

dr hab. inż. Sławomir Kubacki, prof. uczelni
Politechnika Warszawska,
Wydział Mechaniczny, Energetyki i Lotnictwa,
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej,
ul. Nowowiejska 24, 00-665, Warszawa
tel : +48.22.234.47.77, fax: +48.22.622.09.01
e-mail : slawomir.kubacki@pw.edu.pl

Warszawa, dn. 9 października 2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Michała Piotrowicza

**pt. „Oddziaływanie fali uderzeniowej z warstwą przyścienną na profilu
sprężarki lotniczej”**

I. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została sporządzona na zlecenie Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych im Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku (pismo z dn. 23 czerwca 2023).

II. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Michała Piotrowicza poświęcona jest badaniom eksperymentalnym i analizom numerycznym oddziaływania fali uderzeniowej na warstwę przyścienną rozwijającą się na profilu sprężarki lotniczej.

Uzyskane w pracy wyniki badań mają kluczowe znaczenie w zrozumieniu zjawisk przepływowych jakie mają miejsce w rzeczywistych układach takich jak wentylatory i sprężarki silników lotniczych. Doktorant zaprojektował stanowisko badawcze służące do pomiarów przepływów transonicznych i naddźwiękowych, wykonał badania eksperymentalne, porównał wyniki badań eksperymentalnych z wynikami analiz numerycznych oraz dokonał oceny uzyskanych wyników badań. Na zaprojektowanym stanowisku badawczym, możliwe jest zastosowanie różnego rodzaju technik pomiarowych takich jak czujniki ciśnienia, farby światłoczułe, wizualizacje olejowe, wizualizacje schlierena czy techniki bezinwazyjne. Wspomniane stanowisko badawcze pozwala nie tylko na badanie mechanizmu oddziaływania fali uderzeniowej na warstwę przyścienną rozwijającą się na powierzchni modelowego profilu sprężarki lotniczej, ale umożliwia również uwzględnienie wpływu przepływu wtórnego rozwijającego się u podstawy łopat/profilu. Kandydat dokonał analizy wybranych typów przepływów, w których występuje oddziaływanie fal uderzeniowych na warstwę przyścienną, z wykorzystaniem nieliniowego modelu turbulencji EARSM (ang. Explicit Algebraic Reynolds Stress model). Dokonał również oceny jakości stosowanego modelu EARSM, poprzez porównanie wyników obliczeń z uzyskanymi przez niego wynikami badań eksperymentalnych, uzyskując dobrą zgodność w zakresie opisu struktury przepływu na wlocie do palisady (układ fal uderzeniowych) i przepływu w warstwie przyściennej na stronie podciśnieniowej profilu (izentropowa liczba Macha).

Producenci silników lotniczych w procesie projektowania sprężarek czy turbin powszechnie wykorzystują techniki RANS (ang. Reynolds-averaged Navier-Stokes). Wysoka jakość klasycznych modeli turbulencji oraz modeli przejścia L-T, jest więc kluczowa w celu uzyskania poprawnego opisu złożonych zjawisk przepływowych jakie mają miejsce w ww. układach. Zjawiska fizyczne istotne w procesie projektowania to przejście laminarno-turbulentne w warstwie przyściennej na powierzchni profili, oddziaływanie fal uderzeniowych z warstwą przyścienną czy występowanie przepływów narożnych (wtórnych) w pobliżu podstawy profili/łopat. Modele RANS są walidowane i rozwijane w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych lub wyniki analiz DNS/LES (ang. Direct Numerical Simulation, Large Eddy Simulation). Opracowanie przez Doktoranta stanowisko badawcze ma więc kluczowe znaczenie w ocenie jakości dostępnych technik RANS czy metod hybrydowych RANS-LES i może posłużyć w przyszłości do poprawy wiarygodności tych technik. Metody RANS wykazują duże ograniczenia w opisie turbulentnej wymiany pędu w śladach spływowych. Istotne znaczenie mają więc również uzyskane przez Doktoranta wyniki badań eksperymentalnych w śladach za łopata, bo tego rodzaju dane eksperymentalne nie są powszechnie dostępne.

