorów podzielone są na dwie grupy: analityczne i numeryczne. Omówione modele analityczne najczęściej są wykorzystywane do szacowania średnicy krytycznej separatora, spadku ciśnienia lub prędkości stycznej w cyklonie. Do drugiej grupy, czyli modeli numerycznych, Doktorant zalicza metody wykorzystujące modele turbulencji, metody LES (Large Eddy Simulations) lub hybrydowe DES (Detached Eddy Simulations), a także wymienia metody wykorzystywane w modelowaniu przepływu dwufazowego. Tym metodom nieco więcej miejsca poświęca w rozdziale czwartym, gdzie sformułowany jest układ równań przepływu wielofazowego oraz modele dostępne w programie Ansys/Fluent. Doktorant podkreśla, że metody typu LES i DES ze względu na duże wymagania obliczeniowe ich przydatność w analizie rzeczywistych geometrii i zadaniach optymalizacji jest ograniczona. Ponadto przywołując publikację [83], gdzie nie wykazano dobrej zgodności z wynikami badań eksperymentalnych, stwierdza, że z powyższych powodów te metody nie są rozważane w pracy. Czasochłonność to znane ograniczenie LES i DES, ale w pracy zabrakło nieco szerszej dyskusji ograniczeń wykorzystywanych modeli turbulencji dla tego typu przepływów. W większości wykorzystane modele oparte są na założeniu izotropowości turbulencji, co w przypadku analizy separatorów cyklonowych z dominującym przepływem wirowym wymagałoby szerszego komentarza.

W rozdziale piątym, Doktorant przedstawił stanowisko do badań separatora lotniczego, które jest zainstalowane w laboratorium Avio Polska, a wyniki badań zostały udostępnione do porównań z wynikami obliczeń wykonanych w ramach pracy doktorskiej.

Analiza wyników modelowania numerycznego przepływu w separatorze cyklonowym instalacji olejowej silnika lotniczego została poprzedzona wstępnymi obliczeniami dla różnych



stopni uproszczenia modelu obliczeniowego. Ewolucja modelu została przedstawiona w rozdziale szóstym, gdzie Doktorant omówił kolejne etapy formowania się modelu wykorzystanego w dalszej części pracy. Należy podkreślić, że w pierwszym kroku geometria układu przepływowego została odtworzona tak, aby uwzględnić większość jej szczegółów, co wpłynęło na trudności w uzyskaniu siatki obliczeniowej wysokiej jakości. Obliczenia wykonano dla przepływu jednofazowego i modelu turbulencji w SST. W kolejnych krokach w oparciu o wnioski z poprzednich obliczeń geometria układu przepływowego była modyfikowana i upraszczana, natomiast prace koncentrowały się na poszukiwaniu odpowiedniego modelu turbulencji i modelu przepływu dwufazowego. Ostatecznie, Doktorant podjął decyzję o wykorzystaniu w dalszej części pracy modelu RNG k- $\epsilon$  i modelu „Volume of Fluid”. Niestety zabrakło w tym miejscu jakiegoś porównania rozważanych modeli uzasadniających ten wybór.

W kolejnych etapach prowadzonych prac zostały wykonane obliczenia przepływu stacjonarnego i niestacjonarnego z wykorzystaniem wybranych modeli. W obu przypadkach wykonano test siatki obliczeniowej. Niestety ze względu na wprowadzone zmiany geometrii i zastosowaną inną siatkę obliczeniową nie można porównać ilościowo wyników obliczeń i ocenić wpływu założenia stacjonarności przepływu. Niemniej jednak, Doktorant przedstawił interesujące wyniki, co należy wyraźnie podkreślić, będące efektem czasochłonnych obliczeń. Charakterystyka modeli obliczeniowych została przedstawiona w Tab.8 i Tab.11. Pewną wątpliwość budzi zastosowanie schematu „first order” w równaniach modelu turbulencji i nasuwa pytanie: czy zastosowanie schematu o wyższej dokładności zmieniłoby uzyskane wyniki i decyzję dotyczącą wyboru modelu turbulencji. Złożoność struktury przepływu i trudność uzyskania stabilnego rozwiązania modelem przepływu stacjonarnego prowadzi do wniosku, że to sformułowanie wymaga korekty, aby model mógł być wykorzystany do optymalizacji. Jednak pomimo tych trudności, Doktorant przedstawił wyniki obliczeń wskazując na zależność prędkości przepływu w separatorze od poziomu oleju w zbiorniku oraz wpływ dystrybucji oleju w separatorze na sprawność separacji. Istotnym wnioskiem jest także stwierdzenie, że przepływ wewnątrz separatora jest silnie uzależniony od geometrii stycznego wlotu, a najwyższa wartość składowej stycznej prędkości występuje w pobliżu wlotu. Ten efekt w połączeniu z dystrybucją oleju w separatorze i zależnością sprawności separacji od poziomu w zbiorniku wpływa na złożoność analizowanego zagadnienia.

