

Prof. dr hab. inż. Mirosław WENDEKER
Politechnika Lubelska
Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów
i Napędów Lotniczych

Lublin, dnia 15.05.2016 r.



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgra inż. Pawła Paliszewskiego

pt.:

„Modelowanie numeryczne procesu napełniania cylindra silnika z zapłonem iskrowym”

Recenzję opracowałem na podstawie zlecenia Prodziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. inż. Zbigniewa POPIOŁKA
– pismo l.dz. RIE-BD/4/263/2015/2016 z dnia 20.04.2016 roku.

1. Ocena celu naukowego rozprawy

Rozprawa doktorska mgra Pawła Paliszewskiego poświęcona jest modelowaniu procesu napełniania tłokowego silnika samochodowego i ulokowana została w dziedzinie nauk o budowie i eksploatacji maszyn. Chociaż silnik z zapłonem iskrowym został opracowany przez Nikolausa Otto już w 1876 roku to wciąż prowadzone są badania nad rozwojem konstrukcji samego silnika oraz układów napełniania. Tłokowe silniki spalinowe zamieniają energię chemiczną zawartą w paliwie na energię mechaniczną wykorzystując przemianę ciepła spalania w entalpię gazu roboczego a tę z kolei w pracę ruchu obrotowego wału korbowego napędzanego układem korbowo-tłokowym. W silnikach wewnętrznego spalania gazem roboczym jest początkowo mieszanka paliwowo-powietrzna zaś powietrze jest źródłem tlenu do spalania paliwa. Podczas procesu spalania powietrze i paliwo stopniowo zamieniane są w gazy spalinowe.

Od początku istnienia silników spalinowych o zapłonie iskrowym istniała potrzeba regulacji mocy silnika przez zmianę masy gazu roboczego w komorze spalania. Ponadto masa mieszanki w cylindrze wpływa na temperaturę i ciśnienie sprężania, a tym samym na zdolność mieszanki do zapłonu. Z reguły układ dolotowy silników o zapłonie iskrowym ma bardziej skomplikowaną konstrukcję od układu dolotowego silników o zapłonie samoczynnym. Głównym zadaniem układu dolotowego silników spalinowych jest równomierny rozdział powietrza do poszczególnych cylindrów oraz jego zawirowanie przed

procesem wtrysku. Zadania układu dolotowego silników ZI są dużo bardziej rozbudowane. Obok równomiernego rozdziału mieszanki (bądź powietrza w przypadku silników z wtryskiem bezpośrednim) wymaga się również odpowiedniego zawirowania ładunku w cylindrze oraz precyzyjnego odmierzenia masy powietrza zasilającego cylindry.

Ruch gazu (mieszanki gazów) wzdłuż traktu przepływowego silnika (trakt dolotowy, cylindry, trakt wylotowy) wymuszony jest głównie przez zmienne w czasie różnice ciśnień i polega na przepływie czynnika ze zbiornika o wyższym ciśnieniu do zbiornika o niższym ciśnieniu. O intensywności tego przepływu (masowego wydatku przepływu) obok wielkości różnicy ciśnień decydują parametry termodynamiczne przepływającego czynnika oraz pole powierzchni przepływu i współczynnik strat przepływu. Generalnie rzecz biorąc, można wyróżnić przepływy: z otoczenia do kolektora dolotowego, przepływy z kolektora dolotowego do indywidualnych, z kolektorów indywidualnych do cylindrów, z cylindrów do kolektorów wylotowych indywidualnych, wreszcie do kolektora wylotowego i otoczenia. Istnieją przy tym przepływy zwrotne, zwłaszcza z cylindra do traktu dolotowego (głębokość penetracji spalin starego cyklu może w pierwszej fazie otwarcia zaworu dolotowego dochodzić do kilkudziesięciu centymetrów) czy też przepływ zwrotny spalin z traktu wylotowego do cylindra. Czynnikiem ograniczającym intensywność przepływu czynnika (składającego się przecież z pojedynczych molekuł) jest lokalna prędkość dźwięku nie pozwalająca na jego szybsze poruszanie się. Przepływ powietrza w kolektorze dolotowym zakłóca wtryskiwany strumień paliwa, zjawisko unoszenia powstałych kropli paliwa przez powietrze, parowanie i mieszanie się odparowanego gazu z powietrzem.