Praca Pana mgr inż. Michała Piotrowicza wnosi istotny wkład w zrozumienie procesu oddziaływania fali uderzeniowej na warstwę przyścienną dla warunków spotykanych w sprężarkach silników lotniczych. Zastosowane w rozprawie metody pasywnej kontroli przepływów umożliwią przygotowanie wytycznych do projektowania wybranych elementów silników lotniczych. Pracę uważam więc również za bardzo istotną z punktu widzenia rozwoju i poprawy jakości projektowania sprężarek silników lotniczych.

III. Struktura pracy i ocena wartości naukowej

Praca doktorska składa się z 7 rozdziałów i obejmuje 97 stron. Autor powołuje się w pracy na 63 pozycji literaturowych.

Na początku rozdziału 1, Doktorant przedstawia ogólną motywację do realizacji pracy doktorskiej. Dalej w podrozdziałach 1.2-1.6, przedstawiono przegląd podstawowych mechanizmów przejścia laminarno-turbulentnego (naturalne, „bypass”, w oderwanej warstwie przyściennej) oraz procesu relaminaryzacji przepływu, zjawiska interakcji fali uderzeniowej z warstwą przyścienną, tworzenia się stopy lambda oraz generowania się przepływów wtórnych w kanałach międzyłopatkowych. Istotnym elementem motywacyjnym do realizacji pracy, są informacje zawarte w rozdziale 1.6, dotyczące pojawiania się fal uderzeniowych na łopatkach transonicznych sprężarek osiowych w silnikach lotniczych.

Cele pracy zostały przedstawione w rozdziale 1.7. Dotyczą one identyfikacji struktury przepływu w transonicznej sprężarce, projektowania stanowiska pomiarowego do analizy oddziaływania fali uderzeniowej z warstwą przyścienną, walidacji modelu numerycznego RANS oraz analizy parametrycznej wpływu pewnych modyfikacji geometrycznych (położenia przeszkody w postaci stopnia) na przepływ na podciśnieniowej stronie łopatki sprężarki. Na str. 10 znalazło się stwierdzenie dotyczące przejścia w oderwanej warstwie przyściennej cytuję „Przejście tego typu jest efektem wzrostu ciśnienia w kierunku przeciwnym do przepływu, co wraz z siłami lepkości powoduje wyhamowanie przepływu”. Nie jest dla mnie jasne co Doktorant ma na myśli twierdząc, że efektem jest wzrost ciśnienia w kierunku przeciwnym do przepływu, czy chodzi tu o przepływ zwalniający czy przyspieszający. W tym pierwszym przypadku, typowym dla oderwanej warstwy, ciśnienie wzrasta w kierunku głównym przepływu (ang. adverse pressure gradient). Doktorant na końcu rozdziału 1.7 określa referencyjny przypadek obliczeniowy jako przypadek ‘z naturalnym przejściem’. Myślę, że Autor miał tutaj na myśli przepływ swobodny czyli przypadek bez wymuszenia przejścia L-T (bez aktywnego sterowania przepływem). Określenie ‘przejście naturalne’ może sugerować przejście wywołane oddziaływaniem fal Tollmiena-Schlichtinga.

W rozdziale 2 przedstawione są informacje dotyczące stosowanych w pracy uśrednionych równań Naviera-Stokesa dla przepływu ściśliwego, technik symulacji i modelowania przepływów turbulentnych tj. DNS, LES czy RANS. Zdefiniowano również równania transportu, stosowanego w pracy nieliniowego modelu turbulencji EARSM połączonego z dwurównaniowym modelem przejścia laminarno-turbulentnego (γ -Re θ) autorstwa Mentera i in. (2004).

