

Warszawa, dnia 15-09-2018

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. **Piotra Tarnawskiego**
pt: Koncepcja silnika turbinowego o zasilaniu pulsacyjnym.

1. Zawartość rozprawy

Praca napisana jest w języku polskim. Zawiera 140 stron i podzielona jest na 5 rozdziałów, bibliografię i załączniki. Obejmuje:

Rozdział 1 ze wstępem i określeniem celu pracy i trzech tez.

Rozdział 2. z przedstawieniem porównania obiegów Brytona-Joule'a i Humphreya oraz koncepcji jego technicznej realizacji.

Rozdział 3. zawiera omówienie wyników obliczeń numerycznych układu turbina - pulsacyjna komora spalania dla różnych koncepcji rozrządu.

Rozdział 4. zawiera opis rozwoju i optymalizacji analizowanego rozwiązania konstrukcyjnego.

Rozdział 5. prezentuje podsumowanie pracy, weryfikację celu i tez pracy.

Bibliografię.

Praca zakończona jest jednym załącznikiem zawierającym przegląd wybranych wyników symulacji kolejnych faz pracy silnika z wirującym układem zaworowym oraz kolejnym załącznikiem zawierającym koncepcje rozrządu nie uwzględnione w głównej części pracy.

Praca zawiera także na początku spis oznaczeń.

Założonym celem pracy jest opracowanie koncepcji silnika turbowałowego o parametrach lepszych od silników istniejących.

Przyjęte tezy pracy to:

1. Osiągnięcie celu głównego przez realizację obiegu Humphreya.
2. Obieg może być zrealizowany przez proponowany zintegrowany układ wirującego rozrządu.
3. Sprawność silnika zostanie zwiększona przez wykorzystanie spalin do napędu wielostopniowego układu sprężania powietrza.

2. Zasadność podjęcia tematu

Obieg Humphreya jest znany od lat i wielokrotnie były podejmowane próby jego praktycznej realizacji.

Podstawowym problemem jest konieczność zapewnienia okresowej pracy komory spalania i związane z tym cykliczne zmiany ciśnień, temperatur i wymiarów. Jej efektywne napełnianie powietrzem, dostatecznie szczelne zamknięcie, realizacja procesu doprowadzania ciepła przez spalanie paliwa i rozprężanie spalin jest znaczącym wyzwaniem dla konstruktorów.

Doktorant podjął takie wyzwanie. Praca ma charakter koncepcyjno-obliczeniowy.

Z poznawczego i praktycznego punktu widzenia tematyka podjętej pracy jest interesująca, trudna do realizacji i ważna.

3. Ocena sposobu i stopnia rozwiązania problemu

Autor zaproponował budowę hybrydowego silnika z niekonwencjonalną pulsacyjną komorą spalania i klasycznym układem sprężania powietrza przez promieniowe sprężarki napędzane spalinami oraz mechanicznie. W pracy skoncentrował się na rozwiązaniu nietypowym, przyjmując jednocześnie szereg założeń dotyczących działania części klasycznej układu.

W pracy ani razu nie pojawił się rysunek lub schemat całego silnika. Elementy układu sprężania powietrza nie zawierają żadnych nowatorskich elementów, ale są niezwykle istotnym elementem całego układu.

Praca ma charakter rozważań teoretycznych, koncepcyjno-obliczeniowy, ograniczony do części przepływowej układu.

Analizowany problem wymaga jednoczesnego rozwiązania procesów przepływowych, procesu spalania paliw gazowych lub ciekłych, w obszarach częściowo ruchomych, w nieruchomych i wirujących układach obliczeniowych.

Do rozwiązania problemu obliczeniowego autor wykorzystał możliwości jakie w chwili obecnej dostarczają komercyjne programy CFD.

Autor opanował techniki tworzenia skomplikowanych obiektów geometrycznych wykorzystując programy CAD-owskie. Opanował też w bardzo dużym stopniu posługiwanie się programami do obliczeń przepływów w ruchomych i nieruchomych układach odniesienia oraz symulowania procesów spalania.

Jego działanie opierało się na opracowaniu hipotetycznego, wymyślonego przez niego układu przepływowego, zbudowanie jego geometrycznego i przepływowego modelu oraz wykonaniu obliczeń przepływu.

Analizując przedstawione przez autora wyniki jestem w stanie wyobrazić sobie skomplikowany i czasochłonny tryb poszukiwania logicznego rozwiązania postawionego problemu.

Działanie doktoranta zmierzające do potwierdzenia przyjętych tez pracy charakteryzują się widocznym systematycznym procesem usuwania wad przyjętych początkowo założeń i tworzenia ich modyfikacji powstających po analizie wyników obliczeń analizowanych wcześniej rozwiązań konstrukcyjnych. Autor dogłębnie analizował wyniki wykonanych obliczeń, poszukiwał ich fizycznej interpretacji, starając się odnaleźć czynniki mające istotny wpływ na otrzymanywane wyniki.

