Częstochowa, 23.11.2017

Prof. dr hab. inż. Andrzej Bogusławski
Instytut Maszyn Cieplnych
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowska

Recenzja pracy doktorskiej
mgr. Tomasza Seredyna
pt.: Weryfikacja formuł matematycznych opisujących
proces ruchu kropel rozprzestrzenianych ze statku powietrznego
Promotor: Prof. dr hab. inż. Robert S. Rowiński

Praca poświęcona jest zagadnieniu matematycznego modelowania rozpylania cieczy ze statków powietrznych w zastosowaniach agrolotniczych. Z naukowego punktu widzenia zagadnienie należy do matematycznego modelowania przepływów dwufazowych i jest zapewne zagadnieniem aktualnym i bardzo interesującym, szczególnie ze względu na złożone i niestacjonarne pole prędkości w śladzie za statkiem powietrznym, w którym analizowana jest dynamika fazy ciekłej. Możliwości praktycznego wykorzystania wyników badań są jednak ograniczone, ponieważ jak stwierdza Autor we wstępie do rozprawy doktorskiej, stosowanie oprysków z powietrza jest całkowicie zakazane w Unii Europejskiej od roku 2009. Można oczekiwać, że w niedługiej przyszłości podobne regulacje zostaną wprowadzone również w Ameryce Północnej i Południowej, niemniej jednak w tych rejonach wyniki badań dziś mogłyby być wykorzystane. Tematyka pracy przynależy do dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn.

W rozdziale 3. pt. Wprowadzenie, Autor przedstawia motywację podjęcia tematu rozprawy, wskazując na zalety agrolotnictwa, ale również wymieniając zagrożenia wynikające z prowadzenia oprysków z powietrza, które mogą być zminimalizowane dzięki wiedzy na temat dynamiki fazy ciekłej w śladzie samolotu lub helikoptera. Nie bez znaczenia jest również fakt, że w Polsce nadal produkowane są samoloty i helikoptery do pracy w rolnictwie.

W rozdziale 4. przedstawiono zagadnienie rozpylania cieczy. Z punktu widzenia zasadniczego celu pracy, teoria dotycząca procesu rozpylania cieczy ma zasadnicze znaczenie, zaskakujące jest więc bardzo pobieżne potraktowanie tego zagadnienia. W całym rozdziale Autor cytuje tylko dwie prace, monografię prof. Orzechowskiego z roku 1976 oraz monografię prof. Rowińskiego z roku 1994. Trudno uznać ten rozdział za rzetelny przegląd światowego piśmiennictwa na temat procesu rozpylania cieczy, który jest niezbędny w rozprawie doktorskiej na ten temat. Wspomnieć można choćby monografię prof. Williama A. Sirignano pt.: "Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays", Cambridge University Press, 2010, która może być dobrym źródłem aktualnych informacji w tej dziedzinie. Trudno zaakceptować stwierdzenie na początku tego rozdziału, że „charakter rozpadu strugi cieczy zależy głównie od prędkości". Liczba Webera pojawia się dopiero, gdy omawiany jest problem wtórnego rozpadu kropli. Rozdział 4. nie spełnia w minimalnym nawet stopniu wymagań, jakie stawiane są przeglądowi literatury w rozprawach doktorskich. Znacznie bardziej obszerny i wyczerpujący jest rozdział 5. omawiający problematykę agrolotnictwa, prawdopodobnie bliższą Autorowi, ze znacznie większą liczbą cytowanych pozycji literaturowych. W rozdziale tym Autor nie uniknął niewielkich uchybień, np. w równaniu (5.1) użyto oznaczenia v_r, które nie występuje w wykazie oznaczeń.

W Rozdziale 6. przedstawiono czynniki wpływające na ruch kropel, które w dalszej części pracy zostały uwzględnione w modelu matematycznym. Opis ograniczono do sił masowych oraz lepkiego oporu aerodynamicznego, argumentując, że pozostałe siły, takie jak opór indukowany czy siły wyporu, są pomijalnie małe ze względu na duży stosunek gęstości kropli do gęstości ośrodka gazowego, w którym porusza się kropla. Wydaje się jednak, że wyczerpujące przedstawienie wszystkich sił oraz analiza rzędu ich wielkości wraz z uzasadnieniem pominięcia poszczególnych składników świadczyłoby o kompetencjach Autora w zakresie modelowania dynamiki kropli, nie