W tej części mam kilka uwag:

- Na końcu str. 26 Autor wspomina o konieczności domknięcia równań w celu modelowania „przepływów płynów i gazów”. Wystarczyło użyć słowa „płynów” (gaz też jest płynem) albo użyć słów „cieczy i gazów”.
- Na str. 28 Kandydat charakteryzuje technikę DNS, jako metodę służącą do opisu przepływu na „poziomie molekularnym”. Do opisu przepływów na poziomie molekularnym służą techniki z zakresu dynamiki molekularnej, podczas gdy w metodach DNS zakłada się, że płyn jest ośrodkiem ciągłym „continuum.”
- W równ. 2.30 podano nieliniowy związek konstytutywny dla naprężeń turbulentnych. Autor nazywa składniki T_{ij} współczynnikami, w rzeczywistości są to składowe tensorów prędkości deformacji i rotacji oraz ich niezmienniki. β to są rzeczywiście współczynniki.
- Na str. 30 nad równ. 2.31 i 2.32 są informacje na temat wielkości k i ω . Wielkość k nie oznacza produkcji energii kinetycznej turbulencji, a energię kinetyczną turbulencji, natomiast ω to nie jest energia kinetyczna turbulencji, a częstotliwość struktur turbulentnych, lub jak Autor wcześniej wspomniał, wirowość turbulentna.
- W równ. 2.35 nie widzę definicji członu produkcyjnego P_k -tilde, który powinien zawierać współczynnik intermitencji.

W rozdziale 3 przedstawiono wyniki symulacji numerycznych przepływu dla palisady liniowej 2D, jak i dla palisady liniowej 3D, przyjmując warunki periodyczne wzdłuż podziałki i rozpiętości palisady, z zastosowaniem modelu EARSM połączonego z modelem przejścia L-T. Dodatkowo symulacje 3D zostały wykonane przyjmując ścianę materialną na bocznych brzegach trójwymiarowej domeny obliczeniowej (wzdłuż rozpiętości profilu). Analizy przeprowadzono również dla 4 dodatkowych wariantów geometrycznych, w których zastosowano szczeliny odprowadzające powietrze z przestrzeni obliczeniowej. Szczeliny umieszczono na powierzchni profilu w pobliżu bocznych ścian kanału. Celem tych analiz było przygotowanie wytycznych do projektowania stanowiska pomiarowego. Moim zdaniem Doktorant poprawnie dobrał model gazu, parametry siatki obliczeniowej jak i schemat numeryczny do dyskretyzacji przestrzennej równań (Tabela 3.2). Wyniki analiz 2D zostały porównane z wynikami uzyskanymi kodem MISES, stosowanym przez firmę Rolls-Royce do projektowania aerodynamicznego sprężarek. Zgodność uzyskanych wyników jest dobra, co pozwala stwierdzić, że analizowany układ łopat został prawidłowo zaprojektowany (odpowiada on warunkom spotykanym w rzeczywistym układzie). Wykonane obliczenia 3D ze ścianami na bokach domeny pokazały powstanie przepływów wtórnych w pobliżu naroży. Spowodowało to kontrakcję przepływu głównego i pojawienie się silnego oderwania warstwy przyściennej na powierzchni profilu pod stopą λ . Studium parametryczne wykonane dla różnych konfiguracji szczelin wykazało znaczącą redukcję objętości przepływu wtórnego dla przypadków nr 3 i 4 (rys. 3.8). Dla dwóch ostatnich konfiguracji uzyskano najmniejszą wartość współczynnika AVDR (ang. axial velocity density ratio) wynoszącą odpowiednio 1.19 i 1.12 (wartości bliskie 1) i najmniejszy obszar objętościowy oderwania warstwy przyściennej na stronie podciśnieniowej profilu (rys. 3.9). Zaproponowane konfiguracje były więc obiecujące.

W rozdziale 4 przedstawiono projekt stanowiska pomiarowego wyposażonego w palisadę składającą się z 2 profili, dyszę zbieżno-rozbieżną, górne i dolne ścianki pozwalające uzyskać

