

dr hab. inż. Mirosław KOWALSKI, prof. ITWL
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
01-494 Warszawa
ul. Księcia Bolesława 6.

Warszawa 07.03.2023.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

(na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwa i Energetyki
- pismo RDN-IŚGiE/2/2023 z dnia 09.01.2023 r.
oraz Umowa o dzieło na recenzję doktorską nr 1130/...../2023 z dnia)

Tytuł rozprawy: BADANIA PROCESU PULSACYJNEGO SPALANIA
Autor rozprawy: mgr inż. Adrian TRZECIAK
Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Marian GIERAS

1. Charakterystyka pracy

Podjęta problematyka rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adriana Trzeciaka wychodzi naprzeciw współczesnym potrzebom w zakresie rozpoznania i poprawy procesów spalania w komorach spalania silników.

Prezentuje dość nowatorskie podejście do rozpoznania czynników wpływających na przebieg i sprawność procesu spalania w pulsacyjnych komorach spalania.

Pulsacyjne komory spalania są znane od praktycznie 1906 roku, kiedy to rosyjski inżynier Karavodin opatentował pierwszy silnik pulsacyjny, a w krótkim czasie zbudował działający egzemplarz. W krótkim czasie pojawiły się inne rozwiązania tego typu silników pulsacyjnych. Niemal od samego początku pojawiły się dwa trendy rozwojowe, tj. pulsacyjne silniki zaworowe i bezzaworowe. Z tym, że pierwszy bezzaworowy silnik pulsacyjny powstał dopiero w 1950 roku. W niniejszej pracy skupiono się właśnie na pracy bezzaworowych konstrukcji pulsacyjnych komór spalania.

Do przeprowadzenia niezbędnych badań skonstruowano dość ciekawe stanowisko badawcze, co nie było zadaniem prostym, głównie ze względu na charakter pracy pulsacyjnych komór spalania, wpływ temperatury na rozszerzalność jej elementów oraz możliwe jej oddziaływanie na uzyskiwane parametry pracy. Opracowano także metodykę badania bezzaworowej pulsacyjnej komory spalania. Dokonano dość precyzyjnego pomiaru siły ciągu, bezinwazyjnie określano położenie miejsc powstawania stref spalania, wprowadzono tzw. współczynnik sprawności pozwalający m.in. na wiarygodne porównywanie sprawności różnych pulsacyjnych komór spalania. Dodatkowo przeprowadzone badania eksperymentalne uzupełniono symulacjami numerycznymi.

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter analityczno-eksperymentalny, oparty o przeprowadzone analizy literaturowe, badania stanowiskowe i symulacyjne.

Stanowi to dość nowatorskie podejście do problemu rozpoznania i oceny procesów spalania pulsacyjnego.

2. Problem badawczy - cele rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa określa w skrócie, co jest przedmiotem rozprawy, stwierdzając, że jest nim doświadczenie i teoretyczne badanie spalania pulsacyjnego oraz próba określenia czynników wpływających na przebieg i sprawność tego procesu.

Rozprawa zawiera także dwie główne tezy pracy – co jest raczej rzadko spotykane w tego typu pracach. Pierwsza teza jest stwierdzeniem, które warunkuje sprawne spalanie pulsacyjne od procesu tworzenia dobrze wymieszanej mieszaniny palnej składającej się z paliwa i powietrza. Stwierdzenie to jest ogólnie znane i to nie tylko dla tego typu komór spalania - zatem wyodrębnianie tego stwierdzenie jako odrębnej tezy pracy jest raczej zbędne. Co prawda w rozprawie Autor wykazał istotny wpływ tego procesu na charakter pracy silnika pulsacyjnego.

