

*Prof. dr hab. inż. Krzysztof Wiśłocki*

POLITECHNIKA POZNAŃSKA  
Instytut Silników Spalinowych i Napędów  
60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3  
Tel.: +48 61 665-2207, fax: +48 61 665-2204  
Tel. : 601 74-70-20

---

Poznań, 1.06.2023 r.

## OCENA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Bachanka pt.:

### *Experimental and numerical study on direct-injection sprays formed under flash-boiling conditions*

1. **Podstawa opinii:** pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka prof. dr hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego z dn. 9.03.2023 r., sygn. RND-IŚGiE/22/2023, które otrzymałem w dniu 17.03.2023 r.
2. **Podstawa prawna:** Ustawa: *Prawo o Szkolnictwie Wyższym* z dnia 20 lipca 2018 r., (Dz. U. Poz. 1668), tekst jednolity opublikowany w Obwieszczeniu Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 3 marca 2022 r. (Dz.U. 2022 poz. 574) i Dz.U.2023.742 oraz zmian z dnia 13 stycznia 2023 r. (Dz.U.2023.212), wchodzących w życie z dniem 1 maja 2023 r., szczególnie Dział V *Stopnie i tytuł w systemie szkolnictwa wyższego i nauki*, Rozdz. 2, *Nadawanie stopnia doktora*, Art. 187; dalej nazywana *Ustawą*.
3. **Przedmiot opinii:** przedłożona do zaopiniowania rozprawa doktorska mgr. inż. Jakuba Bachanka zawiera 92 strony druku, w tym 80 stron zasadniczego tekstu (podzielonego na 6 rozdziałów), spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz symboli, skrótów, oznaczeń (*Nomenclature*), 1 strona spisu tabel i 4 strony spisu rysunków oraz 11,5 stron spisu literatury. W pracy umieszczono 48 rysunków, 7 tabel oraz 128 ponumerowanych wzorów. Bibliografia (*Bibliography*) obejmuje 94 pozycje, głównie (97%) publikacje zagraniczne, z okresu ostatnich kilkunastu lat. Praca jest napisana w języku angielskim i wydana drukiem na Politechnice Warszawskiej w 2022 r. (WUT, 2022), w formacie B5, w oprawie broszurowej.

Uważam, że praca jest zatem zgodna z wymaganiami Art. 187 pkt. 3 i 4 *Ustawy*.

#### 4. Ogólna charakterystyka problematyki poruszanej w rozprawie

##### *4.1. Aktualność podejmowanej problematyki badawczej*

Doktorant pan Jakub Bachanek podjął w swojej pracy badawczej zagadnienie wykorzystania procesu wrzenia i parowania paliwa do jego dobrego rozpylenia w trakcie wtrysku do cylindra silnika spalinowego.

Proces tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej, jego przebieg i czas trwania oraz uzyskiwany miejscowy rozkład paliwa w powietrzu ma fundamentalne znaczenie dla inicjowania zapłonu w przestrzeni spalania, rozprzestrzeniania się płomienia i efektywnego wypalania pa-

liwa, a więc ostatecznie dla sprawności cieplnej silnika spalana wewnętrznego zasilanego paliwem ciekłym. Uzyskany w ostatnich 25 latach znaczny postęp w metodach, narzędziach i „filozofii” tworzenia mieszanek paliwowo-powietrznych pozwolił na istotne zwiększenie osiągniętych wartości koncentracji mocy w silnikach spalinowych zapewniając jednocześnie spełnianie coraz ostrzejszych norm emisji związków toksycznych w spalinach. Dzięki systematycznemu zwiększaniu nominalnego ciśnienia wtrysku paliwa oraz elektronizacji urządzeń wykonawczych (wtryskiwaczy) pozwalającej na zasilanie wtryskiem wieloczęściowym nastąpiło skokowe zwiększenie parametrów operacyjnych spalinowych układów napędowych pojazdów samochodowych, m.in. średniego ciśnienia użytecznego z ok. 18-20 bar w końcu lat 90-tych XX w. do współcześnie coraz częściej spotykanych ok. 28-38 (40) bar.

Osiągnięty obecnie pułap ciśnienia wtrysku ok. 3000 bar wydaje się jednak już bardzo trudny do podniesienia, m.in. ze względu na obciążenia mechaniczne układu wtryskowego oraz na problemy przepływowe związane z koniecznością zachowania ciągłości strugi cieczy i jej właściwości fizykochemicznych. Osiągnięto w ten sposób granicę prędkości wypływu strugi, więc także jej energii burzliwej, od której w znacznej mierze zależy mechanizm pierwotnego rozpadu strugi na krople i jakość rozpylenia. Warto jednak się zastanowić, czy można włączyć do tego procesu inne mechanizmy rozpadu strugi na krople. W latach 2005-2008 na Politechnice Poznańskiej dr hab. inż. Władysław Kozak podjął próby „rozpuszczania” we wtryskiwanym paliwie sprężonego CO<sub>2</sub>, powietrza, CNG lub spalin, żeby w czasie wtrysku do komory spalania uzyskać efekt gwałtownego uwalniania tego gazu, „rozsadzania” kropli paliwa i znacznego poprawienia jakości rozpylenia strugi. Badania optyczne strugi oleju napędowego dla ciśnienia wtrysku ok. 600 bar wskazywały na uzyskanie jakości rozpylenia porównywalnej z układem konwencjonalnym pracującym z ciśnieniem wtrysku ok. 1400-1800 bar. (<https://sin.put.poznan.pl/search/publications>, Władysław Kozak i inni).

