Prof. zw. dr hab. inż. Marek Idzior
Politechnika Poznańska
Instytut Silników Spalinowych i Transportu

Poznań, 2016-11-10

OPINIA O ROZPRAWIE DOKTORSKIEJ
mgr inż. Piotra Kaliny
nt. „Wpływ geometrii komory spalania na poziom emisji tlenków azotu silników o zapłonie samoczynnym", wykonana na zlecenie Dyrektora Instytutu Lotnictwa w Warszawie

1. WPROWADZENIE

Przedmiotem opinii jest rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Kaliny pt. „Wpływ geometrii komory spalania na poziom emisji tlenków azotu silników o zapłonie samoczynnym", wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Antoniego Jankowskiego z Instytutu Lotnictwa w Warszawie.

Dynamiczny rozwój motoryzacji w ostatnich dziesięcioleciach spowodował ogromny wzrost udziału dużej liczby pojazdów samochodowych w zanieczyszczaniu środowiska. Wymagania z zakresu ochrony środowiska stawiane nowo produkowanym silnikom spalinowym są więc coraz większe. Wymusza to dalszy ich rozwój, komplikuje też ich konstrukcję. Przez odpowiednio dobrane parametry konstrukcyjne i regulacyjne uzyskuje się zwiększenie właściwości dynamicznych silników, zmniejszenie zużycia paliwa oraz poprawę wielu ich parametrów. Do niedawna w samochodach osobowych stosowano do ich napędu głównie silniki o zapłonie iskrowym, a w samochodach ciężarowych, ciągnikach rolniczych czy różnego rodzaju maszynach roboczych – silniki o zapłonie samoczynnym.

Obecnie obserwuje się ciągle rosnący udział silników o zapłonie samoczynnym stosowanych do napędu samochodów osobowych. Silniki te przy mniejszym zużyciu paliwa sprzyjają dążeniom do ograniczania emisji CO_2,, w wielu krajach cena oleju napędowego jest niższa niż benzyny a ostatnie zmiany konstrukcyjne tych silników skutkują zdecydowaną poprawą ich właściwości trakcyjnych.

Silniki te będą musiały spełniać jednak coraz bardziej rygorystyczne wymagania w zakresie dopuszczalnej emisji szkodliwych składników spalin i hałasu, będącego konsekwencją m. in. dużej szybkości narastania ciśnienia w cylindrze podczas spalania mieszaniny paliwowo-powietrznej. Te rygorystyczne wymagania w zakresie emisji szkodliwych składników spalin są narzucane przez Europejską Wspólnotę Gospodarczą w postaci norm EURO. Spośród emitowanych przez silniki o zapłonie samoczynnym toksycznych składników spalin szczególnie groźne i trudne do unieszkodliwiania są tlenki azotu NO_x. Cechuje je wyjątkowa szkodliwość dla zdrowia, są współodpowiedzialne za tworzenie smogu, niszczą roślinność oraz tworzą tzw. kwaśne deszcze. Są jednymi z groźnych składników skażających atmosferę. Uważa się je za prawie dziesięciokrotnie bardziej szkodliwe od tlenku węgla, a kilkakrotnie od dwutlenku siarki.

Ponieważ poziom emisji tlenków azotu zależy od wielu czynników konstrukcyjnych silnika i parametrów wtrysku paliwa, podjęcie przez Doktoranta tematyki wpływu geometrii komory spalania silnika o zapłonie samoczynnym na poziom emisji tlenków azotu uważam

zatem za celowe, tym bardziej, że – oprócz oczywistych aspektów praktycznych tematu, rozwiązanie postawionych zadań wymaga przeprowadzenia badań o charakterze poznawczym i opracowania metod badawczych zawierających elementy naukowe.

2. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Opiniowana praca ma objętość 141 stron. Składa się z jedenastu rozdziałów oraz spisu cytowanej literatury, który oznaczono jako dwunasty rozdział. Na początku pracy zamieszczono streszczenie wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów oraz spis rysunków i tabel.

W rozdziale pierwszym będącym wstępem do pracy autor krótko omawia udział emisji toksycznych składników gazów wydechowych silników spalinowych w zanieczyszczeniu atmosfery. Przedstawiono też tematykę i zawartość pracy.

