

dr hab. inż. Artur Gutkowski, prof. uczelni  
Politechnika Łódzka  
Wydział Mechaniczny  
Instytut Maszyn Przepływowych  
ul. Wólczańska 219/223, 90-924 Łódź  
email: artur.gutkowski@p.lodz.pl

Łódź, dnia 27.01.2025

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adriana Parzybuta**

**pt. „Projekt, badanie oraz rozwój ekologicznego silnika raketowego zasilanego wysoko stężonym nadtlakiem wodoru do satelitarnego modułu napędowego POLON”**

### 1. Podstawa wykonania recenzji

Podstawą przygotowania recenzji jest pismo nr RNDIM/521.18/2024 Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, Pana prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika, z dnia 21.10.2024 informujące o powołaniu mnie na recenzenta pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Adriana Parzybuta. Wraz z pismem otrzymałem egzemplarz pracy wydanej w postaci monografii.

### 2. Aktualność tematu rozprawy

Tematem rozprawy doktorskiej było opracowanie, zbudowanie oraz badania eksperymentalne silnika raketowego o ciągu 1 N, zasilanego wysoko stężonym (98%) nadtlakiem wodoru ( $H_2O_2$ ). Konstrukcja miała spełniać wymagania modułu napędowego projektu POLON. Rozwój małych silników raketowych wykorzystujących rozkład nadtlaku wodoru (rozkłada się na tlen i wodę) wynika z zapotrzebowania na ekologiczne systemy napędowe w eksploracji kosmosu. W porównaniu do tradycyjnych toksycznych paliw, takich jak hydrazyna,  $H_2O_2$  jest bezpieczniejszy w przechowywaniu i obsłudze. Już w czasie II wojny światowej  $H_2O_2$  wykorzystywano jako utleniacz w niemieckich raketach V2, co ukazało jego potencjał w zastosowaniach raketowych. Późniejsze prace, takie jak brytyjskie programy Black Knight i Black Arrow, potwierdziły jego przydatność w systemach napędowych średniego zasięgu. Z kolei badania NASA z lat 50 w zakresie jednoskładnikowych materiałów pędnych dla systemów kontroli pozycji położyły podwaliny pod współczesne technologie. Biorąc to wszystko pod uwagę uważam wybór tematu pracy doktorskiej za trafny i istotny dla nauki i przemysłu kosmicznego.

### 3. Charakterystyka treści rozprawy

Treść rozprawy została przedstawiona na 216 stronach z zachowaniem podziału na: streszczenie w języku angielskim i polskim, spisy: treści, rysunków oraz tabel, wykaz akronimów oraz 8 rozdziałów. W pracy zamieszczono 99 rysunków i 35 tabel. Bibliografia zawiera 176 pozycji, w tym dziesięć, których Doktorant był autorem (praca magisterska) lub współautorem. Brak jest natomiast spisu wykorzystywanych symboli.

Praca zaczyna się od bardzo obszernego **Wstępu**, składającego się z czterech podrozdziałów, dotyczących: napędów satelitarnych (1.1), silników raketowych zasilanych jednoskładnikowym materiałem pędnym (1.2), nadtlenu wodoru (1.3) i przeglądu literatury oraz wyzwań związanych z nadtlaniem wodoru (1.4). Uważam, że rozdział ten mógłby być lepiej podzielony i bez większego trudu można by pominąć ostatni podrozdział natomiast materiał w nim zawarty lepiej rozdysonować wśród innych podrozdziałów. Nie widzę powodu aby właśnie jego nazywać przeglądem literatury, jeżeli tak naprawdę poprzednie części także nimi są.