Wcześniej, pod koniec lat 90-tych XX w. w Politechnice Poznańskiej prowadzono też badania nad wtryskiem podgrzanego oleju napędowego (I. Pielecha, M. Kowalczyk) w celu zmniejszenia jego gęstości i napięcia powierzchniowego. Uzyskano polepszenie rozpylenia paliwa, jednak ówczesny niedostatek aparatury badawczej oraz ujemny bilans energetyczny takiego postępowania doprowadził do zaprzestania badań bardziej zaawansowanych.

Obecnie wydaje się bardzo celowe podjęcie dalszych rozszerzonych badań nad termiczną aktywizacją wtryskiwanego paliwa i wykorzystaniem mechanizmów wrzenia i parowania jako zjawisk istotnie wspomagających proces rozpylenia paliwa i uzyskiwania mieszanek o bardziej jednorodnym składzie w krótszym czasie i ze zmniejszonym nakładem energetycznym. Dlatego uznaję podjęcie badań objętych opiniowaną pracą doktorską za celowe i aktualne.

#### ***4.2. Istotność problematyki badawczej pod względem poznawczym i aplikacyjnym***

Jak staram się podkreślać przy każdej odpowiedniej okazji postęp rozwoju wiedzy i jej aspektów aplikacyjnych wymaga coraz szerszego stosowania nowoczesnych metod badawczych, opartych na coraz bardziej interdyscyplinarnych podstawach. Wykorzystanie w praktyce inżynierskiej wiedzy na temat mechanizmów rozpadu cząstek paliwa w szerszym niż dotychczas zakresie wymaga dokładnego poznania zjawisk towarzyszących takim procesom oraz ich deterministycznego, funkcyjnego opisanie. O ile jednak dotychczasowe badania dotyczyły głównie skali makro, o tyle nowe techniki badawcze, eksperymentalne i modelowe, w coraz większym stopniu wnikają w przebiegi takich zjawisk w skali mikro.

Opisanie deterministyczne zależności funkcjonalnych związków przyczynowo-skutkowych służy głównie do wytworzenia narzędzia przewidywania skutków wywołania określonych przyczyn, lub – w sytuacji odwrotnej – dla oczekiwanych skutków zastosowania wymaganych przyczyn. W sytuacji opisanej w opiniowanej pracy chodzi głównie o wykazanie celo-

wości zastosowania procesów wrzenia i parowania dla poprawy widma rozpylenia strugi paliwa. Wprawdzie potrzeba poprawy widma rozpylenia jest szczególnie silna w odniesieniu do paliw o dużej gęstości i lepkości, o tyle może być także bardzo przydatne i wskazane dla paliw tzw. „lżejszych”, o mniejszej gęstości. Pojawia się wówczas możliwość uzyskania pożądanego widma rozpylenia dla zmniejszonych wartości ciśnienia wtrysku, a więc zmniejszonego nakładu energetycznego na wytworzenie tego ciśnienia.

Kluczowe pozostaje jednak pytanie, czy zwiększenie temperatury paliwa do poziomu zapewniającego gwałtowne wrzenie paliwa może się odbyć przy mniejszym nakładzie energetycznym, niż odpowiednie zwiększenie ciśnienia wtrysku paliwa. Jest to pytanie, na które odpowiedź wymaga wcześniejszego dokładnego rozpoznania zjawiska wtrysku z gwałtownym wrzeniem (ang.: *flash boiling*), co właśnie proponuje opiniowana praca.

W związku z przytoczonymi tutaj argumentami podjęcie problematyki tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej z wykorzystaniem procesu gwałtownego wrzenia paliwa wydaje mi się w pełni uzasadnione i celowe.

#### **4.3. Sformułowanie problemu, celu pracy i tez badawczych**

W rozdziale 3 (s. 35-36) Autor formułuje problem badawczy oraz cele pracy. Na wstępie rozdziału stwierdza, że literatura przedmiotowa dość szeroko omawia problematykę gwałtownie wrzącej cieczy. Jako *wrzenie* rozumie się zjawisko gwałtownej przemiany cieczy w gaz (parę), podczas którego powstają i rosną pęcherzyki pary nasyconej w objętości cieczy, a nie tylko parowanie na powierzchni cieczy. Jest to więc przejście fazowe pierwszego rodzaju (nieciągła zmiana funkcji stanu, por. Wikipedia).

Autor stawia sobie za zadanie ulepszenia i uściślenia zasad modelowego opisu rozpadu strugi wtryskiwanego paliwa w warunkach gwałtownego wrzenia cieczy. Przewidział podjęcie badań eksperymentalnych dla identyfikacji i weryfikacji modeli matematycznych i oceny ich wrażliwości i jakości symulacji.

W tym rozdziale Autor sformułował główną tezę w brzmieniu: ciśnienie wtrysku odgrywa ważną rolę jako warunek początkowy dla symulacji tworzenia strugi wtryskiwanego gwałtownie wrzącego paliwa, szczególnie w aspekcie ogólnych wskaźników jej geometrii. Tutaj jednak pożądanym było wskazanie spełnienia jakiego warunku (ilościowego) pozwoli tę tezę udowodnić.