W drugiej tezie jest już mowa o określaniu i kreowaniu miejsc, w których mogą tworzyć się strefy spalania, a które to przy odpowiedniej znajomości aerodynamiki komory spalania mogą umożliwiać sterowanie procesem spalania pulsacyjnego w kontekście uzyskiwanych jego sprawności i ilości generowanej energii cieplnej. Teza ta jest stwierdzeniem dość innowacyjnym, której udowodnienie może stanowi istotny element w rozwoju pulsacyjnych komór spalania. Szkoda tylko, że nie podano żadnych celów, których osiągnięcie prowadziłoby bezpośrednio do udowodnienia tej tezy. Moim zdaniem, jednym z celów niniejszej pracy mogłoby być stwierdzenie przedstawione w pracy jako teza pierwsza. Wywód ten wynika z tego, że osiągnięcie celu, którego efektem jest zapewnienie prawidłowego wymieszania paliwa z powietrzem daje podstawy do racjonalnego kreowania stref spalania w celu poprawy sprawności i ilości generowanej energii cieplnej.

3. Sposób przeprowadzenia analizy źródeł i formułowania wniosków

Recenzowana rozprawa zawiera 69 pozycji literaturowych, spośród których większość została opublikowana w ciągu ostatnich dwóch dekad oraz 11 adresów stron internetowych zawierających istotne informacje w przedmiotowej kwestii. Większość z nich ma bezpośrednie odwołanie w rozprawie, a tylko dwie pozycje nr [65] i [80] nie mają odniesienia w tekście rozprawy. Wskazaniem jest również nadmienić, że istotna część zamieszczonej literatury jest obcojęzyczna – głównie w języku angielskim. Zakres tematyczny należy uznać za właściwy do realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej.

Ponadto Autor dość obszernie przeprowadził analizę literatury przedmiotu w tej tematyce, poczynając o krótkiego opisu historycznego i rozwoju silników pulsacyjnych, charakterystykę pracy znanych rozwiązań konstrukcyjnych do analizy uzyskiwanych parametrów. Na zakończenie tej analizy Autor wymienił najważniejsze problemy z zakresu

spalania pulsacyjnego, czego efektem końcowym jest krótkie uzasadnienie wyboru tematu niniejszej rozprawy doktorskiej.

Ostatecznie stwierdzam, że przeprowadzona analiza literatury przedmiotu, jest wystarczająca do zrealizowania niniejszej rozprawy.

4. Rozwiązanie postawionego zadania w rozprawie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy ogółem 155 stron. Składa się z krótkiego streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu treści, wykazu najważniejszych oznaczeń, siedmiu rozdziałów, w tym znajduje się wstęp, przegląd literatury, teza i układ rozprawy, badania i modelowanie procesów spalania pulsacyjnego, dyskusja wyników oraz wnioski. Ostatnim elementem rozprawy jest spis literatury. W sumie praca zawiera 130 rysunków i 10 tabel.

Wykaz ważniejszych oznaczeń zawiera alfabetycznie ustawiony wykaz symboli i oznaczeń zastosowanych w tekście rozprawy. Tego typu wykazy stanowią istotny element poprawiający czytelność pracy, a ponadto ograniczający wielokrotne powtarzanie niektórych opisów.

Wstęp będący jednocześnie rozdziałem pierwszym rozprawy prezentuje w pierwszej kolejności podrozdział pt. „Motywacja”, gdzie Autor zaprezentował pewne przesłanki, które skłoniły go do podjęcia tej tematyki. Rozdział ten zawarto na niecałych 2 stronach rozprawy.

Rozdział drugi to „Przegląd literatury”, gdzie Autor dość ciekawie przeprowadził analizę literatury przedmiotu oraz na zakończenie genezę tematu. Powyższe opisy zawarto na niecałych 19 stronach rozprawy.

Trzeci rozdział to „Tezy i układ rozprawy” zawarty na 1 stronie rozprawy. Ja już wcześniej wspominałem rozprawa zawiera dwie tezy pracy, ale nie przytoczono celów, których osiągnięcie prowadziłyby do udowodnienia postawionych tez. Znajduje się tutaj też bardzo skrócony opis układu pracy.

