

Lublin, 13.05.2023

Dr hab. inż. Jacek Hunicz  
Politechnika Lubelska  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Zrównoważonego Transportu i Źródeł Napędu  
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Bachanka pt.  
*Experimental and numerical study on direct-injection sprays  
formed under flash-boiling conditions*

Podstawa opracowania: pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka prof. dr. hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego z dnia 9 marca 2023 roku.

### 1. Ogólna ocena rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Jakuba Bachanka pt. „*Experimental and numerical study on direct-injection sprays formed under flash-boiling conditions*” została wydana w języku angielskim w formie maszynopisu w Politechnice Warszawskiej w 2022 roku. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Andrzej Teodorczyk, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Łukasz Jan Kapusta.

Praca została zawarta na 92 stronach i składa się z sześciu rozdziałów, wykazu piśmiennictwa i streszczeń w jęz. polskim i angielskim. Bibliografia składa się z 94 pozycji, którymi są w przeważającej większości zagraniczne publikacje uznanych autorów. Biorąc pod uwagę lata publikacji, do których odwołuje się Autor, tematyka podjęta w rozprawie jest aktualna i cieszy się dużym zainteresowaniem badaczy.

Struktura pracy to wzorcowy przykład układu typowego dla badawczej rozprawy doktorskiej. We wstępie Autor uzasadnia podjęcie tematu. Rozdział drugi „Literature review” zawiera zarówno teoretyczne podstawy zjawisk, którymi zajmuje się Autor, jak również przegląd stanu badań w tym zakresie. W rozdziale trzecim Autor formułuje cele i zakres pracy oraz przedstawia tezę naukową. Część badawcza obejmuje dwa rozdziały poświęcone odpowiednio badaniom stanowiskowym oraz symulacyjnym. Ostatni rozdział jest podsumowaniem, w którym wskazano również kierunki przyszłych badań.

Praca jest krótka, ale treściwa. Doktorant przedstawił zagadnienia teoretyczne oraz przegląd literatury w zakresie wystarczającym do scharakteryzowania problemu badawczego, zapoznania czytelnika ze stanem badań w przedmiotowym zakresie oraz wykazania potrzeb badawczych.

Moja krytyczna uwaga dotyczy zbyt pobieżnego potraktowania zagadnień związanych z zastosowaniem zjawisk gwałtownego wrzenia wtryskiwanego paliwa w silnikach spalinowych i korzyści z tego wynikających. We wstępie powinny znaleźć opisy mechanizmów powodujących poprawę sprawności i zmniejszenie emisji związków szkodliwych w wyniku zjawiska gwałtownego wrzenia paliwa. Cele wykorzystania tego zjawiska w dostępnych opracowaniach są różne i warto byłoby podsumować ten potencjał, aby wzmocnić praktyczne znaczenie pracy.

Niekiedy, szczególnie w streszczeniach i we wstępie, pojawiają się zbyt ogólne i nietechniczne określenia, np. że coś jest „lepsze”. Dobrze byłoby bardziej szczegółowo przedstawić, na czym polegają różnice w procesach tworzenia mieszanki, czy spalania.

## **2. Ocena wyboru tematyki rozprawy**

Silniki spalinowe znalazły się w ostatnim czasie pod ogromną presją oczekiwań społecznych dotyczących minimalizacji ich wpływu na środowisko. Pomimo, iż za emisję gazów cieplarnianych odpowiadają paliwa, a nie same silniki, to silnikom, jako maszynom przypisuje się winę za wszelkie zło. Niemniej jednak przyszłość silników nie zależy wyłącznie od zastosowania neutralnych węglowo paliw, ale również od tego, czy uda się dalej ograniczyć emisję substancji szkodliwych. Rozwój systemów spalania i zaawansowane sposoby sterowania tworzeniem mieszanek paliwowo-powietrznych to kluczowe działania w kierunku poprawy efektywności energetycznej silników oraz zmniejszenia emisji składników toksycznych. Optymalizacja systemów spalania i właściwe sterowanie procesami spalania wymagają jednak zrozumienia zjawisk zachodzących w komorach spalania. Zjawiska tworzenia mieszanek i spalania, ze względu na trudne warunki oraz ich dynamikę, są trudne do obserwacji. Zaawansowane badania tych zjawisk obejmują metody optyczne oraz modelowanie matematyczne. Modelowanie pozwala na zmniejszenie zakresu badań laboratoryjnych, a także umożliwia uzyskanie wglądu w zjawiska, których nie da się uchwycić za pomocą pomiarów.

Doktorant w swojej pracy wykorzystał metody wizualizacji strugi paliwa w komorze o stałej objętości oraz modelowanie komputerowe do opisu zachowania się paliwa po jego wtrysku w warunkach gwałtownego wrzenia. Temat rozprawy jest wyjątkowo trafny, aktualny i ciekawy ze względu na złożony charakter badanych zjawisk. Wykorzystanie gwałtownego wrzenia paliwa podczas procesów tworzenia mieszanek paliwowo-powietrznych w cylindrach silników jest przez wielu autorów upatrywane, jako bardziej korzystne niż np. zastosowanie dużego ciśnienia paliwa. Lepsze poznanie zjawisk, którymi zajmuje się w swojej rozprawie Autor oraz opracowanie i kalibracja modeli matematycznych pozwolą na dokładniejsze odwzorowanie i zwiększenie korzyści z symulacji tych złożonych zjawisk.