W tej części pracy Autor umieścił podrozdział 3.1, który poświęcił omówieniu zawartości pracy krótko charakteryzując treści w poszczególnych rozdziałach. To akurat wydaje się mocno nietrafionym pomysłem Autora. Po pierwsze podział rozdziału na części (tutaj: podrozdziały) wymaga co najmniej dwóch części, po drugie część pierwsza staje się tzw. „wiszącym” tekstem, co jest błędem edytorskim. Ponadto omówienie zawartości pracy byłoby bardziej wskazane we wstępie do pracy; tutaj natomiast potrzebne jest mówienie ogólnej filozofii rozwiązywania sformułowanego wcześniej problemu badawczego, ewentualnie sposobu i kryterium udowodnienia sformułowanej tezy. Powinny tutaj paść wyjaśnienia dotyczące przyjętej metodyki postępowania, uzasadnienie podjęcia badań eksperymentalnych i ich powiązania z badaniami symulacyjnymi.

Pod względem metodologicznym ten fragment pracy odstaje od przyjętych standardów oraz zasad logicznego postępowania, choć dalsza część pracy już ten niedostatek zdecydowanie kompensuje.

### **5. Struktura pracy i ocena jej poprawności metodologicznej**

Prawidłowe rozwiązanie oryginalnego, naukowego problemu badawczego powinno zawierać:

1. Wprowadzenie do problematyki pracy ze wskazaniem motywacji i celowości podjęcia określonej tematyki badawczej,
2. Ocena bieżącego stanu wiedzy przeprowadzoną w oparciu o dostępne źródła wiedzy w celu zdefiniowania braków i niedostatków tej wiedzy,
3. Sformułowanie naukowego problemu badawczego (ewentualnie także tez lub hipotez) oraz wynikających z niego koniecznych do rozwiązania zadań szczegółowych, a także kryteriów uznania problemu za rozwiązany,
4. Przyjęcie sprecyzowanej metody badawczej i metodyki jej stosowania,
5. Zdefiniowanie obiektu (-ów) badań, aparatu badawczego oraz metod i sposobów analizy wyników,
6. Ilościową i jakościową ocenę uzyskanych wyników,
7. Interpretację wyników i sformułowanie wniosków końcowych.

Taką właśnie strukturę Autor zastosował w swojej pracy, więc należy ją ocenić jako właściwą. Bardziej szczegółowe omówienie treści rozprawy zamieszczam dalej w punkcie 7.

#### **6. Adekwatność i prawidłowość przyjętej metody badawczej i zastosowanej metodyki**

Do badań niestacjonarnych i szybkich procesów zachodzących w cieczach i gazach, w przestrzeniach zamkniętych konieczne jest stosowanie nowoczesnej i zaawansowanej technicznie aparatury badawczej. Jak już sam wielokrotnie doświadczyłem, ocena przebiegu procesów zachodzących w maszynach cieplnych w bardzo małych fragmentach przestrzeni roboczej zmusza do stosowania optycznych metod badawczych, najczęściej szybkiego filmowania (*High-Speed Video*), z możliwie dużą rozdzielczością rejestrowanych obrazów, co często stoi w sprzeczności z szybkością filmowania. Przyjęta przez Autora metoda badań optycznych polegająca na filmowaniu z częstotliwością migawki 20 000 klatek/s i rozdzielczością 512x512 pikseli stanowi dobry kompromis dla kalibracji tworzonego modelu matematycznego i nakładki na system symulacyjny.

Przeprowadzenie odpowiednich badań eksperymentalnych i wykorzystanie tak uzyskanych wyników do identyfikacji współczynników modelu i jego późniejszej weryfikacji jest postępowaniem uzasadnionym, a w przypadku wprowadzania nowych elementów do nowych modeli – wręcz niezbędnym. Ocena postępowania Autora jest pod tym względem jednoznacznie pozytywna.

#### **7. Analiza treści rozprawy**

Pierwszy z punktów wskazanych powyżej w rozdz. 5 tej opinii Autor omówił we wstępie (rozdz. 1, str. 1-4). Motywację podjęcia badań ograniczył jednak do problemu flotowej emisji dwutlenku węgla w cyklu NEDC porównując dane z lat 2000 do 2025 porównując dane dla 6 krajów i Unii Europejskiej. Wskazał tutaj na możliwość poprawy widma rozpylenia przez gwałtowne rozpylenie wspomaganie procesem wrzenia cieczy (rys. 1.3) podając przykład strugi rozpylanej wody. Słusznie zauważył, że emisja ze współczesnych silników z zapłonem iskrowym i bezpośrednim wtryskiem bardzo silnie zależy od jakości rozpylenia paliwa w powietrzu wypełniającym cylinder (s. 3). Uznał jednak, że niezbędne są szczegółowe badania eksperymentalne dla lepszej identyfikacji modeli symulacyjnych wtrysku wrzącego paliwa dla różnych parametrów wtrysku. Bardziej przekonujące sformułowanie motywacji podjęcia badań Autor zawarł w rozdz. 3.1 por. wyżej, pkt. 4.3), choć lepiej byłoby gdyby znalazło się ono we wstępie.