W następnym rozdziale zawarto cel i tezę pracy. Główny cel został zdefiniowany jako opracowanie, badania doświadczalne oraz rozwój silnika raketowego zasilanego 98% nadtlaniem wodoru do zastosowań satelitarnych, zgodnie z wymaganiami modułu napędowego POLON. W dalszej części cel ten został uściślony poprzez dodanie sześciu podpunktów przedstawiających proces projektowania, testowania i optymalizacji aż do opracowania dokumentacji technicznej konstrukcji silnika. Natomiast teza została sformułowana następująco:

*Silnik raketowy na jednoskładnikowy materiał pędny zasilany wysoko stężonym nadtlaniem wodoru może stanowić efektywną i ekonomiczną alternatywę, dla obecnie stosowanych silników raketowych zasilanych toksycznymi materiałami pędnymi, zapewniając porównywalne osiągi przy jednoczesnym zmniejszeniu negatywnego wpływu na środowisko.*

Rozdział 3 (**Wymagania dla napędu w projekcie modułu POLON**) zawiera krótki cztero-stronicowy opis podstawowych wymagań stawianych napędowi w projekcie modułu POLON. Rozdział jest zakończony tabelą zawierającą osiemnaście najważniejszych wymagań funkcjonalnych, którymi są: stężenie materiału pędnego, ciąg projektowy, powtarzalność ciągu dla stanu ustalonego, zakres ciśnień zasilania, całkowita masa materiału pędnego, liczba cykli termicznych, liczba pulsów, liczba zimnych startów, najdłuższe uruchomienie, sumaryczny czas pracy, niestabilność ciśnienia, niestabilność ciągu, impuls właściwy, czas narastania, czas spadku, impuls minimalny, powtarzalność impulsów minimalnych i masa.

Czwarty rozdział (zatytułowany **Projekt silnika o ciągu 1 N zasilanego HTP**) zawiera bardzo zróżnicowany materiał, poczynając od wstępnych obliczeń silnika, w których Doktorant określa, z wykorzystaniem programu CEA, takie parametry jak impuls właściwy, temperaturę adiabatyczną, prędkość charakterystyczna oraz skład gazu po rozkładzie paliwa. Dalsze obliczenia pozwalają określić takie wielkości jak ciąg, wydatek masowy, ciśnienie w komorze a także średnicę przekroju krytycznego. Bazując na tych danych oraz posiłkując się oprogramowaniem *RPA (Tool for Rocket Propulsion Analysis)* zaprojektował części zbieżne i rozbieżne dyszy wylotowej. W następnym podrozdziale są przedstawione analizy numeryczne

dotyczące przepływu w dyszy wylotowej oraz przepływu ciepła w elementach silnika. Uważam, że ta część tego rozdziału została przygotowana bardzo pobieżnie. Nie przedstawiono żadnych rysunków, na których byłyby zaznaczone wykorzystane podczas symulacji warunki brzegowe ani wymiary, co bardzo utrudnia analizę otrzymanych wyników. Następnie opisano pięć kolejnych wersji silnika oraz podstawowych jego elementów tj.: katalizatora, dyszy wylotowej, wtryskiwaczy i zaworów.

W rozdziale piątym (**Plan testów**) został przedstawiony szczegółowy harmonogram badań dla każdego z silników. Opisane zostały stanowiska, na których te testy były realizowane oraz wykorzystywana aparatura.

Następny rozdział, zatytułowany **Wyniki oraz analiza wyników**, przedstawia wyniki testów jakim były poddane silniki oraz ich krytyczną analizę. Należy dodać, że rezultaty przytoczone w tej części pracy stanowią bardzo cenny materiał i są źródłem bardzo cennych informacji.

W rozdziale 7, który został nazwany **Wdrożenie**, przedstawiono na dwóch stronach, jakie działania powinny być zrealizowane w celu komercjalizacji tej konstrukcji oraz w jakich projektach może wziąć udział. Uważam, że rozdział ten jest zbędny a treści w nim zawarte mogłyby być przeniesione do ostatniego rozdziału.

Ósmy rozdział (**Podsumowanie i wnioski**) zawiera siedemnasto-punktowe podsumowanie efektów pracy Doktoranta oraz konieczne kroki do pełnej weryfikacji wszystkich wymagań, które powinien spełnić silnik.