Bezwładność przepływającego gazu powoduje, że wskutek zmiennej prędkości przepływu w czasie (wywołanej zwłaszcza cyklicznym ruchem tłoków) mogą powstać zjawiska falowe objawiające się oscylacjami ciśnienia gazu (nie związanymi ze zmiennością ciśnienia statycznego). Największy wpływ na powstawanie zjawisk falowych wywiera długość i objętość traktu przepływowego oraz częstość kolejnych zasysań będąca funkcją prędkości obrotowej wału korbowego.

Obecność nieciągłości w trakcie przepływowym (wloty do kolektorów, rozwidlenia traktu, zamknięcie przepływu zaworem) może powodować powstawanie fal uderzeniowych, najczęściej zgęszczeniowych. Zjawisko powstawania fal uderzeniowych łagodzone jest przez niezerowy współczynnik lepkości gazu, który z kolei odpowiedzialny jest za powstawanie zjawisk turbulencji przepływu, zwłaszcza w strefie przyściennej. O głębokości strefy przyściennej i oporach przepływu gazu decyduje stan powierzchni, zwłaszcza jej chropowatość.

Stan termodynamiczny gazów w silniku opisuje się zwykle traktując gazy jako półdoskonałe. Jednostkowa energia wewnętrzna oraz stała gazowa gazu wyrażane są jako funkcje temperatury (najczęściej) i ciśnienia (rzadziej). Cechy charakteryzujące zestaw procesów towarzyszących napełnianiu to zmienność warunków pracy, nieliniowe charakterystyki parametrów napełniania, cykliczność i bezwładność przebiegu procesu napełniania, obecność zjawisk falowych oraz wielowymiarowy charakter pola prędkości powietrza w trakcie dolotowym. Wymienione cechy stanowią o stopniu trudności wyznaczania współczynnika napełniania samochodowego silnika z zapłonem iskrowym.

Równocześnie wraz z rozwojem informatyki i techniki obliczeniowej widoczny jest znaczny postęp w modelowaniu procesów zachodzących w silnikach spalinowych, w tym modelowaniu przepływu czynnika w układzie dolotowym. Podstawowym zagadnieniem podczas badań symulacyjnych jest przyjęcie odpowiedniego modelu fizycznego oraz formalny opis matematyczny przyjętych zjawisk, prowadzący do powstania modelu matematycznego. Napełnianie cylindra (będące efektem przepływu w układzie dolotowym) uzależnia możliwość opisu matematycznego zjawisk od zakresu i postaci modelu fizycznego.

Liczne doniesienia naukowe dowodzą, że z punktu widzenia zgodności wyników obliczeń modelu z danymi pomiarowymi modele prostsze niewiele ustępują modelom bardziej skomplikowanym (jeżeli chodzi o uśrednianie rozkładu parametrów gazu w przestrzeni) przy znacznie krótszym czasie obliczeń. Zgodność taka dotyczy jedynie parametrów podstawowych obiegu silnikowego (sprawność napełniania), stosunkowo łatwych do zmierzenia.

W tym kontekście tematyka badawcza niniejszej rozprawy jest aktualna i nowoczesna. Mgr inż. Paweł Paliszewski słusznie zauważył, że proces napełniania posiada decydujący wpływ na wskaźniki pracy silnika o zapłonie iskrowym. Wiedząc, że geometria kolektora dolotowego wpływa na wartość stopnia napełniania cylindra, postawił problem naukowy następująco: na ile wiarygodny jest model numeryczny procesu napełniania cylindra silnika ZI, zawierający podwójny model turbulencji, dynamiczną siatkę wokół modeli zaworów i tłoka oraz uproszczony model wymiany ciepła zastąpiony przez warunek brzegowy pierwszego rodzaju. W takim świetle, postawione przez Autora zadanie naukowe należy uznać za aktualne i zgodne z najnowszymi tendencjami rozwoju silników spalinowych.

Mgr inż. Paweł Paliszewski zaproponował rozwiązanie postawionego problemu naukowego poprzez przeprowadzenie badań modelowych procesu napełniania cylindra silnika oraz badań hamownianych walidujących opracowany model.

Postawionym naukowym celem pracy było wykazanie czy numeryczny model napełniania cylindra silnika ZI umożliwia analizę wpływu elementów układu dolotowego i układu rozrządu na proces napełniania. Osiągnięcie celu ułatwi opracowanie praktycznych wskazówek dla doboru parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych układu dolotowego. Umożliwi to zmniejszenie kosztów optymalizacji układu dolotowego silników z zapłonem iskrowym przez częściowe wyeliminowanie badań silnikowych na rzecz relatywnie tańszych i łatwiejszych do wykonania badań symulacyjnych.

