

Dr hab. inż. Monika Zajemska, prof. PCz
Politechnika Częstochowska
Wydział Inżynierii Produkcji
i Technologii Materiałów
ul. Armii Krajowej 19
tel.: 34 3250 631
e-mail: monika.zajemska@pcz.pl

Częstochowa, dnia 4.03.2024 r.

Sz. P. prof. dr hab. inż. Robert Sitnik
Przewodniczący Rady Dyscypliny Naukowej
Inżynieria Mechaniczna
Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pana mgr inż. Przemysława Paszkiewicza „Experimental characterization of a sub-Newton electrothermal thruster using 98% hydrogen peroxide”

Podstawa opracowania recenzji

Niniejsza recenzja została sporządzona w odpowiedzi na pismo nr RNDIM/521.1/2024 z dnia 9 stycznia 2024 r.

1. Wprowadzenie

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr inż. Przemysława Paszkiewicza zatytułowana „Experimental characterization of a sub-Newton electrothermal thruster using 98% hydrogen peroxide” ulokowana jest w aktualnym i perspektywicznym obszarze badawczym, odpowiadającym na szeroko pojęte wyzwania, m.in. rynkowe i środowiskowe, nie tylko przemysłu kosmicznego, ale również zbrojeniowego w zakresie ekologicznych i wysokowydajnych materiałów pędnych. Aktualnie, ze względu na ograniczoną dostępność 98% nadtlenu wodoru (HTP) oraz brak doświadczenia w użytkowaniu wysoko skoncentrowanego HTP, najbardziej rozpowszechniony jest H₂O₂ o stężeniu 87,5%. Ze względu na swoje właściwości wysoko stężony nadtlenek wodoru (98%) ma ogromny potencjał aplikacyjny m.in. do zastosowania w silnikach raketowych dla przyszłych platform satelitarnych, ładowników oraz ostatnich stopni rakiet nośnych. Nadtlenek wodoru klasy HTP to jednoskładnikowy materiał pędny, który jest jedną z niewielu substancji mających zastosowanie w silnikach raketowych. Ponadto, jego jedną z głównych właściwości jest bezpieczeństwo, jest bowiem bezpieczniejszy, zarówno dla środowiska, jak i personelu

aniżeli obecnie stosowane wysoko toksyczne materiały pochodne hydrazyny czy tlenków azotu.

Mając na uwadze powyższe, stwierdzam, że realizacja pracy wniosła istotną i nową wiedzę w obszar ekologicznych materiałów pędnych i silników raketowych oraz w mojej ocenie, stworzyła podstawy do praktycznego wykorzystania koncepcji silnika, w którym egzotermiczny rozkład 98% nadtlenu wodoru realizowany był w reaktorze bez dedykowanego wypełnienia materiałem o własnościach silnie katalitycznych, a poprzez zastosowanie rezystancyjnego elementu grzejnego. Mogę także bez wątpliwości stwierdzić, że opiniowana praca wpisuje się w dyscyplinę naukową Inżynieria Mechaniczna, w której została przedstawiona.

2. Zakres rozprawy

Recenzowana praca napisana jest w języku angielskim, liczy 156 stron, 79 rysunków i 9 tabel. Podzielona jest na 5 rozdziałów, a całość kończy obszernie podsumowanie wraz z krytyczną oceną pracy. Ponadto rozprawa obejmuje streszczenie w języku polskim i angielskim, spis rysunków i tabel, spis skrótów i oznaczeń oraz spis literatury. Wykaz literatury obejmuje 115 pozycji o zasięgu międzynarodowym, z czego przeszło połowa to prace wydane w latach 1949-1999, 30 prac z ostatnich dziesięciu lat, w tym 4 prace współautorskie Doktoranta (pozycje: [27], [35], [90] oraz [114]). W mojej ocenie Doktorant poświęca części literaturowej zbyt wiele miejsca w pracy, ponieważ stanowi ona aż połowę pracy, a w szczególności zbyt wiele uwagi w części literaturowej pozycjom z lat 50 : 1.4.4 Thermal decomposition of hydrogen peroxide vapour. Brakuje informacji, czy tak mała ilość prac z ostatnich lat wynika z luki literaturowej w tej tematyce, czy Doktorant ograniczył ilość słów kluczowych podczas przeszukiwania zasobów baz danych. Nasuwa się pytanie: czy dokonano systematycznego przeglądu literatury np. metodą mapowania nauki z wykorzystaniem programu VOSviewer, aby oszacować zasoby literaturowe w obszarze analizowanej problematyki?