ograniczając się jedynie do przypadku analizowanego w pracy. Wyprowadzając równanie (6.8), określające zależność współczynnika oporu aerodynamicznego kropli dla małych prędkości, czyli dla przepływu laminarnego wokół kropli, założono, że siły oporów lepkościowych i ciśnieniowych są sobie równe, co nie jest zgodne z prawdą. Oczywiście formuła (6.8) jest poprawna, ale wynika ona jedynie z przyjęcia dla dowolnej liczby Reynoldsa związku (6.5), zgodnie z którym siła oporu aerodynamicznego jest proporcjonalna do współczynnika oporu aerodynamicznego. Dla przepływu laminarnego istnieje rozwiązanie analityczne opisujące zależność współczynnika oporu od liczby Reynoldsa, a dla poszczególnych zakresów liczby Reynoldsa, w przypadku przepływu turbulentnego, związek ten określają korelacje empiryczne. W podrozdziale 6.2 przedstawiono profil prędkości w warstwie przyziemnej. Na Rys.6.1 przedstawiono profile wiatru dla różnych kategorii terenu. Opis profili prędkości na Rys.6.1 jest jednak niezrozumiały, nie wyjaśniono również, co oznaczają poszczególne kategorie terenu użyte w tabeli 6.1. Nie wyjaśniono również oznaczeń użytych w zależnościach (6.22) oraz (6.23) opisujących kinetyczną energię turbulencji oraz szybkość jej dyssypacji. Autor w tym miejscu posługuje się niepoprawnym terminem „prędkość dyssypacji" zamiast „szybkości dyssypacji". Zależności dla kinetycznej energii turbulencji oraz szybkości jej dyssypacji są bardzo istotne, ponieważ najprawdopodobniej posłużyły do sformułowania wlotowego warunku brzegowego w dalszych obliczeniach, o czym Autor jednak nie wspomina. W podrozdziale 6.2.3, bardzo istotnym z punktu widzenia matematycznego modelowania ruchu kropel, przedstawiono wstępną analizę dynamiki ruchu kropel w polu dwuwymiarowym. Jak Autor pisze, obliczenia te miały posłużyć weryfikacji modelu turbulencji odpowiedniego dla analizowanego przypadku. Cała weryfikacja sprowadzona została jednak do stwierdzenia, że „model Transition SST jest najciekawszy, co potwierdzają liczne sugestie wielu autorów", bez cytowania jakiejkolwiek pracy. Czytelnik nie wie, jakie są cechy modelu SST szczególnie użyteczne do modelowania przepływu w turbulentnym śladzie za statkiem powietrznym. Same symulacje dwuwymiarowe, opisane bardzo skrótowo, niczego nie wyjaśniają. Czy obliczenia dotyczyły zagadnienia dwuwymiarowego płaskiego, czy osiowosymetrycznego, gdzie jest oś symetrii, jak wygląda atomizer? Na Rys.6.5 przedstawiono rozkład masy oprysku na podłożu, ale nie pokazano, gdzie to podłoże jest zlokalizowane. Stwierdzono natomiast, że ślad atomizera został prawidłowo odzwierciedlony, co trudno stwierdzić na podstawie tego rysunku. Wstępne obliczenia niczego nie wyjaśniają, natomiast nasuwają więcej pytań niż odpowiedzi.