Dotarły do mnie dwie wersje rozprawy.

Wersja '2015, licząca 90 stron, zawierała postawione trzy tezy naukowe bez zdefiniowanego celu pracy.

Wersja '2016, licząca 96 stron, pozbawiona została też naukowych, natomiast zdefiniowano cel pracy.

Oba podejścia uważam za niewłaściwe. Rzeczywiście, postawione tezy w wersji '2015 były banalne i nienaukowe. Usuwając je w wersji '2016 Autor nie zaproponował w zamian żadnych nowych, tym razem prawidłowych. Tymczasem każda rozprawa doktorska musi mieć jasno i wyraźnie sformułowaną tezę doktorską. W czołowych uniwersytetach świata mówi się przecież nie o rozprawie doktorskiej, lecz o tezie doktorskiej, którą się przedstawia i której się broni. Sformułowanie tezy badawczej należy do trudniejszej części realizacji rozprawy doktorskiej.

Rozumiem problemy Doktoranta związane ze sformulowaniem tez doktorskich. Współczesna problematyka mechaniki płynów, którą się Autor zajmuje, stawia pierwsze dwa pytania naukowe na wyższym poziomie niż aparat pojęciowy i matematyczny, którym posługuje się mgr inż. Paweł Paliszewski.

Mechanika płynów bowiem to nie tylko dział fizyki opisujący zjawiska związane z ruchem cieczy i gazów ale także dziedzina techniki i działalności inżynierskiej, zwłaszcza silnikowej. Ruchem cieczy i gazów rządzi właściwie jedno podstawowe równanie mechaniki płynów, równanie Naviera-Stokes'a. Rozwiązanie tego równania dla przepływów turbulentnych, pozostaje nierozwiązanym problemem fizyki klasycznej i związane jest z niezwyklej wrażliwością przepływów turbulentnych na niewielkie zakłócenia warunków początkowych. Drugim wyzwaniem dla mechaniki płynów jest zagadnienie przepływów w mikroskalach (nano-przepływów o skalach porównywalnych z wielkością molekuł płynu). Wówczas uwzględnienie nie tylko obecności molekuł płynu ale również wzajemnych między nimi oddziaływań jest wyjątkowo skomplikowanym zagadnieniem naukowym.

Na szczęście dla Doktoranta istnieje wyzwanie naukowe stawiane mechanice płynów związane z szerokim wprowadzeniem do praktyki inżynierskiej oprogramowania do komputerowego modelowania przepływów (*Computational Fluid Dynamics – CFD*). Wprowadzone narzędzia nie tylko ułatwiły pracę inżynierom ale postawiły im wymagania, które zmniejszyły różnice pomiędzy pracą inżyniera i naukowca. Współczesny inżynier zajmujący się modelowaniem przepływów silnikowych nie korzysta z gotowych i sprawdzonych przez specjalistów rozwiązań, lecz korzystając z oprogramowania CFD sam definiuje i rozwiązuje układ równań. Do prawidłowego rozwiązania takich równań potrzebna jest znajomość technik numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych, formułowania warunków brzegowych i wielu zagadnień, którymi kiedyś zajmowali się tylko matematycy i fizycy – specjaliści z mechaniki płynów. Użycie oprogramowania CFD ułatwia pracę inżyniera poprzez odciążenie go od czasochłonnych czynności związanych z uzyskiwaniem rozwiązań, lecz jednocześnie bardzo zwiększa zakres wiedzy niezbędnej do prawidłowego modelowania obiektu.

W tym kontekście rozprawa doktorska Pawła Paliszewskiego jest właściwie postawiona jako praca naukowa zaś opracowany model procesu napełniania wykorzystujący narzędzia CFD spełnia wymogi stawiane podejściu naukowemu, a nie tylko inżynierskiemu. Autor nie zwerbalizował tezy naukowej, która według mnie powinna brzmieć następująco:

Opracowany model numeryczny procesu napełniania cylindra silnika ZI, wykorzystujący modelowanie CFD, zawierający podwójny model turbulencji, dynamiczną siatkę wokół modeli zaworów i tłoka oraz uproszczony model wymiany ciepła zastąpiony przez warunek brzegowy pierwszego rodzaju, umożliwia analizę wpływu elementów układu dolotowego i układu rozrządu na proces napełniania. Dzięki temu konstruktor uzyska cenne informacje i wytyczne do kształtowania geometrii elementów silnikowych.