Rozdział drugi zawiera analizę stanu wiedzy związanej z tematyką pracy. Omówiono w nim układy wtryskowe silników o zapłonie samoczynnym oraz problematykę kształtowania strugi paliwa, jego parowania i spalania. Przeanalizowano czynniki wpływające na poziom emisji tlenków azotu w silnikach o zapłonie samoczynnym oraz mechanizmy tworzenia się tlenków azotu.

W trzecim rozdziale przedstawiono tezę, cel i zakres pracy. Zasadniczym celem pracy, było przebadanie zależności między geometrią komory spalania a poziomem emisji tlenków azotu oraz analiza procesu wtrysku paliwa, zasięgu jego kropel i czasu ich przebywania w strefie spalania. Sformułowano tezę pracy, że geometria komory spalania ma wpływ na poziom emisji tlenków azotu, poprzez oddziaływanie na wymiary i czas przebywania kropel paliwa w strefie spalania.

W rozdziale czwartym Autor omawia zanieczyszczenia atmosfery pochodzenia antropologicznego, analizuje gazy spalinowe silników o zapłonie samoczynnym i ich szkodliwość dla zdrowia oraz środowiska. Autor uzasadnia w tym rozdziale wybór tlenków azotu jako składnika spalin podlegającego analizie, która została dokonana ze względu na ich wyjątkową szkodliwość dla zdrowia, środowiska i z powodu trudności w ograniczeniu ich emisji w fazie powstawania i eliminacji ze spalin.

Rozdział piąty zawiera przegląd konstrukcji komór spalania silników o zapłonie samoczynnym i wtrysku bezpośrednim. Autor stwierdza w nim, że konstrukcja komory spalania jest często wypadkową założonych celów i kompromisów, wynikających z konstrukcji silnika. Jednocześnie komora spalania w dużym stopniu jest odpowiedzialna za korzystne rozkłady temperatur na ściankach komory, brak skłonności do przegrzewania elementów najbardziej obciążonych cieplnie czy na łatwość rozruchu silnika.

Rozdział szósty zawiera opracowany model matematyczny rozpadu strugi paliwa na krople mający na celu scharakteryzowanie niestabilności strumienia wypływającego z dyszy.

W rozdziale siódmym omówiono proces tworzenia i spalania kropel paliwa. Stworzono nomogramy określające warunki różnych mechanizmów zderzeń kropli. Przedstawiono metodę pomiaru stężeń tlenków azotu opartą na zjawisku chemiluminescencji, czyli emisji energii w postaci światła powstałej w wyniku reakcji chemicznej.

Rozdział ósmy zawiera opis badań wybranego silnika spalinowego z eksperymentalnymi komorami spalania. Omówiono w nim metodykę badań oraz stanowisko badawcze. Badania prowadzono dla skonstruowanych, eksperymentalnych, toroidalnych i toroidalno-trapezoidalnych komór spalania. Wyniki tych badań wykorzystano jako dane wyjściowe zarówno do symulacji zawirowania i ruchu kropli paliwa w opracowanym modelu matematycznym jak i w symulacjach 3D wykonanych w programie SolidWorks Flow Symulation. Rozdział kończy się analizą wyników badań.

Kolejny dziewiąty rozdział zawiera analizy numeryczne wtrysku paliwa do komory

spalania, model matematyczny ruchu kropli paliwa oraz obliczenia trajektorii ruchu kropel paliwa dla badanych komór spalania. Istotne są też dla tych komór analizy numeryczne zawirowania powietrza w cylindrze silnika oraz w komorze spalania. W celu wyznaczenia prędkości wiru powietrza w cylindrze wykonano symulacje komputerowe w programie SolidWorks Flow Symulation. Analizy wykonano w modelu trójwymiarowym dla pełnej geometrii kanału dolotowego, układu zaworu dolotowego i kształtu komory spalania.