W rozdziale czwartym pt.: Badania procesów zachodzących wewnątrz pulsacyjnej komory spalania, Autor przedstawił opis badanego silnika pulsacyjnego. Autor zdecydował się na bezzaworowy silnik pulsacyjny typu „thermojet”, co wynika z jego dość prostej budowy oraz dość łatwych i prostych możliwościach jego modelowania. Wybór poprzedzono analizą literatury w zakresie tego typu konstrukcji oraz wpływu geometrii obiektu na jakość jego pracy i stabilność procesu spalania. Schemat wybranej konstrukcji silnika pulsacyjnego przedstawiono na rysunku. Dalej Autor przedstawił stanowisko badawcze i jego schemat kinematyczny. Wskazał na problemy przy jego budowie i oprzyrządowaniu pomiarowym. Dla zminimalizowania rozszerzalności liniowej silnika podparto go na dwóch podporach rolkowych, które umożliwiają swobodne przemieszczanie się silnika. Natomiast podporę stałą usytuowano w miejscu mocowania przetwornika siły do stanowiska. Do zbadania amplitudy ciśnienia wewnątrz komory, gdzie występuje duża temperatura wykorzystano przetwornik piezoelektryczny wraz z dedykowanym cyfrowym układem kondycjonowania. W dodatku umieszczono go w specjalnym płaszczu wodnym

o monitorowanej temperaturze wewnątrz. Kolejną czynnością był pomiar temperatur, który wykonano z pomocą termopar typu K. Natomiast do pomiaru natężenia przepływu paliwa wykorzystano rotometr o zakresie $1,7 \text{ g/s} \pm 17 \text{ g/s}$. podczas eksperymentu wykorzystano także kamery: termowizyjnej do filmowania ścianek komory oraz szybkiej kamery do nagrywania procesu spalania wewnątrz komory. Rejestracji poddano także natężenie dźwięku emitowanego przez silnik wykorzystując do tego specjalny mikrofon zamocowany wysięgnikowo do szczytu grodzi ogniowo-akustycznej. W trakcie badań stanowiskowych mierzono także ciśnienie w komorze spalania oraz chwilową temperaturę w przekroju wlotowym i wylotowym. Osobno opisano i zaprezentowano graficznie układ instalacji paliwowej, której czynnikiem jest gaz propan. Istotnym elementem stanowiska jest układ zmiany położenia wtryskiwaczy w przewodzie wlotowym oraz w komorze spalania, pozwalający na regulację głębokości umieszczenia wtryskiwacza względem krawędzi przewodu wlotowego. Bardzo ważnym elementem prowadzonego eksperymentu jest proces rozruchu silnika, który realizowany był na dwa sposoby w zależności od konfiguracji silnika mógł się uruchamiać samoczynnie lub z pomocą poprzez dodanie dodatkowego powietrza do komory.

W dalszej części tego rozdziału Autor dokonał analizy niepewności toru pomiarowego, którą wykonano w oparciu o metody statystyczne – chodzi o niepewność typu A i B. Niepewność standardowa została wyznaczona na podstawie błędu granicznego przy założeniu, że ma on rozkład prostokątny.

Kolejny element tego rozdziału to jakościowy opis zjawisk zachodzących w komorze spalania. Wpierw Autor przybliżył etapy pracy silnika pulsacyjnego wspomagając ten opis schematami graficznymi. Następnie przeprowadzone badania pozwoliły na określenie minimalnej średnicy wtryskiwacza i zakres wartości ciśnienia gazu podawanego do wtryskiwacza strumieniowego, aby silnik pracował stabilnie i powtarzalnie. Ustalono minimalną głębokość na jakiej należy ustawić wtryskiwacz, aby minimalizować zjawisko dopalania paliwa poza przekrojami wlotów oraz optymalny czas trwania pojedynczego uruchomienia, który zapewniłby efektywny pomiar parametrów. Określono też optymalną częstotliwość próbkowania danych pomiarowych. Etap ten pozwolił także na dokonanie szeregu zmian konstrukcyjnych stanowiska i poprawę metodyki pomiarowej, co skutkowało poprawą jakości prowadzonych badań. M.in. określono umiejscowienie stref spalania silnika i wartości uzyskiwanych parametrów pracy w zależności od typu wtryskiwacza i jego ustawienia. W dalszej części badań zbadano pracę silnika zasilanego przez wtryskiwacze wirowe, dla których m.in. określono - graficznie - procesy napełniania i kształtowania się stref spalania silnika w zależności od kierunku ich skierowania.