W oparciu o wnioski z wykonanych obliczeń sformułowano zadanie optymalizacji, gdzie maksymalizacja sprawności separacji i jakości oleju 0Q oraz minimalizacja spadku ciśnienia definiują funkcję celu. Do rozwiązania zadania wykorzystano aplikację moduł Desgn Xplorer w pakiecie Ansysa. Zmiennymi były trzy parametry geometryczne separatora: wysokość i szerokość wlotu oraz średnica części walcowej. W efekcie przeprowadzonej optymalizacji istotnie zmieniły się wybrane parametry geometryczne względem konfiguracji referencyjnej. Średnica separatora zmniejszyła się o 20%, a jego całkowita wysokość wzrosła o 14%, co doprowadziło do poprawy względnej wartości jakości oleju oraz mniejszego spadku ciśnienia. Uzyskana baza danych umożliwiła przeprowadzenie szczegółowej analizy wpływu parametrów geometrycznych na pracę separatora i ocenę zmian jego charakterystyk w zależności od wybranego zakresu zmian stosunku szerokości do wysokości wlotu oraz wysokości części walcowej. Doktorant przedstawił i przeanalizował także dla wybranych konfiguracji rozkład udziału fazy ciekłej w przestrzeni separatora i składowych prędkości. W ostatniej części pracy Doktorant zamieścił analizę wpływu warunków operacyjnych na parametry pracy separatora wskazując na istotny wpływ warunków pracy separatora. Parametr jakości oleju znacząco zależy od strumienia masy powietrza, który jest funkcją warunków przelotowych i obrotów turbiny. Z kolei od wartości strumienia masowego powietrza zależy spadek ciśnienia, czego konsekwencją jest zmiana ciśnienia w komorze łożyskowej silnika i efektywność uszczelnień.



Praca jest zakończona podsumowaniem i wnioskami, które zostały podzielone na dwie grupy, wnioski o charakterze naukowym i utylitarnym. Doktorant zamieścił także sugestie dotyczące dalszych badań i rozwoju stanowiska badawczego w laboratorium Avio Polska o dodatkowe metody i punkty pomiarowe.

Przedstawiona praca doktorska jest napisana w jasny sposób, chociaż nie udało się uniknąć kilku błędów i pomyłek językowych lub gramatycznych. Ogólnie układ pracy jest poprawny, ale pewne wątpliwości budzi podział niektórych rozdziałów czy sekcji. Przykładem mogą być rozdziały 3 i 4, gdzie w rozdziale 3 „Modele separatorów cyklonowych” jest podrozdział 3.2 „Modele numeryczne” charakteryzujący wykorzystywane w publikowanych pracach modele przepływu wielofazowego i modele turbulencji, a w rozdziale 4 „Modele matematyczne przepływu dwufazowego” jest nienumerowana sekcja „Modelowanie turbulencji” z krótką charakterystyką wybranych metod. Innym przykładem jest podział zadania optymalizacji na rozdziały 8 i 9 i poszczególne podrozdziały. Należy podkreślić, że zastosowany podział budzi wątpliwości, ale nie obniża wartości przedstawionych wyników.

### 3. Uwagi szczegółowe

Poza ogólnymi uwagami i komentarzami w pierwszej części recenzji nasuwają się poniższe spostrzeżenia i pytania.