Drugi rozdział Autor przeznaczył na omówienie stanu wiedzy dotyczącej procesu rozpylenia strugi wtryskiwanej cieczy (rozdz. 2.1). Wskazał na analizy literaturowe dotyczące etapów rozpadu strugi wtryskiwanego paliwa: rozpad Rayleigha, rozpad pierwotny, rozpad wtórny, aglomeracja. Przytoczył liczby kryterialne Rayleigha, Ohnesorge'a i Webera charakteryzujące relacje między mechanizmami rozpadu strugi a turbulencją ( $Re$ ), gęstością cieczy, prędkością

względna i lepkością kinematyczną ( $Oh$ ), a także relację między siłami bezwładności a siłami spójności ( $We$ ), s. 5-7. W kolejnym podrozdziale przedstawił podstawowe informacje dotyczące rozpadu strugi cieczy znajdującej się w stanie nasycenia, w meta-stabilnym stanie przegrzania, w którym wahania stanu równowagi cieplnej prowadzą do powstawania pęcherzyków pary wewnątrz cieczy. Takie zarodkowanie powstaje w wyniku podgrzewania izobarycznego lub izotermicznego rozprężania (rozdz. 2.2.1). Przytoczył zależności na stopień niejednorodności cieczy oraz charakterystyczne krzywe parowania we współrzędnych objętość-ciśnienie. Rozwój pęcherzyków par cieczy został opisany równaniami zaczerpniętymi z literatury (por. rozdz. 2.2.2).

Rozdz. 2.3 Autor przeznaczył na omówienie efektu intensyfikacji rozpadu strugi cieczy na krople w wyniku uwalniania się pęcherzyków pary z wrzącej cieczy. Jak wskazują wyniki badań przytoczone z literatury efekt ten poprawia jakość rozpylenia i zmniejsza średnice kropeł powstających w wyniku rozpadu strugi. Zmniejszenie średnicy kropeł w zależności od temperatury cieczy przedstawiono na rys. 2.9 porównawczo dla n-heptanu, n-hexanu, n-pentanu i benzyny. Dalej Autor przytoczył wyniki badań źródłowych dotyczące większej szybkości parowania powierzchniowego niż parowania objętościowego w zależności od stopnia przegrzania cieczy w zakresie temperatury do ok. 20-40 [K] i gwałtowne zwiększenie szybkości parowania objętościowego wynikającego z gwałtownego parowania wewnątrz cieczy przy temperaturach większych (por. rys. 2.10). Mechanizm takiego parowania ilustrują wyniki badania rozpraszania światła w zakresie UV (rys. 2.11) oraz wyniki szybkiego filmowania w technologii cieniowej pokazane na rys. 2.12. Taki wpływ rejestruje się dla zwiększającego się kąta wierzchołkowego strugi wraz ze zwiększaniem temperatury cieczy (rys. 2.13). Podobne wyniki obserwuje się na przytoczonych wynikach źródłowych dotyczących wtrysku z użyciem wtryskiwaczy wielootworkowych (rys. 2.15) dla różnych paliw (propan, izooktan) i różnych wartości ciśnienia wtrysku (rys. 2.19).

W rozdziale 2.4 analizie podano możliwości uwzględnienia procesu gwałtownego parowania w modelowaniu matematycznym i symulacji przebiegu wtrysku i rozpylaniu cieczy. Przytoczone tutaj rozważania oraz wzory modelowe i ich interpretacja graficzna wskazują na istotne braki w opisie modelowym i potrzebę jego uściślenia oraz rozszerzenia. Autor stwierdził, że do modelowego przewidywania penetracji strugi, jej kąta wierzchołkowego oraz rozkładu średnicy kropli paliwa stosowane są różne metody obliczeniowe. Żadna z nich jednak nie umożliwia na razie predykcji wpływu ciśnienia wtrysku oraz liczby i wielkości pęcherzyków par cieczy powstających w trakcie wtrysku gwałtownie parującej cieczy. Zauważył przy tym, że wykorzystanie zależności Eulera wymaga posiadania dużej liczby wyników eksperymentalnych w celu poprawnej identyfikacji modelu oraz wymaga znacznej mocy obliczeniowej komputera, podczas gdy zwykle stosowany model Lagrange'a nie umożliwia predykcji procesów z oczekiwaną dokładnością.

Na podstawie konkluzji wyprowadzonych w rozdziale 2 Autor sformułował problem badawczy i cele swojej pracy – omówił je w rozdziale 3 (s. 35-36); ten fragment pracy omówiłem wcześniej w rozdz. 4.3.

Omówienie przeprowadzonych przez Autora badań eksperymentalnych zawarto w rozdziale 4. Badanie te polegały na filmowaniu przebiegu wtrysku paliwa do ciśnieniowej komory o stałej objętości, następnie na cyfrowej obróbce uzyskanych pojedynczych ekspozycji kolejnych faz tego procesu, a ostatecznie na interpretacji uzyskanych wyników.

W podrozdziale 4.1.1 Autor przedstawił schemat i zdjęcie stanowiska badawczego wyposażonego w ciśnieniową komorę o stałej objętości, której jednak nie podano (prawdopodobnie ok. 300-500 cm<sup>3</sup>). W ścianie komory umieszczono okno kwarcowe pozwalające na obserwację obrazu o średnicy 70 mm. Wtrysk paliwa (n-heptan) realizowano pojedynczym sześciotworkowym wtryskiwaczem Bosch HDEV5.2 z ciśnieniem wtrysku wariantowo: 5, 10, 15 MPa (ok.