W rozdziale dziesiątym przedstawiono podsumowanie oraz sformułowane wnioski. Przedstawiono też program dalszych prac badawczych i aplikacyjnych. Wykonane badania potwierdziły podstawową tezę rozprawy, że istnieje zależność między geometrią komory spalania a poziomem emisji tlenków azotu przez oddziaływanie na wymiary i czas przebywania kropel paliwa w strefie spalania. Niezależnie od tego, wykonane w ramach rozprawy badania, doprowadziły do przedstawienia wielu wniosków szczegółowych i ukazały potrzebę dalszych badań zarówno nad samym modelem jak i procesem spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym.

W końcowych akapitach pracy przedstawiono program dalszych prac naukowo badawczych.

3. MERYTORYCZNA OCENA PRACY

Pod względem merytorycznym i metodycznym pracę oceniam wysoko, gdyż ogólnie odpowiada postawionemu celowi, sformułowanym tezom i jest dostosowana do obowiązujących w tym zakresie wymogów. Układ logiczny treści rozprawy jest przejrzysty a prezentowane treści są ze sobą dobrze powiązane, z konsekwentnie przestrzeganym układem rozpatrywanych zagadnień.

Autor dokonał wyjątkowo szerokiej prezentacji wyników swych rozważań, dokładnie i kompetentnie opisał przeprowadzane badania oraz umiejętnie nadał ich wynikom charakter danych przydatnych dla praktyki rozwoju silników spalinowych.

Wnioski z przeprowadzonych analiz i badań na obiektach rzeczywistych są sformułowane trafnie i adekwatnie do ich zakresu i charakteru. Całość pracy cechuje wyjątkowo staranna jej redakcja. W zakresie omawianych zagadnień występują silne akcenty praktyczne wywodzące się z dobrej orientacji Autora w zakresie rozpatrywanej problematyki.

Najważniejsze osiągnięcia pracy:

Opiniowaną pracę oceniam wysoko również ze względu zarówno na aspekt praktyczny, wynikający ze współczesnych potrzeb eksploatacji silników spalinowych, jak i – przede wszystkim – ze względu na nowatorski i oryginalny sposób potraktowania rozpatrywanej tematyki. Uważam, że cel pracy został osiągnięty, a postawiona teza – udowodniona.

Na szczególne wyróżnienie, upoważniające mnie do takiej oceny rozprawy, zasługują następujące elementy pracy o charakterze ogólnym:

1. Uzasadnienie podjęcia tematu, wynikające nie tylko z wnikliwie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy, ale – przede wszystkim – wynikające z własnych doświadczeń Doktoranta. Temat pracy obejmuje nowatorską tematykę wymagającą wiedzy z teorii spalania połączonej z badaniami silników wykonywanych w badaniach hamownianych z zastosowaniem wysokospecjalizowanej aparatury pomiarowej połączonej z wiedzą związaną z modelowaniem zjawisk fizycznych.
2. Wysoki poziom merytoryczny pracy oraz duża erudycja Autora w zakresie rozważanej tematyki. Z uznaniem oceniam duże umiejętności Doktoranta w zakresie posługiwania się współczesnymi metodami badania maszyn i urządzeń ze szczególnym uwzględnieniem

planowania eksperymentu badawczego oraz umiejętności doboru wysoko specjalizowanej aparatury badawczej w aspekcie założonego celu badań.

3. Szczególnie należy też podkreślić umiejętność posługiwania się zawansowanymi technikami komputerowymi w zakresie modelowania zjawisk fizycznych. Istotnym osiągnięciem Autora jest wykorzystanie tej wiedzy dla opracowanie modelu trójwymiarowego, dla pełnej geometrii kanału dolotowego, układu zaworu dolotowego i kształtu komory spalania.

Dalej wyróżnić należy następujące, bardziej szczegółowe elementy pracy:

1. Autor poszukiwał relacji pomiędzy geometrią komory spalania a czynnikami wpływającymi na tworzenie tlenków azotu w komorze spalania. Do tych czynników autor zaliczył średnią średnicę Sautera oraz czas przebywania kropel paliwa w strefie spalania, koncentrując się na znalezieniu relacji pomiędzy wpływem geometrii komory spalania na wymiar kropel i czas ich przebywania w strefie spalania.
2. Doktorant wyjaśnił zjawisko zmniejszania poziomu emisji tlenków azotu wraz ze zmniejszaniem średnicy komory spalania oraz wpływ na to średnicy kropel paliwa i czasu ich przebywania w strefie spalania. Zjawisko to, które wcześniej było odnotowane prze kilku autorów nie było dotychczas dostatecznie wyjaśnione na drodze teoretycznej i w takim zakresie potwierdzone badaniami eksperymentalnymi.
3. Doktorant przedstawił model obliczeniowy ruchu kropel paliwa w komorze spalania z uwzględnieniem efektów parowania kropli paliwa, zawirowania powietrza, wyciskania powietrza i sił oporu aerodynamicznego. Przedstawił trajektorie ruchu kropel paliwa dla różnych wartości średnic komór spalania.
4. Autor wykonał badania wpływu geometrii komory spalania na poziom emisji składników toksycznych spalin dla pięciu zaprojektowanych przez siebie toroidalnych komór spalania o różnej średnicy. Trafnie wytypował wpływ innych czynników decydujących o poziomie emisji tlenków azotu i dokonał ich eliminacji.
5. Autor przedstawił obliczenia niepewności pomiaru emisji tlenków azotu w oparciu niepewność standardową bazującą na naukowym osądzie obserwatora. W tym celu wyznaczył niepewności standardowe pomiaru wielkości pośrednich oraz policzył wartości pochodnych cząstkowych równania emisji tlenków azotu względem tych wielkości.

Praca ma jednak pewne wady i niedociągnięcia, które nie obniżają mojej ogólnej, bardzo pozytywnej oceny wszystkich aspektów pracy (wyboru tematu, uzasadnienia, analiz, przeprowadzonych badań, wnioskowania, itp.).

1. Autor omawiając układy wtryskowe silników o zapłonie samoczynnym (rozdział 2.1), omówił również nowoczesne układy typu common rail; dlaczego nie przeprowadzono badań na silniku wyposażonym w taki układ wtryskowy (s. 23).
2. Na rysunku 5.7 przedstawiono wg autora współczesne widoki komór spalania - silniki 1,9 TDI i 1,9 HDI to jednak konstrukcje niemal 10 letnie. Dlaczego nie przedstawiono konstrukcji nowszych takich jak np. 2.0 TDI czy 1.6 HDI ? (s. 48).
3. Wydaje mi się, że określenie „fale grawitacyjne" zostało użyte błędnie, gdyż dotyczy ono całkowicie innego zjawiska. Lepszym określeniem byłoby „fale pochodzenia grawitacyjnego itp." (s. 50).
4. W rozdziale 6 na stronie 50 i 51 użyto parametru „ka" przy czym nie wyjaśniono nigdzie jego znaczenia. Wcześniej określono parametr „a" jako promień strumienia strugi, natomiast parametr „k" jako liczbę falową. Czy parametr „ka" stanowi iloczyn parametrów „a" i „k" ?
5. Dlaczego do badań silnikowych wykorzystano wtryskiwacze o 4 otworkach, a nie nowocześniejsze wyposażone w ich większą liczbę? Czy zastosowanie wtryskiwaczy z

większą liczbą otworków nie wpłynęłoby istotnie na wyniki pomiarów i na dalsze analizy ? (s. 53)

6. Dlaczego w pracy przedstawiono skutki zderzeń kropli etanolu? Paliwo to posiada całkowicie odmienne właściwości fizyczne, chociażby takie jak lepkość i gęstość, niż olej napędowy. Czy w przypadku zderzeń kropli oleju napędowego wyniki nie byłyby inne?
7. W pracy nie wskazano dla jakiego paliwa przedstawiono przebieg zderzenia kropel paliwa ze ścianką cylindra na stronie 58. Czy to dotyczyło etanolu tak jak w poprzednim przypadku ?
8. W tablicach z wynikami pomiarów badań silnikowych w opisie wtryskiwacza znajduje się oznaczenie 5x0,24 <145 bądź 5x0,24 <150. Czy to oznacza, że zastosowano jednak wtryskiwacz z 5 otworkami ? Co opisuje parametr <145 i <150 ? Dlaczego zmienia się dla komory o średnicy 63 mm ? (tab. 8.3 ÷ 8.7).
9. Nie uzasadniono przyczyny przeprowadzenia analizy numerycznej dla pozycji tłoka odpowiadającej 1/2 otwarcia i całkowitego otwarcia zaworu.
10. W pracy autor informuje, że średnia prędkość wiru powietrza w cylindrze wynosi kilkanaście m/s. Dlaczego jako maksymalną prędkość wiru przyjęto akurat 12 m/s ? Jak wpłynęło by na wyniki przyjęcie większej bądź mniejszej prędkości maksymalnej ?