odpowiedni kąt wypływu czynnika na wylocie z palisady oraz ścianki z przodu i tyłu przestrzeni pomiarowej z oknami wizyjnymi (rys. 4.17). Projekt wykonano w oparciu o wyniki analiz numerycznych uzyskane we wcześniejszym etapie badań (rozdział 3). Projekt stanowiska badawczego był procesem czasochłonnym i wymagającym od Kandydata przeanalizowania dużej liczby wariantów geometrycznych układu pomiarowego, w tym przeanalizowania wpływu wzajemnego położenia profili na układ fal uderzeniowych formujących się w badanej przestrzeni. Uzyskiwany układ fal był bardzo czuły na zmiany geometryczne wybranych elementów układu. Doktorant w prawidłowy sposób przeprowadził te analizy z zastosowaniem technik numerycznych (zastosowano model EARSM). Kandydat zaprojektował dodatkowo układ wsporników na których posadowione były profile w kanale pomiarowym. Wprowadzenie wsporników doprowadziło do wzmocnienia oderwań na bocznych ściankach kanału i w konsekwencji zmieniło strukturę przepływu głównego. W celu ograniczenia niekorzystnego wpływu trójwymiarowych struktur narożnych na przepływ w kanale dokonano pewnych zmian w budowie stanowiska pomiarowego. Dodano otwory w górnej i dolnej ściance kanału celem lepszej kontroli przepływu. Opracowane stanowisko pomiarowe posłużyło do wykonania badań eksperymentalnych. Na str. 54 przedstawione zostały krótko wykonane badania eksperymentalne. Dotyczyły one wizualizacji olejowych i analiz rozkładu ciśnienia statycznego na podciśnieniowej stronie profilu wykonanych z zastosowaniem farb światłoczułych (ang. pressure sensitive paints). Wykonane zostały również wizualizacje wykonane z pomocą metody schieren, jak również dokonano pomiaru pola prędkości przed i za palisadą z pomocą anemometrii laserowej (ang. laser doppler anemometry). Doktorant nie przedstawił jednak szczegółów technicznych dotyczących zastosowanej aparatury pomiarowej, częstotliwości próbkowania (LDV), rozdzielczości przestrzennej (LDV) czy błędów pomiarowych.

W rozdziale 5 pokazano analizy przepływu wokół profilu z zastosowaniem metody EARSM z aktywnym modelem przejścia L-T dla przypadku bez sterowania przepływem z pomocą elementu geometrycznego (stopień) umieszczonego na powierzchni profilu. Wyniki zaprezentowane w tym rozdziale są interesujące. Na rys. 5.4 przedstawiono porównanie liczby Macha w dwóch przekrojach, przed i za badanym profilem. Uzyskano dobrą zgodność wyników badań numerycznych z wynikami badań eksperymentalnych. Kandydat wskazuje na różnice między numeryką, a eksperymentem, w głębokości śladu ($y=0\text{mm}$) i w wartości liczby Macha na wysokości 20 mm. Doktorant poprawnie identyfikuje źródła błędów. Uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników badań eksperymentalnych z zastosowaniem metody schlieren z wynikami badań numerycznych (rys. 5.7). Następnie na rys. 5.8, Kandydat przedstawia ciekawe porównanie wizualizacji olejowej z liniami prądu uzyskanymi z analiz numerycznych. Moim zdaniem interpretacja uzyskanych wyników jest poprawna. Porównanie jest jednak utrudnione przyjęciem różnej skali w kierunku x i z na lewym i prawym rys. 5.8. Moim zdaniem przestrzenny rozmiar struktur wirowych generowanych na ścianach bocznych kanału (rys. 5.8 i 5.11) jest większy od tego uzyskiwanego w obliczeniach. Różnice mogą wynikać z różnic w grubości warstw przyściennych rozwijających się na bocznych ścianach tunelu pomiarowego przed wlotem do palisady. Uzyskano dobrą zgodność w lokalizacji położenia fali uderzeniowej i struktury przepływu przed i za falą (rys. 5.8). Wyniki analiz numerycznych pokazane na rys. 5.13 i w tabeli 5.1 wskazują oderwaniowy profil prędkości dla przekroju 3, następnie obserwowany jest powolny proces turbulizacji przepływu widoczny na przekrojach 4 i 5 (parametr kształtu wynosi 2.42-2.10, tabela 5.1). W tabeli 5.1 brakuje wymiarów dla grubości warstwy i parametrów całkowitych. Warto byłoby dokonać porównania rozkładów współczynnika intermitencji oraz energii kinetycznej turbulencji w tych przekrojach w celu ustalenia czy turbulizacja przepływu w warstwie za falą uderzeniową jest wynikiem stopniowego aktywowania się modelu przejścia L-T, czy wynika ona z aktywowania się członu produkcyjnego w podstawowym modelu EARSM, zakładając że $\gamma=1$.