1. Analizując wyniki na str. 86, Doktorant stwierdza, że w wyniku obliczeń modelem turbulencji RNG k- $\epsilon$  uzyskano dwa wiry, zewnętrzny i wewnętrzny, o tym samym kierunku obrotu. Niestety tego nie widać na rysunku 39. Proszę o wyjaśnienie tego zjawiska. Dodatkowo na tym rysunku w wybranym przekroju zaznaczono udział objętościowy oleju. Kolor czerwony wskazuje na podwyższenie poziomu oleju w środkowej strefie separatora, a obniżenie przy ścianach. Biorąc pod uwagę istnienie krętu w tej strefie, można się spodziewać, że efekt będzie odwrotny, czyli obniżenie poziomu oleju w pobliżu osi separatora, na co Doktorant zwraca uwagę w dalszej części pracy. Proszę o komentarz.
2. Wyniki obliczeń porównywane są wynikami badań na stanowisku w Avio Polska. Proszę o wyjaśnienie z jaką dokładnością wyznaczona jest jakość oleju i sprawność separacji. Jak dokładność pomiaru lub szacowanie tych wartości wpływa na porównanie zamieszczone na rys. 50.
3. Na wielu wykresach zamieszczonych w pracy prezentujących prędkość styczną w wybranych trawersach lub przekrojach wartość tej składowej wektora prędkości zmienia znak. Dlaczego? Jeśli te wykresy przedstawiają składową obwodową w przyjętym układzie współrzędnych walcowych, to należałoby spodziewać się obniżenia prędkości w pobliżu osi i wzrostu dla większego promienia, w obu kierunkach oddalania się od osi separatora. Analogicznie do rozkładów prędkości, które Doktorant przedstawił prezentując ogólną charakterystykę przepływu w separatorze (rozdział 1.2.1). Wartość może być ujemna lub dodatnia w zależności od przyjętego układu współrzędnych, ale dlaczego ona zmienia znak? Proszę o wyjaśnienie.
4. Omówiony układ równań w rozdziale 4 nie zawiera równania zachowania energii, a w dalszej części pracy nie ma informacji o założonej temperaturze oleju. Natomiast podane są zależności gęstości i lepkości w funkcji temperatury. Ponadto, w charakterystyce modelu obliczeniowego (np. Tab.8) podana jest informacja, że dla powietrza przyjęto model „ideal gas”. Proszę o wyjaśnienie, czy zmiana temperatury jest



brana pod uwagę w trakcie obliczeń. Dodatkowo proszę o komentarz, czy Doktorant analizował lub przeprowadził jakieś wstępne szacowania wpływu temperatury oleju na uzyskane rozwiązania. Zmiana lepkości może istotnie wpływać na intensywność struktur wirowych, a w konsekwencji na rozkład prędkości i wyznaczone charakterystyki separatora. Przykładem mogłaby być zmiana dystrybucji filmu olejowego, formującego się przepływu spiralnego i zwoju przedstawionego na rys. 75. Proszę o komentarz.

5. W tabeli 14 zamieszczono porównanie parametrów geometrycznych separatora zoptymalizowanego, referencyjnego oraz innych raportowanych w literaturze. Doktorant stwierdza, że żaden z badanych separatorów nie posiadał podobnych stosunków wymiarowych do separatora zoptymalizowanego. Proszę o wyjaśnienie czy wszystkie porównywane separatory mają podobne parametry pracy, czy pracują w podobnych warunkach.

#### 4. Podsumowanie

Podsumowując recenzowaną pracę uważam, że Pan mgr inż. Tomasz Szwarz przedstawił interesujące i wartościowe wyniki, istotne dla rozwoju badań nad zagadnieniami przepływu w separatorach cyklonowych do zastosowań w napędach lotniczych. W ramach przedstawionych prac opracował model obliczeniowy oraz wykonał szereg obliczeń przepływu mieszaniny powietrzno-olejowej dla różnych modyfikacji modelu. Wyniki obliczeń zostały porównane z danymi eksperymentalnymi z pomiarów na stanowisku w Avio Polska, a wnioski z wykonanych obliczeń i porównań umożliwiły sformułowanie zadania optymalizacji dla separatora lotniczego. Należy także podkreślić, że efekcie realizowanych prac opracowano metodologię projektowania separatora lotniczego, na podstawie którego zostanie wdrożona procedura w Avio Polska wykorzystywana we wstępnej fazie projektowania.

Wobec powyższego stwierdzam, że Doktorant osiągnął założone cele pracy, a przedstawione wyniki są nie tylko inspiracją do dalszych badań nad prezentowanymi zagadnieniami, ale także mają istotne znaczenie użytkowe.

Uważam, że praca Pana mgra inż. Tomasza Szwarca pt.: „Analiza warunków pracy i dobór parametrów geometrycznych separatora powietrzno-olejowego dla turbiny gazowej” odpowiada warunkom określonym w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 20.04.2023 r., poz. 742) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