Pracę rozpoczyna krótkie Streszczenie, w którym Doktorant uzasadnia wybór tematu pracy oraz w sposób syntetyczny opisuje przeprowadzone prace badawcze i dokonuje analizy otrzymanych wyników. W rozdziale 1 „Introduction” Doktorant skupił się na charakterystyce nadtlenu wodoru, począwszy od rysu historycznego zastosowania napędu w postaci nadtlenu wodoru, poprzez właściwości fizyczne, podstawy napędu kosmicznego (klasyfikacja układów napędowych i napędu raketowego), rozkład nadtlenu wodoru, w tym kinetyka chemiczna, termiczny rozkład wodoru w fazie ciekłej oraz par nadtlenu wodoru, właściwości detonacyjne, skończywszy na rozkładzie termicznym HTP w warunkach zbliżonych do silnika odrzutowego.

W pierwszej części niniejszej rozprawy Autor dokonał obszernego przeglądu literatury i dostarczył informacji dotyczących właściwości fizycznych nadtlenu wodoru oraz podstaw napędu kosmicznego, w tym klasyfikacji stosowanych układów napędowych oraz podstaw napędu raketowego. Następnie omówiono rozkład nadtlenu wodoru. Uwzględniono różne sposoby rozkładu oraz przedstawiono dane dotyczące rozkładu termicznego i charakterystyki wybuchowej nadtlenu wodoru. W kolejnych rozdziałach zamieszczono informacje dotyczące elektrycznie ogrzewanych napędów hydrazynowych, które ze względu na ograniczone dostępne dane dotyczące nadtlenu wodoru miały na celu wprowadzenie technologii silników niekatalitycznych, niewspomaganych, w których nie zaimplementowano dedykowanego złoża katalitycznego.

Rozdziały 2, 3 i 4, ze względu na swoją zawartość, stanowią zasadniczą część pracy. W rozdziale 2 „Objectives and methodology” omówiono cele pracy i metodologię

przeprowadzonych badań. Motywacją rozprawy jest eksperymentalna charakterystyka parametrów pracy laboratoryjnej wersji silnika monopropellantowego do zastosowań kosmicznych, w której nie użyto dedykowanego materiału katalitycznego do rozkładu zastosowanego materiału pędnego – 98% nadtlenu wodoru. Doktorant sformułował następującą tezę pracy: *Możliwe jest uzyskanie samopodtrzymującego, stabilnego rozkładu 98% nadtlenu wodoru w sub-newtonowym, elektrotermicznym, monopropellantowym silniku odrzutowym niewyposażonym w dedykowane złoże katalizatora.*

Ze względu na ograniczone dane dotyczące możliwości inicjowania i podtrzymywania niezawodnego rozkładu w rezystancyjnie ogrzewanych jednostkach subnewtonowych, głównymi celami rozprawy są:

- Zaprojektowanie laboratoryjnego silnika odrzutowego o zmniejszonej masie i znalezienie inżynierskiego rozwiązania umożliwiające dokładne jego zbadanie.

- Zbadanie, czy istnieją warunki do wybuchowego rozkładu; ustalenie, czy proponowana koncepcja może być bezpiecznie testowana i eksploatowana bez stwarzania krytycznego lub katastrofalnego zagrożenia awarią.