### **3. Ocena metod badawczych**

Metody badawcze zastosowane przez doktoranta są właściwe z punktu widzenia realizacji celu rozprawy. Badania wizualizacyjne strugi paliwa w komorze o stałej objętości umożliwiły uzyskanie obrazów, które dostarczyły informacji jakościowych na temat kształtu strugi paliwa. Nasuwa się jednak pytanie, czy możliwe byłoby zastosowanie innych metod optycznych, np. laserowej anemometrii obrazowej (PIV), pozwalających na uzyskanie danych ilościowych dotyczących np. pola prędkości kropel lub par paliwa? Wydaje się, że wykorzystanie fluorescencji wzbudzonej laserowo mogłoby dostarczyć ilościowych danych o stężeniach cieczy i par paliwa w badanej strudze. Informacje takie mogłyby ułatwić dyskusję wyników i weryfikację modeli.

Do modelowania matematycznego Doktorant wykorzystał pakiet oprogramowania AVL FIRE z podmodelami umożliwiającymi symulację zjawisk tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej w warunkach gwałtownego wrzenia. W rozdziale piątym te podmodele są dokładnie opisane, ale z treści nie wynika jednoznacznie, które z nich zostały opracowane lub przynajmniej zaimplementowane przez Doktoranta, a które są dostępne w komercyjnym programie. Dobrze byłoby wyraźnie podkreślić, jakie modele stosowano do tej pory, a jakie nowe zaproponował Autor. Z treści jasno wynika, że równanie empiryczne opisujące kąć strugi paliwa jest wkładem własnym autora. Nie wiadomo natomiast, czy inne podmodele są wkładem Autora.

Doktorant, podobnie jak inni badacze, przeprowadził swoje badania w warunkach małego ciśnienia powietrza, aby uzyskać gwałtowne wrzenie wtryskiwanej cieczy w wyniku spadku ciśnienia. W cylindrach silników spalinowych występują jednak inne warunki, to znaczy ciśnienie i temperatura są większe. Warunki, w których prowadzono badania odpowiadają tym, jakie panują w układach dolotowych silników lub w cylindrze podczas suwu napełniania. Korzyści z gwałtownego wrzenia w postaci rozdrobnienia paliwa i jego szybkiego parowania byłyby jednak największe przy tworzeniu ładunku uwarstwionego poprzez wtrysk paliwa pod koniec suwu sprężania. Doktorant tylko we wstępie odniósł się do możliwości praktycznego wykorzystania badanych zjawisk podczas wtrysku w suwie dolotu. Czy możliwe jest uzyskanie gwałtownego wrzenia paliwa przy tworzeniu mieszanek uwarstwionych i czy uzyskane wyniki można ekstrapolować na warunki występujące w cylindrze podczas sprężania?

### **4. Ocena formalna rozprawy**

Układ treści pracy jest prawidłowy. Wypowiedzi ułożone są w logiczny sposób. Doktorant dobrze posługuje się językiem angielskim i używa prawidłowej terminologii. W niektórych miejscach Autor niepotrzebnie używa form skróconych. Nie zawsze można znaleźć rozwinięcie skrótowców przy pierwszym użyciu. Rysunki są czytelne, a ich edycja jest staranna.

## 5. Ocena elementów nowości naukowej stanowiących oryginalny dorobek Doktoranta

Poziom naukowy rozprawy oceniam bardzo wysoko. Autor w rozprawie doktorskiej podjął się wyjątkowo trudnego i ambitnego zadania polegającego na badaniach laboratoryjnych i opisie matematycznym zjawiska tworzenia mieszanki przy gwałtownym wrzeniu strugi wtryskiwanego paliwa. Doktorant wykazał się znajomością złożonych zagadnień teoretycznych i modeli w badanym zakresie. W swoich rozważaniach Autor zwrócił też uwagę na niekorzystne i jednocześnie trudne do opisu matematycznego zjawiska, jak np. łączenie się strug paliwa w jedną.

Za nowość naukową i wkład Doktoranta w rozwój wiedzy należy uznać uwzględnienie ciśnienia paliwa we wtryskiwaczu w modelowaniu gwałtownego wrzenia wtryskiwanego paliwa. Doktorant opracował własny wzór empiryczny opisujący zmianę kąta strugi paliwa na skutek gwałtownego wrzenia, uwzględniający ciśnienie wtrysku paliwa. Opracowana formuła została zastosowana w modelowaniu strugi paliwa z wykorzystaniem obliczeniowej mechaniki płynów. Porównanie wyników modelowania z wynikami pomiarów dowiodło prawidłowości zaproponowanej zależności.

## 6. Ocena końcowa

Przedstawiona do oceny rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a zawarte w pracy wyniki badań i analiz wskazują na rzetelność i dociekliwość badawczą Autora. Kandydat udowodnił, że posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa mgr. inż. Jakuba Bachanka pt. „Experimental and numerical study on direct-injection sprays formed under flash-boiling conditions”, której promotorem jest prof. dr hab. inż. Andrzej Teodorczyk, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Łukasz Jan Kapusta, spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.), a Autor może być dopuszczony do jej publicznej obrony.