W Rozdziale 7. Sformułowano tezę, cel i zakres pracy. Autor chce udowodnić, poprzez obliczenia wykorzystujące numeryczną mechanikę płynów, że prawidłową dynamikę ruchu kropel za statkiem powietrznym, a co za tym idzie prawidłowy rozkład masy oprysku na podłożu, można opisać dopiero wówczas, gdy wzięte zostanie pod uwagę pełne pole prędkości w śladzie za statkiem powietrznym. Tezę tę Autor chce udowodnić posługując się dwoma przypadkami testowymi, pierwszym, w którym modelowany jest ruch kropel za helikopterem, oraz drugim, za płatowcem. Szczególnie istotny wydaje się przypadek pierwszy, dla którego dostępne są wyniki badań eksperymentalnych. W następnej kolejności, w podrozdziale 7.3, przedstawiono dostępne w literaturze modele matematyczne opisujące proces oprysku ze statku powietrznego. Uwzględniono przy tym tzw. modele swobodne, które w ogóle zaniedbują zaburzenie pola prędkości za statkiem powietrznym, oraz modele związane, które biorą pod uwagę wpływ statku powietrznego. Lektura tego rozdziału jest dość trudna, ponieważ Autor przepisał z odpowiednich publikacji formuły, nie wyjaśniając nawet sensu użytych w tych formułach oznaczeń. Nie przedstawił również krytycznej analizy tych modeli. Jeden z modeli swobodnych został wykorzystany w dalszej części pracy i dwa modele związane. Może należało opisać, tylko te modele, które były zastosowane w dalszej części pracy, pokazując ich zalety w porównaniu z pozostałymi, wyjaśniając jednak sens przytoczonych równań. W podrozdziale 7.3.6 omówiono model autorski. Opis ustawień solvera w zasadzie ograniczono do informacji, że skorzystano z metody „pressure-based", nie podając jednak, który z algorytmów dostępnych w programie zastosowano. Nie powiedziano nic na temat rzędu metod numerycznych wykorzystanych w obliczeniach oraz zastosowanej metody „up-windingu", poziomu residuów, itd. Należało również w sposób jednoznaczny stwierdzić, że symulacje dotyczą wyłącznie stanu ustalonego, ponieważ równania ruchu i ciągłości sformułowano dla przepływów nieustalonych. Opisując model autorski, należy podać na tyle wyczerpujące informacje, aby czytelnik zainteresowany modelem mógł go

samodzielnie odtworzyć. Można i należy w tego typu pracach dołączyć dodatek, w którym można wydrukować wszystkie ustawienia solvera, wykorzystując automatyczny raport dostępny w programie ANSYS. Informacje na temat modelu autorskiego zawarte w omawianym podrozdziale nie są wystarczające, biorąc pod uwagę, że model jest najważniejszym osiągnięciem pracy. W rozdziale tym sformułowano hipotezę Reynoldsa, zgodnie z którą pole przepływu jest superpozycją wielkości średniej i fluktuacyjnej. W równaniu (7.109) występują jednak trzy składniki prędkości, bez wyjaśnienia ich znaczenia.