50, 100, 150 bar). Temperatura ścianek komory była utrzymywana stała 25°C (tabl. 4.2), a przeciwnie w komorze wariantowo: 0,01...0,10 MPa (0,1...1,0 bar). Temperatura wtryskiwanego paliwa była zwiększana przez grzałki umieszczone w głowicy i była szacowana na 60 do 120°C.

Na s. 39 podano nazwy i dokładności pomiaru czujników pomiarowych do temperatury paliwa, temperatury grzałki, ciśnienia wtrysku paliwa oraz ciśnienia w komorze. Do rejestracji filmów z wtrysku paliwa użyto kamery Photron SA1.1 pozwalającą na rejestrację zdjęć z częstotliwością 20 tys. FPS z rozdzielczością 512x512 pixeli. Po analizie parametrów użytego aparatu badawczego można uznać, że odpowiada on współczesnym standardom i jest wystarczający do prowadzenia analizy tworzenia strugi i rozpylenia paliwa w pożądanym zakresie i z pożądaną dokładnością.

Do analizy zdjęć wykorzystano program DaVis v.8.4 firmy LaVision (Getynga). Pozwolił on na określenie parametrów geometrycznych strugi i gęstości rozkładu kropeł paliwa w strudze dla kolejnych ekspozycji korelując te wartości z poszczególnymi parametrami sterowania wtryskiem, w tym także ze wskaźnikiem przegrzania paliwa ( $R_p$ ) definiowanym jako stosunek ciśnienia parowania do ciśnienia powietrza w komorze. Badania przeprowadzono w zakresie zmienności tego wskaźnika: 0,28...18,33.

W rozdziale 4.2 zawarte zostały wyniki pomiarów i ich opis. Stwierdzono istotny wpływ gwałtownego wrzenia na strukturę i parametry strugi wtryskiwanego paliwa (podrozdz. 4.2.1). Wyniki zilustrowano zdjęciami strugi paliwa dla ciśnienia wtrysku 15 MPa, w czasie 1,5 ms po początku wtrysku (ASOI), dla różnych wartości temperatury paliwa i różnych wartości stopnia przegrzania ( $R_p$ ), rys. 4.9. Uzyskane zależności parametrów strugi od ciśnienia wtrysku, temperatury paliwa i stopnia przegrzania ilustrują wykresy 4.10-4.19. W podobny sposób przedstawiono i omówiono wpływ ciśnienia wtrysku na wspomniane parametry strugi w zależności od stopnia przegrzania i ciśnienia wtrysku (s. 48-52).

Rozdział 5 zawiera omówienie problemów modelowania i symulacji wtrysku paliwa z gwałtownym wrzeniem. W pierwszym podrozdziale przytoczono podstawowe równania zachowania masy, momentów i energii, dostosowanych do przepływu trójwymiarowego, sprężystego, niestacjonarnego i turbulentnego. Zasadę zachowania masy opisano równaniem ciągłości (5.10), zachowanie momentów – równaniem Navier-Stockesa (5.2) a zachowania energii – równaniem I zasady termodynamiki (5.3). Dla mieszaniny cieczy i gazu system równań uzupełniono równaniem opisującym lokalną koncentrację cząstek (5.4). Równanie przepływu masy uzupełniono modelem turbulencji  $k$ - $\epsilon$  zmodyfikowany do postaci  $k$ - $\zeta$ - $f$ , który został zaimplementowany do systemu obliczeniowego AVL-FIRE.

Dla przepływu wielofazowego zaadaptowano model Eulera-Lagrange'a (rozdz. 5.2) pozwalający na wyznaczanie kierunku i prędkości przepływu (równ. 5.10-5.11) z uwzględnieniem oporu powietrza zależnym od liczby Reynoldsa (równ. 5.13, 5.14). Do systemu obliczeniowego wprowadzono także model parowania uwzględniający zaproponowany w literaturze efekt gwałtownego wrzenia. Dalej, model uwzględnia procesu pierwotnego i wtórnego rozpadu strugi oraz zderzenia kropli i ich aglomerację (rozdz. 5.2.5). Osobny rozdział Autor przeznaczył na omówienie modelu gwałtownego wrzenia (rozdz. 5.3).

Dodatkowo uwzględniono korekcję modelu wyznaczania kąta wierzchołkowego strugi w zależności od stopnia przegrzania paliwa  $R_p$ .

Ostatecznie złożony system obliczeniowy tworzy ok. 10 uzupełniających się modeli matematycznych, z których główne wykazano w tablicy 5.2. Obliczenia typu CFD prowadzono z wykorzystaniem siatki obliczeniowej 3x3 mm, której wielkość stanowiła kompromis pomiędzy dokładności i czasem obliczeń (por. s. 65). Dokładniejsza analiza wrażliwości modelu na wielkość oczka siatki została opisana dalej w rozdz. 5.6.1, gdzie wskazano wymiar 0,75x0,75 mm jako najkorzystniejszy ze względu na wspomniany kompromis.