Przepływy w których występuje złożona struktura fal uderzeniowych, nie są zazwyczaj rozważane przy kalibracji modeli przejścia L-T, tak więc poprawne modelowanie przejścia L-T w tego typu przepływach może być utrudnione. Porównanie profilu prędkości z eksperymentem w odległości 20 mm za krawędzią spływu (rys. 5.14) wskazuje zbyt dużą głębokość śladu uzyskiwaną w analizach numerycznych.

W rozdziale 6 analizowane są wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych uzyskane dla przypadku referencyjnego bez sterowania przepływem oraz dla dwóch przypadków z wymuszeniem przy pomocy stopnia umieszczonego na powierzchni profilu. W pierwszym przypadku stopień znajduje się w odległości $x/c=0.16$, natomiast w drugim jest on bliżej krawędzi natarcia ($x/c=0.02$). Parametry przeszkody zostały zdefiniowane w Tabeli 6.1. Doktorant uzyskuje bardzo dobrą zgodność wyników badań numerycznych i eksperymentalnych widoczną na rozkładach izentropowej liczby Macha przedstawionych na podciśnieniowej stronie profilu (rys. 6.2) i na wizualizacjach schlierena prezentowanych na rys. 6.3. Potwierdza to poprawność zdefiniowania warunków brzegowych i schematów numerycznych oraz pokazuje wiarygodność modelu RANS. Warto zwrócić uwagę że przyjęcie przeszkody w odległości $x/c=0.16$ (model 1) nie przyczynia się do znaczących zmian w strukturze przepływu w warstwie przyściennej (rys. 6.2) pomimo znacznie bardziej złożonego układu fal od tego obserwowanego w przypadku referencyjnym. Następnie na rys. 6.4 Autor porównuje wyniki badań eksperymentalnych na powierzchni profilu uzyskanych z zastosowaniem wizualizacji olejowej z liniami prądu uzyskanymi w pobliżu profilu z zastosowaniem metod numerycznych. Porównanie jest utrudnione przyjęciem różnych skal w kierunku x i z na lewej i prawej stronie rys. 6.4. Wyniki te potwierdzają jednak zbliżony charakter oderwanej warstwy przyściennej na frontowej stronie profilu w przypadku referencyjnym i dla modelu 1, oraz wcześniejszą turbulizację przepływu dla modelu 2. Na rys. 6.7 pokazano ewolucję profili prędkości uzyskanych w analizach numerycznych wzdłuż grubości warstwy dla wybranych 5 przekrojów w kierunku głównym przepływu. Niestety pomiary eksperymentalne nie były tutaj możliwe, ze względu na małą grubość warstwy przyściennej. wynoszącą dla referencyjnego przypadku 0.16-0.33 mm w przekrojach 1-3 (rys. 6.8). Na rys. 6.8 nie podano jednostki dla grubości warstwy i dla parametrów całkowitych δ^* i δ^{**} . Wyniki pokazane na rys. 6.7 potwierdzają, po raz kolejny, duże różnice w obserwowanym charakterze przepływu w warstwie przyściennej dla modelu 2 (oderwaniowa warstwa przyścienna), w porównaniu z wynikami uzyskanymi dla przypadków referencyjnego i z zastosowaniem modelu nr 1 (oderwaniowa warstwa i później stopniowa turbulizacja przepływu). Na rys. 6.9 Doktorant prezentuje porównanie rozkładów prędkości uzyskanych w analizach numerycznych i w badaniach eksperymentalnych w śladzie za profilem. Pokazano dobrą zgodność wyników numerycznych z wynikami badań eksperymentalnych dla przypadku referencyjnego i dla modelu 1. W przypadku modelu 2 głębokość śladu uzyskana w analizach numerycznych jest za duża w stosunku do głębokości śladu uzyskanego w eksperymencie. Wydaje mi się, że w przypadku obliczeń numerycznych dla modelu 2, warstwa przyścienna ma zbyt oderwaniowy charakter na powierzchni profilu za falą uderzeniową (patrz rys. 6.8, $H=5.27-3.88$ w przekrojach 3-5), co skutkuje zbyt dużym poziomem strat obserwowanym w śladzie za łopata (rys. 6.9). W dalszej części rozdziału 6, Doktorant poprawnie analizuje wpływ zwiększenia grubości przeszkody w postaci stopnia (Tabele 6.2) na wyniki obliczeń numerycznych.