- Określenie czynników, które wpływają na charakterystykę badanego silnika. Na podstawie dostępnych danych literaturowych można stwierdzić, że można zainicjować rozkład, jednak warunki panujące podczas wspomnianych badań nie pozwoliły na dokładne zbadanie procesu, gdyż masa badanego w cytowanych dokumentach jednostki była znaczna, a czas trwania eksperymentów krótki, w związku z czym brakuje danych dotyczących czynników wpływających na parametry pracy. Celem jest poszerzenie wiedzy poprzez dostarczenie informacji dotyczących:

- charakterystyki temperaturowej – oszacowanie granic temperatury niezbędnych do efektywnego działania badanego silnika,

- charakterystyki napędowej i zbadanie ich zależności od temperatury,

- zbadanie, czy proces rozkładu może być samopodtrzymujący się w silniku odrzutowym o zmniejszonej masie i czasie trwania eksperymentu testowego rzędu minut.

W rozdziale 3 „Experimental facility” Doktorant przedstawił schemat i widok stanowiska badawczego wraz ze szczegółowym opisem poszczególnych elementów stanowiska, a mianowicie: budowę silnika odrzutowego, układu wtryskowego i grzałki, opisał dodatkowe wyposażenie pomocnicze oraz szczegółowo omówił procedurę pomiarową, próby szczelności oraz zamieścił wykaz najważniejszych urządzeń pomiarowych wykorzystywanych podczas badań (tabela 3.1). Mierzonymi wielkościami były: ciśnienie, temperatura, masowe natężenie przepływu, prąd i napięcie. Wszystkie serie pomiarowe podzielono na trzy części. Najpierw przeprowadzono eksperymenty w serii „dużej mocy”, podczas której zawór był otwierany na 20 s, a czas trwania sekwencji podgrzewania wynosił od 6 do 34 s. Średnia moc grzałki wynosiła od ~190 do ~320 W. Następnie przeprowadzono serię „niskiej mocy”, podczas której moc grzałki wahała się od 8,8 do 20,4 W, a sekwencja podgrzewania została wydłużona do 30 minut w każdym teście. Dodatkowo podzielono tę serię jeszcze na dwie, gdzie podczas pierwszej zawór był otwierany przez 70 s, grzałka pozostawała aktywna przez 40 s, a następnie była wyłączana, natomiast podczas drugiej czas trwania eksperymentu wydłużono do 120 s, a grzałka była aktywna przez 60 s po otwarciu zaworu. Po zmianie ustawień napięcia zasilacza laboratoryjnego wykonano krótkie, 5-sekundowe testy w celu zbadania jakości rozkładu przed rozpoczęciem długich serii.

W rozdziale 4 przedstawiono wyniki badań wraz z obszerną i krytyczną dyskusją.

Otrzymanie końcowych wyników badań w ramach przeprowadzonych 122 testów poprzedziło przeprowadzanie ponad 1500 eksperymentów, jak Doktorant podkreśla - w większości nieudanych, mających na celu dopracowanie i optymalizację procedur, w tym działań związanych z bezpieczeństwem i rozwiązaniem problemów technicznych, które pojawiły się w trakcie eksperymentów. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów, Doktorant przedstawił na 42 rysunkach i w 5 tabelach, a głównymi zmiennymi były moc rezystancyjnego elementu grzejnego oraz czas trwania próby. Zaobserwowano, że podczas testów dużej mocy czas rozpadu ustabilizował się powyżej 375 do 400°C, natomiast podczas serii małej mocy, w 5-sekundowych testach maksymalne ciśnienie i temperatura w komorze, mierzone w osi, gwałtownie rosły, jeśli początkowa temperatura ścianki była wyższa niż ~150°C, co odpowiada normalnej temperaturze wrzenia materiału pędnego. Podobne obserwacje miały miejsce w odniesieniu do czasu spadku ciśnienia, a mianowicie jeśli średnia temperatura ścianki w okresie spadku ciśnienia była wyższa niż ~150°C, czas rozpadu ulegał znacznemu skróceniu. W wyniku przeprowadzonych licznych testów, potwierdzono możliwość inicjacji oraz podtrzymania stabilnego rozkładu nadtlenu wodoru, także w przypadku procesu samopodtrzymującego, tj. gdy ciepło nie było dostarczane do reaktora za pośrednictwem elementu grzejnego. Określono temperaturę umożliwiającą inicjację spontanicznego rozkładu w warunkach, w jakich prowadzone były badania na poziomie 150°C, co odpowiada normalnemu punktowi wrzenia 98% H₂O₂.