Rozdział 7.4, w którym przedstawiono wyniki obliczeń w porównaniu z wynikami eksperymentu i innych modeli, ma kluczowe znaczenie dla oceny recenzowanej rozprawy doktorskiej. W podrozdziale 7.4.1 przedstawiono wyniki uzyskane dla helikoptera. Precyzyjnie przedstawiono warunki, w jakich prowadzono badania eksperymentalne, z którymi porównano wyniki obliczeń. Natomiast model matematyczny helikoptera został całkowicie pominięty. Zagadnienie modelowania ruchu helikoptera nie jest zadaniem trywialnym. Jeśli ma stanowić zasadnicze osiągnięcie rozprawy doktorskiej, musi być precyzyjnie opisane. Nie przedstawiono metodyki modelowania śmigieł, nie przedstawiono testów gęstości siatki, nie sformułowano warunków brzegowych, nie wiadomo, czy helikopter jest w ruchu w obszarze obliczeniowym, czy jest nieruchomy, w jaki sposób modelowano podłoże, czy jest to gładka, ruchoma/nieruchoma ściana, czy uwzględniono chropowatość podłoża symulującą roślinność, dla której stosuje się opryski. W celu oceny kompetencji Autora oraz prawidłowości i ograniczeń modelu matematycznego, model ten musi być precyzyjnie sformułowany. W ocenianej pracy warunek ten nie został spełniony, w związku z tym bardzo trudno ocenić uzyskane wyniki obliczeń, szczególnie, że wyniki te bardzo odbiegają od danych eksperymentalnych. W bezpośrednim sąsiedztwie osi przelotu śmigłowca wyniki eksperymentu są trzykrotnie wyższe niż wyniki obliczeń. Przedstawiony na rysunku 7.3 procentowy rozkład masy nie został przy tym zdefiniowany, chodzi tu prawdopodobnie o gęstość tego rozkładu na jednostkę długości opryskiwanego obszaru. Autor zdaje się nie zauważać rozbieżności obliczeń z wynikami eksperymentu, porównując wyniki swojego modelu z wynikami modelu AGDISP. Co więcej, w sąsiedztwie osi przelotu śmigłowca znacznie lepszą zgodność z danymi eksperymentalnymi uzyskano przy pomocy modelu swobodnego, który pomija wpływ pola prędkości w śladzie statku powietrznego na dynamikę fazy ciekłej. Pytania te są niezwykle istotne z punktu widzenia tezy pracy. Bardzo możliwe, że model autorski i model AGDISP uwzględniają pole prędkości w śladzie śmigłowca, ale obydwa modele są błędne. Wyniki przedstawione na Rys. 7.4 powinny być początkiem pracy i walidacji modelu matematycznego danymi eksperymentalnymi. Należy poszukiwać odpowiedzi na pytanie, gdzie są przyczyny tak dużych rozbieżności wyników symulacji komputerowych i danych eksperymentalnych i czy jakość modelu można poprawić. Przedstawienie wyników w postaci histogramu, jak na Rys.7.4, który maskuje te różnice nie jest dobrym rozwiązaniem. W celu lepszego zrozumienia i interpretacji dynamiki fazy ciekłej w wirowym polu prędkości Autor analizuje rotację pola prędkości. Pole wirowości wywołane ruchem helikoptera oraz śmigłami o osiach wzajemnie prostopadłych jest zapewne bardzo złożone. Należałoby pokazać oddzielnie poszczególne składowe wektora wirowości. Na Rys.7.7 zaprezentowano linie stałych wartości modułu wirowości, przy czym, jedynie z opisu rysunku w programie ANSYS można to stwierdzić, bo w podpisie rysunku jest nieprecyzyjne określenie „rozkład wirowości". W obrazie modułu wirowości widoczne są dwie struktury wirowe o nieznanej orientacji, co dla czytelnika, który nie jest ekspertem w dziedzinie lotnictwa, nie jest oczywiste. W bezpośrednim sąsiedztwie śmigłowca widoczna jest wirowość od tylnego wirnika, nie jest natomiast widoczna wirowość od głównego śmigła, o dominującej składowej w kierunku pionowym. W następnej kolejności Autor analizuje ruch fazy ciekłej na podstawie izolinii średnic fazy dyskretnej, pokazanych na Rys. 7.8. W tym wypadku również podpis pod rysunkiem nie jest zrozumiały i jedynie opis programu ANSYS pozwala na interpretację rysunku. Analizując pierwszy rysunek Autor stwierdza, że „od razu rzuca się w oczy zastanawiająca sytuacja, gdyż widać tam, że krople bardziej masywne znajdują się bliżej jądra wirów, natomiast mniejsze, są od nich oddalone nieco bardziej". Wydaje się, że analizując Rys. 7.7 i 7.8, nie można wyciągnąć takiego wniosku. Obszar intensywnej wirowości oraz obszar, w którym pojawia się faza dyskretna są rozłączne. Na podstawie wyników symulacji można stwierdzić, że w bezpośrednim sąsiedztwie helikoptera wpływ wirowego

pola prędkości na dynamikę fazy ciekłej jest bardzo niewielki, a rozkład fazy ciekłej jest bezpośrednią konsekwencją cech konstrukcyjnych rozpylacza. W podsumowaniu tego podrozdziału stwierdzono, że wpływ struktur wirowych na ruch kropel i ich uformowanie na podłożu jest rzeczywiście bardzo silny. Wniosek ten jest dyskusyjny i wymaga ponownej, rzetelnej analizy wirowości oraz jej wpływu na dynamikę ruchu fazy ciekłej.

W podrozdziale 7.4.2 przedstawiono wyniki uzyskane dla samolotu. W tym przypadku opis modelu jest nieco bardziej obszerny, brak jednak nadal podstawowych informacji na temat warunków brzegowych. Pokazano natomiast siatkę i podano jej gęstość, nie podano jednak informacji jak wyglądały testy niezależności rozwiązania od gęstości siatki i na podstawie jakich wielkości testy te zostały przeprowadzone. Ponieważ pokazano w tym wypadku obszar obliczeniowy, na początku którego umieszczono model samolotu, to można domyślić się, że obliczenia prowadzono dla warunków ustalonych, a ruch samolotu zastąpiono prędkością powietrza na wlocie do obszaru obliczeniowego. Ponownie należy zapytać o sposób modelowania podłoża. Warunkach rzeczywistych samolot z dużą prędkością przemieszcza się względem podłoża. Jeżeli w modelu podłoże jest nieruchomą ścianą, to samolot jest względem niej nieruchomy. Ponieważ przelot odbywa się w odległości zaledwie dwóch metrów nad ziemią, to można oczekiwać, że pole prędkości, które ukształtuje się pomiędzy ruchomym samolotem i nieruchomym podłożem będzie bardzo różniło się od pola prędkości wygenerowanego przez strumień powietrza wokół nieruchomego modelu samolotu znajdującego w sąsiedztwie nieruchomej ściany. Problem ten nie jest dyskutowany w pracy, więc nie można stwierdzić w jaki sposób został rozwiązany oraz, czy Autor jest świadomy, że może on mieć bardzo istotny wpływ na jakość modelu matematycznego. W dalszej kolejności przedstawiono wektorowe pole prędkości oraz wirowość, podobnie jak poprzednio ograniczając się do przedstawienia jej modułu, dla przelotu bez wiatru bocznego i przy jego obecności. Wyniki te są zgodne z oczekiwaniami, widoczny jest wir podkowiasty w dużej odległości za samolotem. Dyskusyjny jest natomiast wynik uzyskany dla kinetycznej energii turbulencji. Maksymalny poziom kinetycznej energii turbulencji wynosi 1.8 m^2/s^2. Biorąc pod uwagę, że skala prędkości wynikająca z prędkości samolotu wynosi $U_0 = 50\ \mathrm{m/s}$, to intensywność turbulencji wynosi