W rozdziale 7 znajduje się podsumowanie i wnioski końcowe.

IV. Szczegółowe pytania do Autora rozprawy

W niniejszym rozdziale znajdują się szczegółowe pytania do Autora rozprawy:

1. Na końcu rozdziału 2.3 przedstawione są równania transportu dla modelu przejścia L-T i dla k (równ. 2.35). Z opisu nie wynika, w jaki sposób informacja o wartości współczynnika intermitencji, γ , jest wykorzystywana w modelowaniu energii kinetycznej turbulencji. Proszę o wyjaśnienie tego sprzężenia.
2. W pracy analizy numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem nieliniowego modelu turbulencji EARSM. Czy testował Pan przed przystąpieniem do kampanii obliczeniowej modele liniowe, nie wykorzystujące równań 2.29-2.30? Jeżeli tak było, to jakie były wyniki tych analiz? Interesujące byłoby ustalenie wpływu składników nieliniowych na wyniki obliczeń w warstwie przyściennej.
3. Stosowany w pracy model przejścia L-T, zaproponowany przez Mentera i in. (2004) wykorzystuje do opisu przepływu w oderwanej warstwie przyściennej współczynnik wzmocnienia (intermitencji) większy od 1 (γ_{sep} w równ. 24 w pracy Mentera i in. 2004, ref. 55). Proszę o informację jak duże znaczenie miał ten współczynnik w kształtowaniu przepływu w oderwanej warstwie na stronie podciśnieniowej profilu?
4. Obliczenia przepływu przez palisadę wykonane zostały przyjmując ten sam poziom turbulencji jaki obserwowany był w eksperymencie, czyli ok 1% (str. 57). Czy analizował Pan wpływ warunków brzegowych dla wielkości modelowanych na wlocie do kanału tj. poziom turbulencji czy skala całkowita turbulencji na wyniki obliczeń na powierzchni łopaty? Jeżeli tak było, to jak duży był wpływ zmiany poziomu turbulencji lub skali turbulencji na przejście L-T?
5. Na str. 64-65 znajduje się krótka informacja o kalibracji wyników badań uzyskanych z zastosowaniem światłoczułych farb (PSP) z wynikami uzyskiwanymi z pomocą innych technik. Proszę o bardziej szczegółowe informacje w jaki sposób te kalibracje zostały wykonane. Czy farby mogą znacząco zmienić chropowatość powierzchni wokół której badany przepływ jest analizowany?
6. W rozdziale 4, Kandydat krótko podsumowuje uzyskane wyniki pomiarów z wykorzystaniem m.in. anemometrii laserowej oraz wizualizacji schlieren. Proszę o podanie szczegółów dotyczących zastosowanej aparatury pomiarowej, rozdzielczości przestrzennej, błędów pomiarowych? W jaki sposób realizowano posiew w badaniach eksperymentalnych z pomocą techniki laserowej, czy występowały obszary w których realizacja posiewu była utrudniona?
7. Czy pomiary eksperymentalne wymagały zachowania odpowiedniego stopnia suchości powietrza, celem uniknięcia formowania się np. fal kondensacyjnych. Jeżeli tak, to w jaki sposób radzono sobie z tym problemem?
8. Układy falowe przedstawione na rys. 6.3 a (bez wymuszenia) i 6.3 e (model 2) są do siebie podobne. Jak w tym kontekście wytłumaczyć dosyć duże różnice w rozkładach izentropowej liczby Macha obserwowane na rys. 6.2 dla przypadku bez wymuszenia i z wymuszeniem dla modelu 2? Te różnice są jeszcze bardziej interesujące gdy zestawimy wyniki przedstawione na rys. 6.3 c dla modelu 1, z tymi dla przypadku referencyjnego. Różnice w układzie falowym są duże, podczas gdy rozkłady izentropowej liczby Macha na rys 6.2 są praktycznie takie same dla modelu 1 jak dla przypadku referencyjnego. Wydaje się, że zjawiska falowe zachodzące poza warstwą przyścienną mają ograniczony wpływ na to co się dzieje w (cienkiej) laminarnej warstwie przyściennej (porównanie rys 6.3 a i c i rys. 6.2 model ref. i model 1). Proszę o Pana opinię na ten temat.
9. Na rys. 6.4 prezentowane są porównania wizualizacji olejowej z wynikami analiz numerycznych. Na lewej stronie rys. 6.4 skala w kierunku x i z wydaje się inna od tej