Model poddano kalibracji (rozd. 5.6) trzyetapowej: dla paliwa przechłodzonego, dla paliwa wrzącego i dla paliwa z gwałtownym wrzeniem. W zakresie doboru rozmiarów siatki obliczeniowej analizowano rozmiary: 1,25; 1,0; 0,75 i 0,5 mm, ostatecznie wybierając rozmiar 0,75 mm. W odniesieniu do wtrysku paliwa przechłodzonego porównywano zależność zasięgu strugi od czasu dla różnych wielkości oczka siatki obliczeniowej i dla ciśnienia wtrysku 15 MPa. Zauważono przy tym, że dla ciśnienia wtrysku 10 MPa model wyznacza mniejszy zasięg strugi niż uzyskany z eksperymentu. Na rys. 5.7 pokazano porównanie wyników obserwacji optycznych i wyników obliczeń modelowych. Tutaj jednak nie wskazano konkretnego kryterium oceny zgodności.

Podobne porównania wykonano dla wtrysku paliwa wrzącego (rozd. 5.6.3), które posłużyło do ustalenia wartości współczynnika  $f_2$  (*bubble number density factor*) we wzorze 5.67 na wartość 1200.

Wyniki i ich dyskusję Autor przedstawił w rozdziale 5.7. Na wstępie przedstawił porównanie swojego rozszerzonego modelu do obliczania kąta wierzchołkowego strugi z modelem proponowanym przez Zuo (s. 71) zauważając, że ten model prowadzi do tworzenia bardziej centralnie skoncentrowanej strugi paliwa z silnym rozpyleniem i wskazuje istnienie stref zawirowania niewidocznych w eksperymencie. Przedstawiane dalej porównania dla różnych stopni przegrzania i różnych czasów po początku wtrysku ASOI prowadzą Autora do pewnych wniosków jakościowych dotyczących zasięgu i rozpylenia strugi, dla których brak jest jednak wskaźników ilościowych wzmacniających te ogólne wnioski.

W podsumowaniu (rozd. 6) Autor przypomniał, że głównym celem tej pracy było przeprowadzenie analizy zjawisk i mechanizmów towarzyszących gwałtownemu wrzeniu paliwa wstrudze z wykorzystaniem parametrów modelu łatwych do pomiaru i obliczeń symulacyjnych (s. 79). Obliczenia z wykorzystaniem opracowanego (zmodyfikowanego) modelu przebiegu wtrysku n-heptanu w warunkach wrzenia potwierdziły zwiększenie zasięgu strugi i wartości kąta wierzchołkowego. Dla tej ostatniej wartości wykazano wpływ zwiększającego się ciśnienia wtrysku na zmniejszanie tego kąta. Stwierdzono także, że zwiększenie liczby pęcherzyków pary prowadzi do zmniejszenia średnicy powstających kropli paliwa. (s. 80).

Wykorzystywany model dobrze symuluje zasięg ciekłej strugi paliwa oraz mechanizm jej rozpadu na krople. Jednak stwierdzono, że w przypadku silnie przegrzanego paliwa struktura strugi różni się istotnie od tej otrzymanej z badań eksperymentalnych, co może wynikać z procesów kondensacji par. Sytuacja taka wymaga dalszego wyjaśnienia.

W tym miejscu Autor uznał, że główny cel pracy został osiągnięty, gdyż uzupełnienia wprowadzone przez Autora do wcześniejszych modeli pozwoliły na przewidywanie rozpadu strugi w warunkach przegrzanego paliwa.

Podsumowanie Autor zakończył kilkoma sugestiami dotyczącymi kierunku i zakresu kontynuowania badań w przyszłości.

## 8. Uwagi szczegółowe dotyczące zagadnień merytorycznych

Podjęta przez Autora analiza źródeł została oparta na bogatej literaturze przedmiotu obejmującej 94 pozycje; zaledwie kilka z nich pochodzi sprzed 2000 r., więc jest to literatura najnowsza. Pewne wątpliwości budzi jednak oparcie się głównie na literaturze zagranicznej, choć prace o podobnej problematyce pojawiały się także w Polsce. Na ten aspekt zwróciłem uwagę już wcześniej w punkcie 4.1 tej opinii. Tym niemniej przeprowadzoną przez Autora analizę stanu wiedzy uważam za dość wyczerpującą, przeprowadzoną wnikliwie i systematycznie, opracowaną przejrzysto i komunikatywnie. Można ją traktować jako bardzo przydatną syntezę stanu wiedzy i zaliczyć do osiągnięć badawczych Autora.

Praca jest napisana w sposób bardzo zwięzły, co czasami stanowi utrudnienie w pogłębionej interpretacji czytanego tekstu. Jest jednak rzeczowym i wyczerpującym przedstawieniem

przeprowadzonych badań, zastosowanego aparatu badawczego i obliczeniowego, oraz uzyskanych wyników. Mam jedynie wrażenie, że z niektórych wyników można jeszcze uzyskać więcej informacji dotyczących zależności przyczynowo-skutkowych dotyczących obserwowanych i analizowanych procesów, co jednak może być przedmiotem rozważań Autora w przyszłości.