#### 4. Ocena pracy

Przedstawiona przez Doktoranta praca zawiera zadanie o charakterze typowo praktycznym jakim było zbudowanie małego silnika raketowego. Chciałbym podkreślić, że cel jaki postawił sobie Doktorant był bardzo wymagający i ambitny, a jego zrealizowanie nie ograniczało się tylko do typowych prac inżynierskich. Zaprojektowanie i zbudowanie tak naprawdę szeregu stanowisk badawczych, dobrane i opanowanie odpowiednich metod pomiarowych, wykorzystywanych dla różnych rodzajów testów, przeprowadzenie obszernych badań eksperymentalnych prowadzących w końcu do zbudowania działającego silnika pokazuje, jak obszerną pracę musiał wykonać Doktorant.

Układ pracy jest poprawny choć wydaje mi się, że zawartą w niej treść można było przedstawić w bardziej zwięzły sposób. Od strony edytorskiej zdarzają się pewne niedociągnięcia, które szerzej są przedstawione w rozdziale szóstym (Uwagi edycyjne i inne).

Uzyskane wyniki stanowią bardzo obszerne źródło informacji do dalszych prac konstrukcyjnych i badawczych w kontekście rozwijania technologii małych silników raketowych wykorzystujących rozkład egzotermiczny wysoko stężonego nadtlenu wodoru.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta zaliczyłbym oczywiście samo zbudowanie działającego silnika raketowego wykorzystującego 98% nadtlenu wodoru jako paliwo, ale bardzo istotne były także etapy prowadzące do tego, czyli dobór i badania wszystkich elementów składowych silnika a także samo zaplanowanie procedur testowania podzespołów.

## 5. Uwagi do pracy

Podczas czytania przedstawionej rozprawy doktorskiej nasunęły mi się pewne pytania i wątpliwości, wymagające wyjaśnienia lub szerszej dyskusji.

- Autor, podaje jako główny cel swojej pracy: opracowanie, badania doświadczalne oraz rozwój silnika raketowego zasilanego 98% nadtlakiem wodoru. Sformułowanie „rozwój” jest dość ogólnym zwrotem i może wskazywać na plan długoterminowy, niekoniecznie ograniczający się do pracy nad dysertacją. Dlatego może lepiej byłoby to sprecyzować.
- Podczas definiowania szczegółowych celów pracy bardzo często wykorzystane jest słowo „optymalizacja”: „optymalizacja projektu napędu”, „optymalizacja parametrów pracy silnika” i „optymalizacja projektu silnika w celu maksymalizacji osiągnięć”, odnoszę wrażenie, że przynajmniej w kilku przypadkach mieliśmy raczej do czynienia z wybraniem najlepszego rozwiązania z kilku dostępnych aniżeli z prawdziwym procesem optymalizacyjnym.
- Na stronie 92 Doktorant napisał, że do zoptymalizowania kątów w dyszy wylotowej opierał się na własnym doświadczeniu. Czy można wyjaśnić szczegółowiej jak ten proces optymalizacji przebiegał?
- Uważam, że rozdział dotyczący analiz numerycznych jest najsłabszą częścią pracy. Zazwyczaj opis problemu rozpoczyna się od przedstawienia geometrii z wymiarami i warunkami brzegowymi. Natomiast Doktorant pokazuje siatki, które jak w przypadku rys. 19, wymagają domyslenia się co przedstawiają. Nie ma informacji dlaczego używane są modele turbulencji (jaka wartość liczby Reynoldsa, i jak była liczona?). Czy była przeprowadzona analiza wpływu siatki na wynik dla analizy przepływu w dyszy wylotowej i linii zasilania?
- Wartości otrzymanych współczynników przenikania ciepła są dość wysokie, jest to możliwe zwłaszcza dla kanałów o małej średnicy, ale nie mogłem znaleźć informacji jakie były średnice rurki doprowadzającej, kanałów doprowadzających itd. (str. 100). Informacje o średnicach pojawiły się dopiero na str. 123, ale czy odnoszą się do analizowanego numerycznie przypadku? Jaka była liczba  $Re$ ? Wykorzystując dostępne w literaturze zależności na współczynnik przejmowania ciepła łatwo można zweryfikować otrzymane wyniki, np. dla rurki doprowadzającej, czy było coś takiego zrobione?
- W pracy napisano, że docelowym miejscem pracy silnika jest przestrzeń kosmiczna, która między innymi charakteryzuje się ekstremalnymi wahaniami temperatury. Jakie temperatury ma Doktorant na myśli i w jaki sposób sprawdzono, że silnik podoła tym wyzwaniom?
- Skąd wzięto wymagane parametry przedstawione w tabelach 30, 31 i 32?
- Na stronie 149 napisano, że spadki ciśnienia były wykonane dla wody a następnie zostały przeliczone dla nadtlaku wodoru, na czym polegało to przeliczenie?
- Podczas testowania złoża Doktorant zauważył, że znacznie szybszy przyrost ciśnienia jest dla wyższych temperatur (rys. 54). Według mnie, w pierwszej fazie linie pokrywają się dla wszystkich temperatur oprócz najwyższej (250°C), ale nachylenie krzywych jest podobne.
- W opisie dostępnym na stronie 29 pojawia się stosunek  $L/D$ , dlaczego te wielkości ( $L$  i  $D$ ) nie są przedstawione na rys. 17?