na stronie prawej. Proszę o informację w jaki sposób należy interpretować jakościowe różnice uzyskiwane np. na rys. e i f dla modelu 2? Obszar przestrzenny objęty przez przepływ wtórny na prezentowanej wizualizacji olejowej wydaje się być inny od tego uzyskiwanego w badaniach numerycznych. Czy to tylko wynik przyjętej skali czy model numeryczny w niewłaściwy sposób opisuje tutaj ten złożony charakter przepływu?

10. Autor podsumowuje wyniki obliczeń numerycznych na str. 79 uzyskanych dla modelu 2, stwierdzając, że warstwa przyścienna przyjmuje turbulentny charakter na początku przepływu zaraz za przeszkodą znajdującą się w odległości $x/c=0.02$. Jednak w przekrojach 1,2 i 3 (rys. 6.8) parametr kształtu przyjmuje wartości 4.23, 2.42 i 5.27 wskazując na jej oderwaniowy charakter. Dla w pełni turbulentnej warstwy przylegającej do ściany wartość parametru kształtu wynosi 1.4-1.5. Zastanawia mnie czy w analizach numerycznych warstwa przyścienna ma tutaj rzeczywiście turbulentny charakter, czy jest to raczej oderwaniowa warstwa przyścienna w której procesy turbulentne uległy szybkiemu zanikowi? Może warto byłoby pokazać rozkłady współczynnika intermitencji i energii kinetycznej turbulencji w celu uzyskania pełniejszego obrazu przepływu.

V. Podsumowanie

Pan mgr inż. Michał Piotrowicz zrealizował założone cele badawcze dotyczące identyfikacji struktury przepływu wokół profilu sprężarki transonicznej, zaprojektował stanowisko do badań oddziaływania fal uderzeniowych na warstwę przyścienną, dokonał walidacji modelu RANS i zaproponował kilka wariantów pasywnej kontroli przepływu.

Uzyskano dobrej jakości wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych z zastosowaniem modelu EARSIM w opisie przepływu na wlocie do palisady i w warstwie przyściennej. Dobra zgodność wyników numerycznych z wynikami badań eksperymentalnych (wizualizacje schlierena, izentropowa liczba Macha) pozwalają stwierdzić poprawność definicji warunków brzegowych na wlocie i wylocie z tunelu, wyboru modelu RANS oraz wyboru schematów numerycznych. Przeprowadzono szczegółową analizę oddziaływania fal uderzeniowych na przepływ w warstwie przyściennej, w tym szczególnie w okolicy stopy lambda, dokonano dyskusji wpływu warstwy przyściennej rozwijającej się na profilu sprężarki na przepływ w śladzie. Wykazane zostały ograniczenia modelu EARSIM w opisie przepływu w śladzie za profilem, co było dobrze widoczne zwłaszcza w przypadku przepływu z wymuszeniem przy pomocy stopnia znajdującego się blisko krawędzi natarcia profilu. Uzyskane wyniki badań pozwalają na lepsze zrozumienie mechanizmu oddziaływania fal uderzeniowych na przepływ w warstwie przyściennej, wpływu przepływów wtórnych generowanych przy podstawie profilu, na przepływ na podciśnieniowej stronie profilu. Praca wnosi również istotny wkład w proces projektowania sprężarek silników lotniczych.

Podsumowując, uważam, że przedłożona do recenzji praca doktorska Pana mgr inż. Michała Piotrowicza pt.: **„Oddziaływanie fali uderzeniowej z warstwą przyścienną na profilu sprężarki lotniczej”** odpowiada warunkom określonym w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym stawiane rozprawom doktorskim i **wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**