$$\frac{u'}{U_0} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{U_0} \approx 2\%$$

To raczej niski poziom turbulencji, spotykany w tunelach aerodynamicznych. Autor wynik taki uzasadnia, porównując bezwzględne wartości kinetycznej energii turbulencji z danymi literaturowymi dotyczącymi przelotu szybowca, prawdopodobnie z inną prędkością niż w omawianym modelu. Poziom kinetycznej energii turbulencji powinien zostać zweryfikowany posługując się bardziej adekwatnymi danymi literaturowymi dotyczącymi symulacji numerycznych lub danych eksperymentalnych, aby wyeliminować możliwość grubego błędu. W oprogramowaniu komercyjnym producent wprowadza pewne ograniczenia, i na przykład, jeśli rozwiązanie prowadzi do ujemnej wartości kinetycznej energii turbulencji przyjmowana jest pewna minimalna wartość. Bardzo niski poziom turbulencji może być efektem działania tego typu limitera i w każdym przypadku użytkownik musi sprawdzić, czy ograniczenie takie nie zostało zastosowane w znaczącej części obszaru obliczeniowego. W przedstawionych w pracy wynikach zaskakuje brak podwyższonego poziomu kinetycznej energii turbulencji w obrębie wiru podkowiastego, co może wynikać jedynie z nieprawidłowej skali, w jakiej zaprezentowane są wyniki obliczeń. Kolejne wyniki dotyczą dynamiki fazy ciekłej. Wyniki symulacji mogą być źródłem istotnych dla praktyki wniosków, które można wykorzystać przy projektowaniu atomizerów oraz ich rozmieszczenia pod kadłubem samolotu. Wyniki symulacji wskazują, że wpływ śladu aerodynamicznego jest istotny jedynie dla kropli o najmniejszych średnicach oraz tych rozprowadzanych przez atomizery zlokalizowane najbliżej końców skrzydeł, gdzie zaznaczona jest obecność wiru. Model autorski miał też posłużyć do weryfikacji modeli uproszczonych tzn. modelu AGDISP oraz modelu zaproponowanego przez Pietruszkę. Porównanie trajektorii pojedynczej kropli o wybranej średnicy świadczyć może, że wyniki modelu Pietruszki są bliższe wynikom CFD. Porównanie wyników przedstawionych na Rys. 7.32 oraz 7.33 prowadzi jednak do wniosków przeciwnych. Zasięg oprysku jest rzeczywiście podobny do