- Rys. 13 znajdujący się na stronie 85 jest w zasadzie powtórzeniem części rys. 12 zamieszczonego na stronie 79.
- Krzywe przedstawione na rys. 85 zostały wygładzone za pomocą aproksymacji wielomianowej. Może dobrze by było pokazać dane chociaż dla jednego przypadku bez obróbki. Pozwoliłoby to ocenić wpływ tego procesu na krzywe prezentowane na rysunku.
- W podsumowaniu Doktorant napisał, że zbudowany przez niego silnik wykazuje efektywność i wydajność porównywalną do silników opartych na toksycznych materiałach pędnych, takich jak hydrazyna. Niestety, ale w pracy nie znalazłem porównania potwierdzającego ten wniosek.
- W pracy są wykorzystywane dwa rodzaje jednostek temperatury, natomiast powinny być tylko K.

## 6. Uwagi edycyjne i inne:

1. Strona 27, wzór (1) – elementy wchodzące w skład równania nie dają jednostki [m/s],
2. Strona 27 – jednostka impulsu właściwego najpierw jest podana jako [s] a we wzorze (2) widnieje [m/s],
3. Strona 28, 8 wiersz od dołu – jest napisane „Zgodnie z formułą 5 dla silnika...” a powinno być „Zgodnie z formułą (5) dla silnika...”,
4. Strona 37, rysunek 2 – strzałki zatytułowane kolektor wlotowy i wtryskiwacz pokazują ten sam element konstrukcji,
5. Strona 45, 14 wiersz od góry – jest „echują się one...” a powinno być „Cechują się one...”,
6. Strona 47, 14 wiersz od góry – jest „ta substancję” a powinno być „tą substancję”,
7. Strona 51 – nie zauważyłem, aby Tab. 3, była wymieniona w tekście,
8. Strona 53, 54 i 55, Rys. 5, 6 i 7 – nie podano jakie udziały są wykorzystane na osi poziomej,
9. Strona 59, 14 wiersz od góry – jest „spadek aktywności katalizatorów w czasie w przeszłości”, co to znaczy?
10. Strona 62, 7 wiersz od góry – jest „w rurkach dopływowy” a chyba powinno być „w rurkach dopływowych”,
11. Strona 62, 10 wiersz od góry – jest „używany do komponentów używanych” – styl,
12. Strona 65, 6 wiersz od dołu – jest „efektywnego rozkładu” a powinno być „efektywnego rozkładu”,
13. Strona 74, 17 wiersz od góry – jest „w kierunku wtryskiwacza” a powinno być „w kierunku wtryskiwacza”,
14. Strona 83, 9 wiersz od góry – jest „siników” a powinno być „silników”,
15. Strona 91, 3 wiersz od góry – jest „we poprzedzających obliczeniach” a chyba powinno być „we wcześniejszych obliczeniach”,
16. Strona 92, 7 wiersz od góry – brakuje końcówki zdania,
17. Strona 92, 10 wiersz od góry – jest „badanych silnikach niewielkich silnikach zasilanych http” – styl,
18. Strona 98, 9 wiersz od góry – jest „zarówno zmianę temperatury zarówno wzdłuż” – styl,
19. Strona 98, rys. 20 – brakuje jednostki długości na osi poziomej,
20. Strona 102, 1 i 2 wiersz od góry – powtórzono dwa razy to samo „Stan ustalony”,