Poszukiwał przyczyn obserwowanych negatywnych objawów symulowanych przepływów.

Wykazał się bardzo dużą kreatywnością w poszukiwaniu możliwych rozwiązań technicznych analizowanego problemu.

Wyciągał sensowne i jednocześnie poprawne wnioski dotyczące działania kolejnych modeli komory spalania, układu zaworowego i układu zasilania turbiny.

Uczył się bardzo intensywnie na popełnionych błędach identyfikując je i eliminując w kolejnych przybliżeniach.

Można zaobserwować znaczący przyrost jego wiedzy o procesach zachodzących w opracowywanym układzie przepływowym.

Głównym zarzutem jaki można postawić wszystkim opracowanym i przebadanym modelom jest całkowite zaniechanie symulacji przepływów w szczelinach występujących pomiędzy ruchomymi i nieruchomymi elementami mechanicznymi układu. Przy różnicach ciśnień sięgających 1 MPa i szczelinach o wysokości rzędu 0.1 mm przecieki są niezwykle istotnym czynnikiem radykalnie zmieniającym parametry głównego przepływu.

Przyjmując nieuzasadnione założenie o braku przecieków, doktorant na ogół poprawnie wykonał symulacje przepływu w złożonych i częściowo ruchomych obszarach przepływu uzyskując istotne informacje o siłach i momentach wywołanych przepływem.

Poprawnie zostały zidentyfikowane wady pierwszego rozwiązania i zaproponowano sensowne modyfikacje.

Redukcja objętości szkodliwych występujących w kolejnych wersjach układu zaworowego, poszukiwanie zmiennego w czasie układu dysz zasilających turbinę, wydają się być istotnymi osiągnięciami przedstawionymi w pracy.

4. Uwagi krytyczne ogólne

Autor w tytule pracy i tezach zawarł koncepcję silnika turbinowego o zasilaniu pulsacyjnym, natomiast w samej pracy skoncentrował swoje wysiłki na komorze spalania, układzie rozrządu i turbinie. W pracy nie ma żadnego rysunku czy schematu całego silnika.

Zostały przyjęte arbitralne założenia co do możliwości realizacji procesu sprężania powietrza dostarczanego do komór spalania przez ogólnie określany układ wielostopniowego sprężania z chłodzeniem międzystopniowym napędzany spalinami z turbiny i częścią energii mechanicznej uzyskiwanej na wale turbiny.

Ta część obiegu silnika została założona. Czy przyjęte założenia są słuszne? Trudno powiedzieć. Założenia oparte są na uśrednionych wartościach entalpii na wlocie z turbiny lub komór spalania, co nie oznacza, iż ich zmienność w czasie i przestrzeni umożliwi pełne ich wykorzystanie. Przykładem jest Rys. 3.3 na którym energia kinetyczna spalin występuje tylko przez 25 % czasu pojedynczego cyklu - trudno tę energię zużytkować.

Autor dokonał analizy zużycia energii potrzebnej do sprężania powietrza. Wydaje się, iż ta analiza jest poprawna.

Najślabszym ogniwem obiegu jest uzyskanie energii potrzebnej do sprężania powietrza z energii spalin.

Samemu opisowi modelu płynu, obszaru obliczeniowego, użytych warunków brzegowych autor poświęcił niewiele uwagi. Przedstawił założony poziom turbulencji na wlocie do przestrzeni obliczeniowej pomijając informację o jej skali przestrzennej. Parametry turbulencji na wlocie do komory spalania mają kluczowy wpływ na przebieg procesu spalania i wydzielania ciepła.

W przypadku obliczeń przepływów, podstawowym testem użytej w obliczeniach siatki jest sprawdzenie zależności rozwiązania od jakości użytej siatki, od jej gęstości. Sprawdza się przy jakiej ilości elementów rozwiązanie przestaje się zmieniać. Praca nie zawiera takiej analizy. Zatem nie ma pewności iż użyta siatka jest właściwa.

Brak informacji o jakości siatki w pobliżu ścianek. Zwykle wartość parametru y^+ pozwala na oszacowanie jakości siatki w tym obszarze. Brak takich informacji.

Siatka obliczeniowa pokazana na rys. 29 wydaje się być znacząco za rzadka w obszarze pomiędzy łopatkami turbiny. To samo zastrzeżenie dotyczy siatki pokazanej na rys. 56.

Podstawowym brakiem w opracowanym skomplikowanym modelu przepływowym jest pominięcie istnienia nieuniknionych szczelin w układzie rozrządu wynikających z konieczności zapewnienia luzów kompensujących różne rozszerzalności elementów

ruchomych i nieruchomych obudów. W praktycznych zastosowaniach wykorzystywane są różnego rodzaju dodatkowe uszczelnienia.