4

modelu autorskiego, jednak maksymalna wartość procentowego rozkładu masy, w przypadku modelu Pietruszki to 1%, a w przypadku modelu autorskiego to 8%. Zaskakujący jest również wynik uzyskany dla modelu AGDISP przedstawiony w górnej części Rys. 7.33. Jeżeli w obliczeniach nie uwzględniono bocznego wiatru, to dlaczego rozkład masy jest tak silnie asymetryczny. Może jednak w tych obliczeniach uwzględniony był wiatr boczny w przeciwieństwie do modelu autorskiego i modelu Pietruszki. Autor niestety nie komentuje tych wyników w sposób, który wyjaśniałby przedstawione powyżej wątpliwości. Ostatnia część omawianego rozdziału poświęcona została porównaniu wyników uzyskanych dla samolotów o różnej masie. W części tej pokazano szereg różnych wyników, niestety na Rys. 7.35-7.40 opis programu ANSYS jest taki sam i dotyczy izolinii średnic fazy dyskretnej, co jest niezgodne z podpisami pod rysunkami. W efekcie do końca nie wiadomo, co pokazano na rysunkach. Zakładając, że podpis pod rysunkami jest prawidłowy, wyniki są trudne do interpretacji. Analizując Rys.7.36 Autor stwierdza, że dla samolotu ciężkiego ślad jest intensywniejszy, co trudno stwierdzić, gdyż na rysunkach zastosowano różne skale, przy czym dla samolotu ciężkiego zastosowano zakres mniejszy niż dla lekkiego. Rys. 7.37, na którym przedstawiono rozkład kinetycznej energii turbulencji, jest nieczytelny, bo obszar podwyższonej turbulencji zasłonięty jest szkicem samolotu. Na koniec Autor stwierdza, że różnice wynikające z masy samolotu są na tyle niewielkie, że trudno o głębszą analizę uzyskanych wyników. Z wnioskiem tym należy się zgodzić, bo wyniki pokazały, że różnice masy samolotu wynikające z ilości paliwa oraz wielkości ładunku nie mają istotnego wpływu na rozkład masy oprysku. Jednocześnie, nie można się zgodzić z kolejnym wnioskiem, że analiza tego problemu to perspektywiczny kierunek dalszych badań.

Podsumowując, w pracy przedstawiono model matematyczny procesu rozpylania cieczy ze statku powietrznego, wykorzystując przykłady helikoptera i samolotu. Modele tego typu są bardzo złożone i wymagają dużego doświadczenia i wiedzy w zakresie numerycznej mechaniki płynów jak również umiejętności posługiwania się oprogramowaniem CFD wraz z przygotowaniem własnych funkcji użytkownika. Autor recenzowanej pracy najprawdopodobniej posiada kompetencje wymagane do rozwiązania postawionego zadania. Sposób prezentacji, począwszy od przeglądu literatury aż po prezentację założeń modelu oraz interpretację wyników badań nasuwa jednak bardzo wiele wątpliwości przedstawionych w recenzji. Podstawowa teza pracy, że rozkład masowy oprysku bardzo silnie zależy od wirowego pola prędkości w śladzie za statkiem powietrznym nie została udowodniona. Rozbieżności wyników modelu i danych eksperymentalnych są bardzo duże i zostały zignorowane w pracy. W przypadku śladu za samolotem wpływ wiru podkowiastego dotyczy właściwie tylko zewnętrznych atomizerów. Wyniki te mogą być użyteczne przy projektowaniu atomizerów oraz ich rozmieszczenia pod kadłubem samolotu. Celem pracy była też ocena jakości uproszczonych modeli, których zastosowanie nie wymaga dużych mocy obliczeniowych. Ocena ta jednak nie została przeprowadzona rzetelnie. Porównując wyniki modelu CFD z modelem Pietruszki Autor zwraca uwagę na te parametry, które w obydwu modelach są zgodne, pomijając ewidentne różnice. Jeśli chodzi o model AGDISP, to w przypadku samolotu bez wiatru bocznego model ten prawdopodobnie zawiera błędy.

Biorąc pod uwagę wszystkie przedstawione błędy, braki informacji i rzetelnej analizy wyników, należałoby w konkluzji nie zgodzić się na dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony. Można jednak również założyć, że Autor adresował swoją pracę do wąskiego grona specjalistów w dziedzinie lotnictwa, dla których pewne założenia dotyczące modelu matematycznego samolotu czy śmigłowca są oczywiste. Biorąc więc pod uwagę specyficzną tematykę rozprawy, można założyć, że recenzent, który byłby ekspertem w zakresie lotnictwa, a agrolotnictwa w szczególności, być może nie sformułowałby wielu pytań postawionych w tej recenzji i wyżej ocenił recenzowaną rozprawę. Obecny recenzent nie jest ekspertem ani w zakresie lotnictwa, ani agrolotnictwa, zajmując się różnymi zagadnieniami numerycznej i eksperymentalnej mechaniki płynów.

Ostatecznie więc, pomimo przedstawionych powyżej zastrzeżeń i uwag krytycznych, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia w minimalnym stopniu wymogi stawiane przez Ustawę o Stopniach i Tytule Naukowym. Stawiam wniosek o dopuszczenie omawianej rozprawy do

publicznej obrony, oczekując, że większość podniesionych w recenzji wątpliwości zostanie wyczerpująco wyjaśniona.