Postawione zadanie naukowe spełnia w sposób dostateczny wymagania stawiane rozprawie doktorskiej. Tematyka rozprawy jest aktualna i zgodna z kierunkami badań silników samochodowych, szczególnie w aspekcie rozwoju metod projektowania maszyn.

2. Ocena sposobu realizacji celu naukowego rozprawy

Podczas analizy stanu wiedzy Doktorant przybliżył problematykę napełniania cylindra, wymiany ładunku oraz modelowania numerycznego. Scharakteryzował aspekty powstawania zjawisk falowych w kolektorze i zawirowań czynnika wypełniającego cylinder. Podczas analizy modelowania numerycznego procesów zachodzących w cylindrach silników ZI zwrócił uwagę na problemy wymiany ciepła, modelowania turbulencji, dyskretyzacji oraz uproszczeń geometrycznych.

Analiza stanu wiedzy umożliwiła Autorowi sformułowanie kilku wniosków dotyczących procesu napełniania, związanych z koniecznością badań doświadczalnych zawirowania czynnika roboczego w cylindrze, niezbędnymi uproszczeniami modelowania, możliwościami zastąpienia ciśnieniowym warunkiem brzegowym połączeń elementów układu dolotowego, zastąpienia podmodeli wymiany ciepła przez warunek brzegowy pierwszego rodzaju (założenie stałych temperatur w wybranych elementach) czy też wymogu zastosowania dynamicznej siatki podczas modelowania geometrii elementów ruchomych.

Sformułowane wnioski pozwoliły określić cel pracy, którym stało się zbudowanie modelu numerycznego procesu napełniania cylindra silnika ZI oraz przeprowadzenie badań wpływu profili otwarcia zaworów, geometrii kolektora dolotowego oraz wartości obciążenia i prędkości obrotowej na współczynnik napełnienia i rozkład ciśnienia w kolektorze. Model powinien również umożliwić ocenę wpływu geometrii kolektora i profilu otwarcia zaworów na powstawanie i rozwój zawirowań w cylindrze.

Realizacja pracy przebiegła w trzech etapach:

- teoretycznego opisu zawirowań w cylindrze oraz kinematyki rozrządu,
- budowy i weryfikacji modelu procesu napełniania,
- badań symulacyjnych wpływu czasu otwarcia zaworu dla dwóch wybranych profili na ilościową efektywność napełnienia cylindra przy różnych prędkości obrotowych oraz analizy zasadności stosowania kolektora dolotowego typu ram-air w silniku m20b27.

Dla osiągnięcia postawionego celu pracy mgr inż. Paweł Paliszewski przeprowadził prace modelowe oraz weryfikacyjne badania hamowniane na stanowisku wyposażonym w silnik badawczy z zapłonem iskrowym. Określił główne cechy modelu, na które składają się: założenia upraszczające, definicja systemu, opis elementów, z których model jest zbudowany oraz charakterystyka zmiennych modelowych. Celem modelowania było odzwierciedlenie działania rzeczywistego systemu, czyli wygenerowanie określonej odpowiedzi na zadane wymuszenie. Określił zmienne niezależne modelu stanowiące zbiór wymuszeń oraz

odpowiadające wymuszeniom zmienne zależne (zbiór odpowiedzi). Zbudowany model odwzorowywał wydzieloną część jednostki napędowej, która obejmowała kolektor dolotowy, jedną komorę spalania wraz z zaworami (dolotowym i wydechowym) oraz kolektor wylotowy. Podczas realizacji pracy przeprowadził eksperymentalną identyfikację współczynników modelu. Efektem przeprowadzonej identyfikacji jest szczegółowy wykaz współczynników modelu i otrzymany błąd obliczeń. Walidacji modelu Autor dokonał poprzez porównanie symulowanych i zmierzonych wartości ciśnienia w cylindrze silnika. Ze względu na brak możliwości przeprowadzenia indykacji jednostki m20b27, w celu walidacji do modelu mgr inż. Paweł Paliszewski wprowadził geometrię wzorowaną na silniku 170A1.046. Obliczył sumaryczny błąd względny modelu na 15–16%.