Pracę kończy zwięzłe podsumowanie wyników oraz stwierdzenia i wnioski końcowe.

3. Ocena rozprawy, elementy nowości i oryginalności

Oceniając całość pracy stwierdzam, że układ treści pracy jest prawidłowy, rozdziały zostały ułożone logicznie, a treść w nich zawarta odpowiada tytułom. Przeprowadzony przez Pana mgr inż. Przemysława Paszkiewicza obszerny zakres badań eksperymentalnych umożliwił pozyskanie wartościowych wyników, które Doktorant uporządkował, sprawiając, że układ pracy jest czytelny. Na podkreślenie zasługuje przejrzyste i staranne graficzne zilustrowanie wyników badań, co podnosi walory estetyczne przedstawionej do recenzji rozprawy.

Pod względem merytorycznym i metodycznym przedstawioną dysertację oceniam bardzo wysoko. Doktorant wykazał się dojrzałością naukową, a przeprowadzenie tak szerokiego zakresu badań eksperymentalnych było pracochłonne oraz wymagało opracowania metod ich interpretacji. Pan mgr inż. Przemysław Paszkiewicz dowiódł, że ma odpowiednie przygotowanie i umiejętności do rozwiązywania problemów naukowych.

Podsumowując stwierdzam, że ważnymi osiągnięciami w pracy, które są istotnym wkładem w rozwój dyscypliny Inżynieria Mechaniczna są:

- Zaprojektowanie i budowa stanowiska badawczego w oparciu o wymagania, określone z uwzględnieniem celów badawczych, którego centralną częścią jest silnik raketowy będący koncepcją laboratoryjną;
- Potwierdzenie, w wyniku przeprowadzonych eksperymentów, możliwości praktycznego zastosowania koncepcji silnika, w którym egzotermiczny rozkład 98% nadtlenu wodoru realizowany jest w reaktorze bez dedykowanego wypełnienia materiałem o własnościach silnie katalitycznych, a poprzez zastosowanie rezystancyjnego elementu grzejnego. Jednocześnie należy podkreślić, że dla wszystkich przeprowadzonych eksperymentów, w których głównymi zmiennymi były moc rezystancyjnego elementu grzejnego oraz długość próby, osiągnięto warunki bezpiecznej pracy silnika, i żaden test nie zakończył się wybuchem.

- Ocena procesów wewnątrzkomorowych w oparciu o analizy stabilności ciśnienia w komorze, czasu narastania oraz opadania ciśnienia, a także wartości prędkości charakterystycznej. Potwierdzona możliwość inicjacji oraz podtrzymania stabilnego rozkładu nadtlenu wodoru, również w przypadku procesu samopodtrzymującego, podczas którego ciepło nie było dostarczane do reaktora za pośrednictwem elementu grzejnego. Oszacowano, że temperatura umożliwiająca inicjację spontanicznego rozkładu H₂O₂ w warunkach prowadzonych badań wyniosła 150°C, co odpowiada normalnemu punktowi wrzenia 98%.
- Zaproponowane w recenzowanej pracy nowatorskie rozwiązanie polegające na zastosowaniu nadtlenu wodoru o stężeniu 98% stanowi istotny wkład w przełomowe badania nad ekologicznymi i wysokowydajnymi napędami kosmicznymi.
- Nakreślenie kierunku przyszłych badań, a mianowicie Doktorant wskazał, że korzystne byłoby zbadanie wpływu stężenia propelentu na charakterystykę eksploatacyjną badanego silnika.
- Dodatkowo w prezentowanych badaniach wykorzystano reaktor o stosunkowo dużych rozmiarach. Należy przeprowadzić badania w celu określenia granicznego obciążenia reaktora, dla którego można utrzymać efektywny rozkład. Z tego powodu zaleca się testowanie wyższych masowych natężeń przepływu paliwa. Co więcej, należy również zbadać alternatywne geometrie komór, w tym wdrożenie upakowania komór.