21. Strona 110, 5 wiersz od dołu – jest „niewiele się różni nieznacznie od” – styl,
22. Strona 118, 8 wiersz od dołu – jest „warianty, które nie spełniały wymagań lub ich osiągi były niezadawalające była odrzucane” a powinno być „warianty, które nie spełniały wymagań lub ich osiągi były niezadawalające były odrzucane”,
23. Strona 126, 12 wiersz od góry – jest „zaprezentowane na Tab. 25” a powinno być „zaprezentowane w Tab. 25”,
24. Strona 128, 14 wiersz od góry – jest „przykręcenie śrubami z odpowiednim momentem śrubami do modułu” – styl,
25. Strona 128, 16 wiersz od góry – jest „naprężenia na elemencie” a powinno być „naprężenia w elemencie”,
26. Strona 134, 6 wiersz od góry – jest „centralnie przeprowadzoną linią” a powinno być „centralnie przeprowadzoną linią”,
27. Strona 151 – nie zauważyłem, aby rys. 53 był wspomniany w tekście,
28. Strona 152, 1 wiersz od dołu – jest „ma wpływ uzyskanie” a powinno być „ma wpływ na uzyskanie”,
29. Strona 162, 3 wiersz od dołu – jest „Różnica był” a chyba powinno być „Różny był”,
30. Strona 191, 6 wiersz od dołu – jest „przeprowadzenie dodatkowych badań z wyłączonymi” wydaje mi się, że chyba chodzi o pompy?
31. Strona 192, 4 wiersz od góry – jest „POLON jest gotowy jako gotowy produkt” – styl,
32. Strona 195, 10 wiersz od dołu – jest „wraz z ilością rozłożonego materiału pędnego wraz z degradacją” – styl,
33. Strona 198, 3 wiersz od góry – jest „Sprawdzono charakterystykę prędkości charakterystycznej” – styl.

## 7. Wniosek końcowy

Reasumując, rozprawa doktorska mgr inż. Adriana Parzybuta zatytułowana „*Projekt, badanie oraz rozwój ekologicznego silnika raketowego zasilanego wysoko stężonym nadtlakiem wodoru do satelitarnego modułu napędowego POLON*”, odpowiada na zapotrzebowanie naukowe związane z konstrukcją małych napędów raketowych. Możliwość wykorzystania bardziej ekologicznego paliwa jakim jest nadtlak wodoru w silnikach raketowych daje szansę na szybszy rozwój technologii kosmicznych w naszym kraju.

Praca mieści się w dyscyplinie *Inżynieria Mechaniczna*.

W ramach rozprawy doktorskiej pan mgr inż. Adrian Parzybut wykazał się dobrym opanowaniem warsztatu inżynierskiego oraz umiejętnościami samodzielnego planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych, krytyczną analizą otrzymanych wyników a także wnioskowania.

Podsumowując przeprowadzoną recenzję rozprawy doktorskiej, stwierdzam, że przedłożony dokument w pełni spełnia kryteria określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2022, poz. 574 z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*A. Gutkowski*