Wprawdzie sformułowana w rozdziale 3 teza wydaje się dość ogólnikowa i intuicyjnie oczywista, to wyniki uzyskane przez Autora ją potwierdzają zarówno pod względem jakościowym, jak i ilościowym. Można więc było tę tezę sformułować bardziej precyzyjnie i wskazać kryterium (kryteria) ilościowe, których spełnienie potwierdziłoby dowód tej tezy. Zresztą takie nieco ogólnikowe sformułowanie tezy miało konsekwencje w późniejszej interpretacji wyników badań eksperymentalnych i symulacyjnych.

W ocenie zgodności wyników badań eksperymentalnych i symulacyjnych często używane jest pojęcie „podobne” bez zdefiniowania kryterium takiego podobieństwa i jego oceny ilościowej uzasadniającej pozytywną oceną jakościową. Np. s. 68 przy doborze wielkości siatki obliczeniowej Autor pisze: *slightly increases, almost negligible*. Nie podano także tutaj kryterium takiego porównania oraz dopuszczalnej niezgodności uzasadniającej pozytywną ocenę takiej zgodności.

Podobnie na s. 68 Autor pisze „*qualitively similar spray cloud formation*” – tutaj także jest brak wskaźnika ilościowego i kryterium podobieństwa, co jest o tyle zastanawiające, że w programie DaVis takie wskaźniki stosunkowo łatwo można wygenerować. Pojawia się również pytanie, co oznacza „*overall agreement... (of spray penetration)*” (s. 69). Na taki temat warto może podjąć dyskusję w trakcie obrony, czy były jakieś szczególne powody unikania oceny ilościowej i wyboru kryteriów porównywania wyników.

Zauważa się w pracy dość swobodne porównywanie wyników ze źródeł literaturowych i badań własnych dla różnych paliw: n-heksan, n-pentan, gasoline. Powstaje pytanie, czy wyniki takie są porównywalne i w jakim zakresie. Jeżeli tak, to warto było to stwierdzić i poprzeć to stwierdzenie porównaniem wartości podstawowych parametrów i wskaźników tych paliw (choćby gęstość, lekkość, temperatura wrzenia) przedstawionym w tabeli (np. w załączniku). Czy wnioski dotyczące wtrysku wrzącego paliwa mogą być podobne dla tych przypadków?

Trochę też zastanawia pominięcie zagadnień dotyczące wielkości kropli i rozkładu wielkości kropli (SMD) w strudze wtryskiwanego paliwa w warunkach wtrysku paliwa zimnego i przegrzanego. Dla aplikacji wniosków z pracy w systemach zasilania silników spalania wewnętrznego, tutaj w odniesieniu do silników typu SIDI, uzyskanie informacji o przewidywanych wartościach średniej średnicy kropel (np. SMD) i rozkładu stężenia kropel w przestrzeni strugi może mieć kluczowe znaczenie przy projektowaniu układu zasilania i jego sterowania. Ograniczenie się w modelu do oceny zasięgu i szybkości rozprzestrzeniania się strugi oraz jej kąta wierzchołkowego mocno zmniejsza jego przydatność dla projektowania silnikowego. Proszę o dodatkowy komentarz na ten temat.

## 9. Uwagi szczegółowe dotyczące redakcji pracy

Przedstawiona do oceny praca jest kompletna, gdyż zawiera wszystkie niezbędne elementy: Streszczenie, *Abstract*, spisy rysunków i tabel, spis oznaczeń i skrótów oraz bibliografię. Tekst jest bogato ilustrowany, a wykorzystane rysunki (prawie wszystkie) są opracowane przejrzysto, a umieszczone na nich wielkości są wyjaśnione.

Nie stwierdziłem żadnych istotnych błędów językowych, składniowych ani literowych, co w pracach pisanych w języku obcym jest trudne do osiągnięcia. Pochwały wymaga konsekwentna i bardzo uważna redakcja całości pracy oraz opracowanie jej strony graficznej, a także wydanie jej w postaci tzw. wydawnictwa zwartej.

W trakcie analizy treści rozprawy dostrzegłem pewne nieliczne braki lub niekonsekwencje redakcyjne. Oto kilka z nich:



- na rys. 1.2 słabo są rozróżnialne kolory – powstaje wrażenie braku jednej krzywej(?);
- w przytaczanych w rozdziale 2 wzorach zmiennych niezależnych nie rozdzielono znakiem mnożenia (wzory: 2.1; 2.2; 2.3; 2.5; 2.6; 2.7; 2.19; 2.20; 2.29-2.31 itd.), podczas gdy inne wzory tej wady nie mają – błąd niekonsekwentnej redakcji;
- w tekście pracy pojawiają się tzw. „wiszące” fragmenty, tzn. tekst rozdziału jest podzielony na podrozdziały, ale jego początkowy fragment nie podlega temu podziałowi (por. rozdz. 2.2, tekst „wiszący”, podrozdz. 2.2.1). Podobnie jest w rozdz. 3; tutaj dodatkowo jest tylko jeden podrozdział, więc po co jest ten podział? Taka sytuacja wystąpiła także w rozdz. 5.6 i podrozdz. 5.6.1.