Mimo iż pracę oceniam bardzo pozytywnie, wyjaśnienia i uzupełnienia wymaga kilka istotnych kwestii, które zawarto w uwagach krytycznych i dyskusyjnych. Ponadto, Doktorant nie ustrzegł się błędów edytorskich, interpunkcyjnych, stylistycznych i innych, które zawarto w uwagach szczegółowych.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne:

Jak już wcześniej wspomniano przedstawione w pracy niektóre wyniki badań wymagają szerszej interpretacji i wyjaśnienia, a mianowicie:

- ✓ Dlaczego nie przeprowadzono bilansu materiałowo-energetycznego urządzenia?
- ✓ Czym był podyktowany dobór napięcia na grzałce, a mianowicie: 40, 45 i 50 V? przy 40 V na grzałce zachodziło pozostawianie części nierozłożonego nadtlenu wewnątrz silnika
- ✓ Brak charakterystyki napięciowo-prądowej grzałki
- ✓ W jaki sposób układ pomiarowy był przygotowywany do pomiarów? Czy był „przepłukiwany”, zwłaszcza przy niskim napięciu 40 V?
- ✓ Dlaczego nie używano amperomierza w obwodzie grzałki?
- ✓ Dlaczego nie wykonano rzeczywistej charakterystyki zależności oporności od temperatury?
- ✓ Czy zaproponowana koncepcja jest ekonomicznie uzasadniona?
- ✓ Doktorant na str. 79 podaje, że dane dotyczące charakterystyki materiału grzałki zaczerpnął z firmy OMEGA TM, dlaczego nie przeprowadzono pomiarów, aby uzyskać charakterystykę grzałki, zależności oporności od temperatury?
- ✓ Czy mierzono temperaturę grzałki w czasie np. 22, 24 czy 34 s?
- ✓ Rys. 4.2: dlaczego temperatura T₃ (wew. ściany komory) jest zawsze niższa od temperatury T_{wal} (temp. zew. ściany komory)?
- ✓ Jaka była charakterystyka źródła prądu?
- ✓ W podpisach pod rysunkami: 4.18; 4.19 i 4.20 nie podano ile trwała faza podgrzewania

✓ Rys. 4.23 i rys. 4.24: w podpisie pod rysunkami podano, że faza podgrzewania trwała 30 minut, podczas gdy czas na wykresie podano w sekundach, proszę o wyjaśnienie.

5. Uwagi szczegółowe

Doktorant nie ustrzegł się również błędów edytorskich, interpunkcyjnych, stylistycznych oraz innych, z których najważniejsze przytoczono poniżej:

- ✓ str. 26: brak „a” w mPa
- ✓ str. 43: jednostki nie są uporządkowane i spójne, np. zamiennie zapis tej samej jednostki w układzie SI i CGS; np. 1 atm -4 cm słupa rtęci a stosowany zamiennie mmHg zapis 1333 Pa a 2,7 kPa; 1,33 kPa lub 2700 Pa
- ✓ str. 46: może lepiej od 67 mbar do 267 mbar (można było przeliczyć na Pa)
- ✓ str. 54: brak konsekwencji w zapisie jednostek, albo 10^{-3} albo dziesiętne; $2,27 \cdot 10^{-3} = 0,00227$ a $0,068 = 68 \cdot 10^{-3}$
- ✓ Str. 57: nie podano jednostki przy wartości ciśnienia 27,6-1,38,
- ✓ Doktorant zarówno w tabelach, jak i w tekście oddziela ułamek dziesiętny przecinkiem, zamiast kropką, zapis ten byłby poprawny gdyby praca była napisana w języku polskim
- ✓ w spisie symboli nie podano jednostek, nie ma ich również w opisie wzorów
- ✓ podpisy pod rysunkami są zbyt szczegółowe: rys. 1.1; 1.22; 4.15;
- ✓ brak konsekwencji w zapisie jednostek ciśnienia (bar, mbar, Pa, mm Hg, i temperatury (°C, K: np. str. 45)
- ✓ brak konsekwencji w zapisie jednostki energii aktywacji: str. 41, w mojej ocenie nie ma potrzeby podawania dwóch jednostek kcal/mole a w nawisie kJ/mole, powinny być tylko kJ; podobna sytuacja ma miejsce na rys. 1.8 oraz na str. 43,
- ✓ podając zakres wartości np. temperatury użyto błędnego znacznika
- ✓ brak konsekwencji w podpisie jednostek przy rysunkach, raz Doktorant podaje po przecinku np. rys. 1.10, innym razem w nawiasie kwadratowym np. rys. 47
- ✓ brak konsekwencji w wymiarze długości powinien być w jednostkach układu SI, zamiast „mm” powinny być „m”, podobnie dla masy, raz jest w „kg”, innym razem „g”
- ✓ brak jednostek w opisie osi na rys. 4.1
- ✓ str. 90, rys. 4.2: na osi odciętych dla każdego z trzech wariantów dla tych samych zmiennych, jest różna skala; ta sama sytuacja na rys. 4.3. b) i c), zakres temperatury na obydwu wykresach powinien być jednakowy; podobnie dla czasu na rys. 4.5, 4.6 oraz rys. 4.7; rys. 4.13; 4.16;
- ✓ na rys. 4.8 oraz 4.9 na osi odciętych zaznaczono charakterystyczne temperatury: 333 i 549°C, podobnie na osi rzędnych, w mojej ocenie powinny być zamieszczone na wykresie
- ✓ Błędy pomiarowe powinny być zebrane w jednym z podrozdziałów i zestawione w tabeli.

6. Wniosek końcowy

Podsumowując ocenę przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej Pana mgr inż. Przemysława Paszkiewicza stwierdzam, że zawiera ona wartościowy materiał badawczy. Doktorant, dzięki dobremu opanowaniu warsztatu badawczego w zakresie trudnych do realizacji i czasochłonnych eksperymentów laboratoryjnych, uzyskał oryginalne dla teorii

i praktyki wyniki. Ponadto, wykazał się umiejętnością analizy otrzymanych wyników, co przełożyło się na sformułowanie syntetycznych wniosków i wyznaczenie zakresu dalszych badań.

Należy podkreślić, że zawarte w niniejszej recenzji uwagi w żaden sposób nie umniejszają wartości pracy i nie wpływają na jej wysoką ocenę końcową.

Biorąc pod uwagę wartość naukową rozprawy, zakres wykonanych badań i obliczeń, a także aplikacyjny charakter uzyskanych wyników, stwierdzam, że Doktorant posiada predyspozycje do samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz, że rozprawa spełnia wszystkie warunki stawiane rozprawom doktorskim i określone art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023 poz. 742) oraz stawiam wniosek do Wysokiej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony oraz dopuszczenie Pana mgr inż. Przemysława Paszkiewicza do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę wysoką wartość merytoryczną rozprawy, z elementami nowości naukowej wnioskuję o jej wyróżnienie.