Zjawisko przecieków gazów będzie występowało w szczególnym nasileniu w rozwiązaniu z wirującym rozrządem. Komora z jednej strony jest całkowicie otwarta a z drugiej jest częściowo otwarta i jest okresowo zamykana dwoma ruchomymi ścianami. W rozwiązaniu tym stosunek powierzchni szczelin pomiędzy krawędziami komory spalania a wirującym ścianami zaworów jest szczególnie wysoki.

Z praktycznego punktu widzenia komora jest nieuszczelna i nie da się w niej uzyskać zakładanych wartości ciśnień.

Należy tu także pamiętać o występowaniu bardzo dużych sił poosiowych wynikających z dużych wartości ciśnień panujących na powierzchni tarczy zaworu od strony komory spalania.

Rozwiązanie z dwoma rzędami komór spalania powoduje częściową kompensację tych sił.

Finalny wirujący układ zaworowy składa się dwóch zaworów tarczowych i jednego pierścieniowego.

Jego kompaktowa wersja z niedopasowanym oknem zasilania sprężonym powietrzem i wylotu spalin do turbosprężarek pokazana została na rys. 93, 94 i 95.

Widoczne są komory spalania całkowicie otwarte z jednej strony ze szczeliną na pierścieniowy zawór na obwodzie.

Generalnie w pracy przedstawiono zręczną koncepcję konstrukcji silnika opartego na realizacji obiegu Humphreya z dostarczaniem ciepła przy stałej objętości.

Przedstawiona koncepcja posiada szereg zalet, ale równie długi szereg wad których występowanie nie zostało uwzględnione w rozważaniach.

Brak walidacji jakiegokolwiek rozwiązania numerycznego.

5. Uwagi krytyczne szczególne i pytania

Metoda uwzględnienia wymiany ciepła z komory spalania.

Na jakich ściankach przyjmowano wymianę ciepła? Komora ma tylko kilka nieruchomych ścian. Elementy wirującego układu zaworowego stanowią okresowo niektóre ścianki komory. Jak chłodzić cienką ściankę tylną komory (tylną zgodnie z opisem na rys. 55) jeśli tuż za nią jest dysk zaworu wylotu spalin do turbosprężarek?

Jaki model płynu (jego przezroczystości) został użyty w obliczeniach wymiany ciepła przez promieniowanie?

Wątpliwość budzi przedstawiony w rozdziale 4 przyjęty sposób rozwiązywania równań opisujących przepływ płynu ściśliwego. Stosowany przez autora typ solvera (Pressure_based) oparty głównie na iteracyjnym rozwiązaniu równań zachowania jest przeznaczony do analizy przepływu płynów nieściśliwych. Przedstawione przez autora wyniki dotyczą przepływów ze stosunkami ciśnień 9:1 i liczby Macha większych od 2. To nie jest zakres parametrów do stosowania podejścia opartego na iteracyjnym rozwiązywaniu równań zachowania. Jakkolwiek nie wykluczałbym jego stosowania wymuszonego np. wymaganiami stosowanego modelu spalania.

W zasadzie powinien być stosowany solver oparty na rozwiązaniu równań Eulera (Density_based).

Jak ustawienia parametru Under Relaxation Factor mogłoby wpłynąć na uzyskane rozwiązanie?

Wolałbym się dowiedzieć jaka była liczba iteracji w jednym kroku czasowym i do jakiej wartości spadały wartości reszt na końcu procesu iteracji w ramach kroku czasowego.

Na jakiej podstawie uznano iż jakieś ustawienia solvera zawyżały moment generowany na turbinie? str. 84.

Jaki wpływ miało zastosowanie modelu k-e Realizable w porównaniu z modelem k-e?

Jak wykryto niezgodność przy bilansowaniu masy na poszczególnych etapach obiegu silnika?

Pokazane na rys.59, 60, 61, 62 przebiegi zmian parametrów przepływu wzdłuż linii prądu są trudne do interpretacji bo przedstawione są w różnych układach odniesienia (częściowo nieruchomym, a częściowo ruchomym)

6. Wartość i znaczenie rozprawy

Tematyka pracy dotyczy bardzo złożonych problemów technicznych i przepływowych. Temat interesujący poznawczo i częściowo ważny w sensie zastosowań praktycznych.

Ze względu na uproszczenia modelu przepływowego polegające na całkowitym zaniechaniu modelowania przepływu w istniejących szczelinach pomiędzy elementami ruchomymi a nieruchomą obudową, otrzymane wyniki należy traktować jako wskazujące na istnienie pewnych tendencji a nie jako wyniki liczbowe.