Ostatnim zagadnieniem tego rozdziału jest ilościowa interpretacja wyników badań, gdzie m.in. wprowadzono pojęcie dawki paliwa oznaczającej ilość paliwa dostarczanego do komory spalania podczas jednego cyklu pracy. Pojęcie to nie tylko zdefiniowano, ale też opisano zależnością będącą stosunkiem masowego natężenia przepływu paliwa do częstotliwości pracy silnika. Dalej zdefiniowano też współczynnik sprawności, będący stosunkiem amplitudy ciśnienia w komorze spalania i dawki. Ostatecznie w rozdziale tym stwierdzono, że największe sprawności osiągnięto, gdy badana komora spalania była zasilana przez wtryskiwacze wirowe o kącie rozpylania 1200, skierowane wzdłuż osi

podłużnej silnika. Ponadto stwierdzono, współczynnik sprawności wraz ze wzrostem dawki maleje do pewnych wartości, a następnie utrzymuje się na stałym poziomie.

Rozdział czwarty – moim zdaniem – jest najistotniejszy i najbardziej interesujący, który Autor zawarł na 73 stronach.

Rozdział piąty pt. Modelowanie spalania pulsacyjnego metodami CFD, obejmuje w pierwszej kolejności opis tego modelu., który został zrealizowano w środowisku Ansys Fluend19.2. W pierwszej kolejności Autor zdefiniował i opisał główne problemy tego rodzaju badan numerycznych, do których należy m.in. problem poprawnego zamodelowania przepływu krytycznego przez wtryskiwacz strumieniowy oraz uzyskanie wymaganego kształtu paliwa wypływającego z wtryskiwacza wirowego. Kolejny problem to właściwy dobór siatki obliczeniowej, który w dodatku pozwoli na dokonywanie porównań dla różnych konfiguracji podawania paliwa. Autor – moim zdaniem – dość dobrze – rozwiązał ten problem, co świadczy o dużej jego wiedzy w kwestii obliczeń wykonywanych przy wykorzystaniu metody CFD. Następny problem to wybór modelu turbulencji oraz dobór właściwego modelu spalania. Również i w tym względzie Autor wykazał się sporym doświadczeniem, a dokonane wybory poparł racjonalnymi uzasadnieniami. Jedyna uwaga z mojej strony to przyjęcie założenia o braku przewodzenia ciepła przez ściany komory spalania. co prawda Autor wyjaśnił i uzasadnił przyjęcie tego uproszczenia, nie mniej jednak wskazanym było przeprowadzenie choćby szacunkowe, jakiego rodzaju błąd w obliczeniach jest poczyniony z tego tytułu.

Kolejny podrozdział tego rozdziału został zatytułowany „Wyniki przeprowadzonych symulacji”. Wyniki wskazują na dość dużą zbieżność z uzyskanymi podczas badań eksperymentalnych, co potwierdza słuszność przyjętych założeń i właściwy dobór metody modelowania oraz symulacji procesu spalania pulsacyjnego. Wyniki porównań zaprezentowano w tabelach i na wykresach. Rozdział zawarto na 26 stronach tekstu rozprawy.

Rozdział szósty pracy pt. Dyskusja wyników, Jego głównym celem było podsumowanie przeprowadzonych badan doświadczalnych i numerycznych oraz - zdaniem Autora - uzasadnienie tezy postawionej tezy. Tutaj występuje pewna nieścisłość, gdyż tez było dwie, a ponadto brak celów pracy, uniemożliwił Autorowi udowodnienie przyjętej tezy pracy – stąd prawdopodobnie mowa tylko o uzasadnieniu postawionej tezy pracy. Pierwszym istotnym elementem tego rozdziału jest pomiar składu spalin, w którym stwierdzono, że wygenerowanie kontrolowanej stosunkowo niedużej strefy spalania powoduje większościowe wydzielanie ciepła w komorze spalania w wyniku zachodzącej reakcji spalania. Dodatkowo stwierdzono, że dość gwałtowne zatrzymanie szybkiego ochłodzenia strefy reakcji spalania może być wynikiem spalania niezupełnego. Tylko odpowiednio szybkie zmieszanie paliwa skutkuje dużą sprawnością spalania i małymi stratami ciepła do otoczenia.