4. OCENA EDYCJI ROZPRAWY

Objętość pracy jest uzasadniona z punktu widzenia potrzeb opisu przeprowadzonych analiz teoretycznych i eksperymentalnych. Zakres pracy i zamieszczone informacje przedstawiają jednoznacznie i wyczerpująco jej tematykę oraz dają możliwość dokładnego powtórzenia badań w innych (odpowiednio wyposażonych) laboratoriach. Zwiększa to wiarygodność zamieszczonych w rozprawie wyników.

Układ pracy jest logiczny, język rozprawy zrozumiały, ilustracje wykonane są bardzo starannie i przejrzyście. Tym niemniej Autor nie ustrzegł się pewnych błędów redakcyjno – stylistycznych, np. :

1) s.19, w. ostatni – „..na poziomem”,
2) s. 21, rys. 2.1. – „…mechaniczny wtryskiwacza…,
3) s. 27, wzór 2.5 – jest **dla**$<t_p$ winno być **dla** $t<t_p$,
4) s. 29 w. 3 od dołu – „..Stwierdzono, że proces tworzenia…” – chyba winno być usunięte,
5) s. 31- na rysunku 2.13 nie wydrukował się symbol stopni „°",
6) s. 34 - na rysunku 2.18 nie wyjaśniono jednostki emisji NOx [g/kg] „kg” czego ?,
7) s. 47 – na rys. 5.6 podano źródło jako „materiały internetowe”,
8) s. 55, 57 – kilka razy używane określenie „scenariusz zderzenia” – chyba kolokwializm, lepsze byłoby np. przebieg,
9) s. 75, w. 5 - błąd w jednostce jest „38,3 m", wnioskując po wcześniejszych wynikach powinno być „38,3 mm",
10) s. 87 - nie podano oznaczenia osi x na wykresach rys. 8.17 i 8.18,
11) s. 95, w. 2 – czy rzeczywiście pięciootworowe, patrz uwaga nr 5 wyżej,
12) s. 100, w.1 – co to jest „..jakość przepływu…”,
13) s. 115 i dalej, rys. 9.30 do 9.39 w podpisach – „wkomorze”,
14) s. 125, w. 18 – o jakim przewodniku jest mowa?,
15) s. 131, w. 3 – teza nie mówi!,
16) s. 132, w. 9 od dołu – „..skonstatować…” – określenie nie naukowe, w. 2 od dołu – „…Czynniki te są odpowiedzialne…” – niewłaściwe określenie – może np. przyczyniają się,

17) s. 133, w. 8 – „.. jest powoduje..”, w. 18 – „..silne wpływ..” – określenie nie naukowe i źle użyte,
18) s. 134, w. 2 od dołu – „..wpływy geometrii..”.

5. PODSUMOWANIE OCENY ROZPRAWY

W podsumowaniu oceny rozprawy uważam, że opiniowana praca w pełni odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim ze względu na wysoki poziom merytoryczny oraz aplikacyjne osiągnięcia w zakresie rozpatrywanych problemów. Praca zawiera elementy interdyscyplinarne i stanowi dobry przykład zastosowania nowoczesnych metod naukowych do rozwiązywania zadań budowy i eksploatacji maszyn. Opiniowaną rozprawę doktorską oceniam wysoko. Uważam, że uzasadnia to mój wniosek o wyróżnienie pracy.

A zatem w związku z taką, bardzo pozytywną, oceną rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Kaliny nt. „Wpływ geometrii komory spalania na poziom emisji tlenków azotu silników o zapłonie samoczynnym”, uważam, że opiniowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie naukowej budowa i eksploatacja maszyn, także dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej, wobec czego opiniowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. Upoważnia mnie to do postawienia wniosku o dopuszczenie mgra inż. Piotra Kaliny do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.