Tak zweryfikowany model wykorzystał do przeprowadzenia wielowariantowej analizy wpływu profilu otwarcia zaworów, geometrii kolektora dolotowego oraz geometrii dysz wlotowych do kolektora typu ram-air na sprawność procesu napełniania. Uzyskane wyniki symulacji pokazują różnicę w sprawności napełnienia dla porównywanych profili otwarcia zaworów. Zastosowanie profilu sportowego spowodowało zwiększenie sprawności napełniania o 11 punktów procentowych dla prędkości maksymalnej. Odzworowanie zawirowań osiowych i poprzecznych potwierdziło zasadność modelowania turbulencji dwoma równaniami $k-\epsilon$ na potrzeby przeprowadzonych badań oraz wrażliwość modelu na zmiany geometrii kolektorów dolotowych. Piorąc pod uwagę uzyskany mniejszy poziom turbulencji przy napełnianiu cylindra i utratę paliwa w wyniku oddziaływania zjawisk falowych oraz obliczone niewielkie zwiększenie napełniania po zastosowaniu kolektora dolotowego typu ram-air Autor negatywnie zaopiniował sens stosowania takiego rozwiązania w jednostce m20b27. **Uzyskane wyniki badań symulacyjnych potwierdzają nie postawioną, choć praktycznie udowodnioną tezę naukową.**

Zastosowane rozwiązania badawcze świadczą o wiedzy inżynierskiej oraz umiejętnościach twórczych Autora. Predyspozycje mgra Paliszewskiego do pracy badawczej potwierdza również zbudowane stanowisko hamowniane, zawierające szereg nowoczesnych układów pomiarowo. Przedstawione przez Autora wnioski pobadawcze są prawidłowe i logiczne. Dowodzą one, że mgr inż. Paweł Paliszewski **zrealizował postawiony naukowy cel rozprawy** – zbudował numeryczny model procesu napełniania cylindra silnika ZI oraz przeprowadził badania wpływu profili otwarcia zaworów, geometrii kolektora dolotowego, wartości obciążenia i prędkości obrotowej na współczynnik napełnienia i rozkład ciśnienia w kolektorze. Uzyskane wyniki badań teoretycznych i stanowiskowych mają znaczenie naukowe i praktyczne.

3. Ocena edycji rozprawy

Rozprawa została podzielona na 8 części zajmujących łącznie 96 stron. Do rozprawy dołączono listę oznaczeń, streszczenia w języku polskim oraz angielskim i spis literatury (43 pozycji). Układ pracy logiczny, język rozprawy zrozumiały, ilustracje wykonane są starannie i przejrzysto. Tym niemniej Autor nie ustrzegł się błędów edycyjnych, które zaznaczyłem w tekście rozprawy. Większość zauważonych przeze mnie usterek tekstu ma charakter błędów stylistycznych.

4. Ocena ogólna rozprawy

Najważniejszym osiągnięciem poznawczymi pracy jest zbudowany model, który znajdzie zastosowanie w badaniach nad problemami wymiany ładunku nowoczesnych silników ZI. Wyniki badań symulacyjnych pracy wskazują na użyteczność modelu w zakresie realizacji eksperymentów nad nowymi technologiami dotyczącymi sterowania otwarciem zaworów czy kształtowania geometrii układów dolotowych. Wykorzystanie modelu pomoże ograniczyć zakres badań stanowiskowych zaś jego uniwersalność umożliwi szybkie dokonywanie zmian analizowanych parametrów.

Doktorant podczas realizacji rozprawy wykazał się dostatecznym przygotowaniem do pracy naukowej, a w szczególności: znajomością zagadnień z zakresu teorii silników spalinowych, teorii mechaniki płynów oraz umiejętnością wykorzystania nowoczesnych metod pomiarowych i symulacyjnych.

Recenzowana rozprawa doktorska jest samodzielnym rozwiązaniem zagadnienia naukowego.

5. Wniosek końcowy

Rozprawa mgra inż. Pawła Paliszewskiego pt. „*Modelowanie numeryczne procesu napełniania cylindra silnika z zapłonem iskrowym*” spełnia wymagania ustawowe stawiane pracom promocyjnym na stopień doktora nauk technicznych w rozumieniu ustawy „*O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*” z dnia 14 marca 2003 roku (z późniejszymi zmianami), a Autor może być dopuszczony do jej publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Mirosław Wendeker