Znaczenie pracy polega na pokazaniu wzajemnych relacji pomiędzy różnorodnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi, pokazaniu ich zalet i wad umożliwiając dalszy rozwój idei komór spalania opartych o spalanie w stałej objętości.

Praca ma charakter głównie rozważań intelektualnych opartych na złożonych modelach przepływowych przy przyjęciu szeregu założeń upraszczających, nie zawsze uzasadnionych.

Jednak z poznawczego punktu widzenia oceniałbym wartość pracy bardzo wysoko.

Jako praca intelektualna powinna być także oceniona bardzo wysoko. Z praktycznego punktu widzenia niezwykle trudna do realizacji.

Działania doktoranta należy uznać za logicznie uzasadnione i zręcznie zrealizowane. Cały cykl rozwoju ostatecznego rozwiązania jest systematyczny, logiczny i poprawny. Świadczy o niezwyklej kreatywności autora.

6. Uwagi redakcyjne

Praca na ogół nie zawiera błędów redakcyjnych.

Miejscami język jakiego używa doktorant jest odmienny od stosowanego zwykle w opisach zjawisk przepływowych.

"rządóm" str. 21

brak "w" str. 32

"turbulentny model gazu" str. 36

"maksymalnej" str. 55

"prędkości spalin 2,2 Macha" str. 56

"linie strumienia", rys. 59-62

"W celu stabilności rozwiązania...." str. 84

Praca jest bogato ilustrowana. Na ogół rysunki są klarowne.

Pewnych trudności interpretacyjnych dostarczają rys. 42 i rys. 55.

7. Ocena doktoranta

W spisie literatury znalazłem 1 samodzielna i 2 współautorskie publikacje doktoranta.

Odnoszę wrażenie, iż autor przystępując do pracy nie posiadał wystarczającej wiedzy z dziedziny mechaniki płynów i metod numerycznych wykorzystywanych w mechanice płynów. Jednak w czasie prac w sposób bardzo znaczący taką wiedzę posiadał i rozszerzył. Wydaje się, iż głównie przez intensywne samokształcenie. Biorąc pod uwagę analizowane typy problemów zarówno przepływowych jak i związanych z modelowaniem spalania można przyjąć iż osiągnął bardzo wysoki poziom wiedzy i umiejętności w tych dziedzinach.

Jakkolwiek nie zgadzam się z niektórymi założeniami i metodami wykorzystywanymi przez doktoranta doceniam jego działania i wysoko je oceniam.

Zagadnienia przedstawione w pracy i ich rozwiązania pokazują, iż aktualnie Doktorant posiada bardzo szeroką wiedzę z mechaniki i mechaniki płynów oraz dobrą znajomość technik CFD.

W wykonanej przez doktoranta pracy najbardziej doceniam dogłębną analizę wyników otrzymanych podczas symulacji, poszukiwanie fizycznej ich interpretacji, poszukiwanie fizycznych przyczyn obserwowanych negatywnych zjawisk przepływowych i kreatywne tworzenie modyfikacji konstrukcji.

Przedstawiony w pracy ciąg rozwiązań konstrukcyjnych, ich analiza i proponowane nowatorskie rozwiązania są dowodem na bardzo wysoki poziom umiejętności zarówno inżynierskich jak i badawczych oraz pomysłowości i kreatywności doktoranta.

Oceniam, iż doktorant prezentując bardzo szeroki i interesujący głównie z naukowego i częściowo praktycznego punktu widzenia zestaw wyników jakie uzyskał, przedstawił bardzo wartościową pracę dostarczającą bogaty materiał do szerszych analiz oraz wykazał się szczególnymi umiejętnościami predysponującymi go do pracy naukowej.

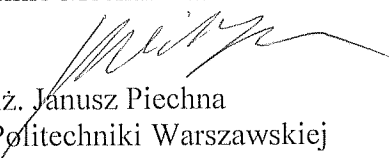
8. Konkluzja

Przedstawione powyżej krytyczne uwagi, komentarze i sugestie dotyczą problemów drugorzędnych i nie zmniejszają wagi istotnych elementów składowych oryginalnej pracy.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Tarnawskiego pt. " Koncepcja silnika turbinowego o zasilaniu pulsacyjnym ", przedstawiona przez autora stanowi oryginalne i samodzielne rozwiązanie złożonego problemu naukowego.

Spełnia zatem wymagania jakie formułuje w stosunku do prac doktorskich Ustawa z dnia 14.03.2003r. „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki” (Dz.U. 65/2003 z późn. zm.)

Stawiam wniosek o dopuszczenie pracy do publicznej obrony celem nadania jej Autorowi - mgr inż. Piotrowi Tarnawskiemu – stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie Mechanika.


Dr hab. inż. Janusz Piechna
profesor Politechniki Warszawskiej