Następny podrozdział określa rzeczywistą sprawność termodynamiczną. Zdefiniowano tutaj teoretyczną sprawność tego obiegu, wykorzystując do tego celu obieg Lenoira. Dodatkowo przeprowadzona analiza przebiegów ciśnienia jak i szybkość zmian tego

ciśnienia w komorze spalania wykazała ich zbliżony do sinusoidalnego kształt, bez ewidentnych obszarów stałego ciśnienia.

Zakończeniem tego rozdziału jest podsumowanie, w którym ustosunkowano się do zawartych w poszczególnych rozdziałach pracy analizach, badaniach i symulacjach.

Rozdział siódmy to wnioski, w których wskazano na potwierdzenie możliwości wpływania na pracę pulsacyjnej komory spalania poprzez głównie zmianę parametrów podawanego paliwa. Rodzaj paliwa, położenie wtryskiwacza i wydatek paliwa pozwalają na modyfikację zarówno amplitudy ciśnienia w komorze spalania, amplitudy ciągu i częstotliwości pracy komory. Ponadto wskazano, że położenie, wielkość i intensywność strefy mieszania paliwa z powietrzem uzależnione jest od zmiany rodzaju i umiejscowienia wtryskiwacza oraz wielkości jego wydatku. Ostatecznie stwierdzono, że w pracy dokonano gruntownego zweryfikowania cyklu pracy pulsacyjnej komory spalania, także potwierdzono wiarygodność i przydatność symulacji numerycznych w określaniu lokalizacji stref mieszania i spalania oraz ich kształtowania.

Stwierdzam zatem, że układ rozprawy i sposób rozwiązywania poszczególnych zagadnień jest poprawny, a przy tym w sposób jasny i czytelny opisany.

5. Oryginalność rozprawy – samodzielny dorobek Autora

Oryginalnym osiągnięciem Autora jest:

- przeprowadzenie dość ciekawej analizy aktualnie dostępnej literatury przedmiotu w kwestii konstrukcji i zasad pracy silników pulsacyjnych;
- opracowanie stanowiska badawczego i metodyki przeprowadzenia eksperymentalnych badań na pulsacyjnej komorze spalania;
- opracowanie modelu numerycznego oraz przeprowadzenie badań symulacyjnych pracy pulsacyjnej komory spalania;
- przeprowadzenie analizy uzyskanych wyników i ich graficzna prezentacja oraz poprawne podsumowanie i wyciągnięcie stosownych wniosków.

6. Uwagi ogólne pracy

Sposób realizacji pracy – od strony merytorycznej – nie budzi zastrzeżeń. Struktura pracy jest poprawna i przez to czytelna. Strona redakcyjna rozprawy jest na poziomie dobrym, choć wątpliwości dotyczą strony zapisów zależności, które umieszczano w tabelach. Oczywiście nie jest to błąd i często tak się robi, tylko wówczas ramki tabel są tworzone jako niewidzialne. Podobnie ma się sprawa z niektórymi rysunkami tworzonymi w oparciu o tabele. Kolejna uwaga dotyczy odwołań do źródeł, z których pochodzą niektóre rysunki (fotografie), a nawet jeżeli są to w pełni autorskie opracowania, to warto było napisać, że jest to opracowanie własne. Drobna uwaga dotyczy także niekonsekwencji z formatowaniem tekstu, chodzi np. o odstępy pomiędzy wierszami, np. na stronie 104 jest fragment, gdzie odstępy są pojedyncze, a nie jak w całej pracy półtorej linii.

Stwierdzone, drobne błędy i tylko natury redakcyjnej nie mają istotnego wpływu na jakość pracy oraz jej stronę merytoryczną i nie umniejszają bardzo pozytywnego jej odbioru.

7. Podsumowanie

Podsumowując stwierdzam, że opiniowana rozprawa mgr. inż. Adriana TRZECIAKA pt.: „BADANIA PROCESU PULSACYJNEGO SPALANIA” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, o których mowa w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i mieści się w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

W związku z tym wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Dodatkowo wniosek:

Ze względu na szeroki zakres pracy obejmujący badania eksperymentalne, modelowanie numeryczne i symulacje oraz profesjonalne podejście do jej realizacji wnioskuję o wyróżnienie niniejszej rozprawy doktorskiej.