## 10. Najważniejsze osiągnięcia pracy

Do najważniejszych osiągnięć pracy można wg mnie zaliczyć pogłębione badania optyczne i badania symulacyjne wtrysku wrzącego paliwa, w którym gwałtownie rozprężające się pary powodują szybsze i lepsze rozpylenie paliwa, co może w dalszej konsekwencji prowadzić do poprawy mechanizmów tworzenia mieszanki, szczególnie w silnikach z wtryskiem bezpośrednim. Badania przeprowadzone dla różnych stopni przegrzania paliwa i różnych wartości ciśnienia wtrysku umożliwiły lepsze rozpoznanie występujących wówczas zjawisk i deterministyczne skorelowanie geometrycznych i dynamicznych parametrów strugi paliwa z najważniejszymi parametrami wtrysku.

Powstałe z wykorzystaniem tych korelacji uzupełnienia tradycyjnych modeli obliczeniowych pozwalają na rozszerzenie ich stosowania do przypadków wtrysku paliwa przegrzanego, w którym pojawia się zjawisko wrzenia i objętościowego parowania pozwalające na poprawę jakości rozpylenia paliwa w przestrzeni roboczej silnika. Takie uzupełnienie istniejących modeli symulacyjnych stanowi istotny wkład Autora do rozwoju wiedzy na temat mechanizmów wtrysku paliwa i możliwości jego symulacji.

Dodatkowym osiągnięciem – wspomnianym już wcześniej – jest dokonanie dobrej syntezy dotychczasowej wiedzy na temat modelowania niestacjonarnych procesów wtrysku paliwa z uwzględnieniem jego przegrzania i wrzenia oraz gwałtownego rozprężania par paliwa w trakcie formowania i rozpadu strugi paliwa.

## 11. Podsumowanie oceny

Przedstawiona do oceny rozprawa stanowi opracowanie zwarte opisujące kolejne etapy podjętych badań nad modelowaniem procesu niestacjonarnego wtrysku paliwa i formowania jego strugi z uwzględnieniem jej rozpadu w wyniku wrzenia i wewnętrznego parowania. Doktorant określił problem badawczy na podstawie syntezy literatury przedmiotu, przyjął odpowiednią jego zdaniem drogę postępowania dla wyjaśnienia tego problemu i udowodnienia postawionej tezy. Zbudował i dostosował do swoich eksperymentów stanowisko badawcze złożone z nowoczesnych urządzeń i elementów pomiarowych odpowiadających obowiązującemu standardowi światowemu, następnie przeprowadził badania optyczne dla różnych parametrów badawczych oraz przeprowadził interpretację wyników.

Autor przeprowadził również syntezę wiedzy na temat matematycznego modelowania procesów wtrysku i tworzenia strugi paliwa. Wiedzę swoją wykorzystał do rozszerzenia istniejących modeli o zagadnienie wtrysku wrzącego paliwa, parującego objętościowo, a następnie swój model skalibrował i zweryfikował w oparciu o zebrane wyniki badań eksperymentalnych. W ten sposób praktycznie udowodnił i wykorzystał swoją wiedzę teoretyczną, i w ten sposób spełnił wymagania dotyczące samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Zgodnie z zapisami Ustawy *Prawo o Szkolnictwie Wyższym* rozprawa doktorska ma prezentować ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie, która reprezentuje, oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej (art. 187, pkt. 1).

Można w związku z tym stwierdzić, że Doktorant w sposób oryginalny rozwiązał problem naukowy polegający na krytycznej badawczej ocenie możliwości i korzyści wynikających z badania i modelowania wtrysku paliwa w warunkach temperatury wrzenia i rozprężania par paliwa dla poprawy jakości rozpylenia paliwa. Tym samym spełnił wymagania zapisane w Ustawie, w art. 187, pkt. 2.

## 12. Wniosek końcowy

Oceniając pozytywnie treść rozprawy, jej warstwę badawczą i studyjną oraz osiągnięcia Autora w zakresie prowadzenia złożonych badań naukowych uważam, że rozprawa doktorska przedstawiona przez mgr. inż. Jakuba Bachanka stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego przez Niego naukowego problemu badawczego oraz wskazuje na Jego ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, spełnia więc wymagania ustawy *Prawo o Szkolnictwie Wyższym* z dnia 20 lipca 2018 r., (Dz. U. poz. 1668) z późniejszymi zmianami (Dz.U. 2022 poz. 574, Dz.U.2023.742, Dz.U.2023.212), wchodzącymi w życie z dniem 1 maja 2023 r., a szczególnie wymagania w zakresie dotyczącym rozpraw doktorskich określone w Dziale V *Stopnie i tytuł w systemie szkolnictwa wyższego i nauki*, Rozdz. 2, *Nadawanie stopnia doktora*, Art. 187. Stawiam więc wniosek o dopuszczenie Autora do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę konstatacje przedstawione w punktach 10 i 11 tej opinii wyrażam swoje przekonanie, że Kandydat nabył wystarczające kwalifikacje naukowe do samodzielnej pracy badawczej i – po prawidłowym przebiegu obrony – będę popierać wniosek o nadanie Mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

Biorąc pod uwagę zarówno oryginalność i zakres objęty dysertacją, jak i bardzo rzetelny i wyczerpujący sposób opracowania rozprawy, a także fakt opracowania treści w języku angielskim i wydania jej drukiem w postaci zwartej, z bardzo dobrym opracowaniem graficznym i edytorskim, wnoszę o wyróżnienie rozprawy.



*Krzysztof Wisłocki*