

dr hab. inż. Krzysztof Karaśkiewicz
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska
Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa
e-mail: krzysztof.karaskiewicz@pw.edu.pl

Warszawa 20.04.2026

Ocena rozprawy doktorskiej pani mgr inż. Anety Nycz pt. „Wpływ parametrów konstrukcyjnych wirnika z łopatką szczelinową na pracę pompy wirowej o niskim wyróżniku szybkoobrotowości”

Tematem rozprawy pani mgr inż. Anety Nycz jest analiza wpływu parametrów konstrukcyjnych wirnika z łopatką szczelinową na parametry wolnobieżnej pompy wirowej. Podjęty przez Autorkę temat jest stosunkowo mało zbadany, liczba publikacji niewielka, brakuje obszerniejszych danych doświadczalnych. Przedstawiona rozprawa jest wartościowym uzupełnieniem tej luki pokazując jakie są ograniczenia a jakie zalecenia konstrukcyjne w projektowaniu wirników z łopatką szczelinową o małych wyróżnikach szybkoobrotowości.

Ocena formalna rozprawy doktorskiej

Przedłożona do recenzji rozprawa liczy ogółem 206 stron i jest podzielona na dziesięć rozdziałów włączając w to wykaz literatury. Rozdziały dzielą obszar badań w logiczny sposób. W wykazie literatury zawartych jest 135 pozycji w tym ponad połowa z ostatnich dwóch dekad, co pokazuje dość dobrą orientację Autorki w tematyce związanej z doktoratem. Praca ma właściwą liczbę rysunków i tabel ilustrujących wyniki badań.

Pod względem edycyjnym oceniana rozprawa nie zawiera uchybień.

Ocena merytoryczna rozprawy

W części SPIS OZNACZEŃ Autorka podaje przyjęte w pracy oznaczenia opierając się na istniejącej w polskim piśmiennictwie tradycji nazewnictwa. Pojawia się jednak kilka oznaczeń domagających się korekty recenzyjnej.

Ten sam symbol H jest przyjęty do oznaczenia wysokości podnoszenia i hipotezy. Może bardziej jednoznaczne byłoby przyjęcie H_{ip} . Podobnie V jest współczynnikiem zmienności i strumieniem objętości. Oznaczenie V w międzynarodowym układzie jednostek SI to objętość. Strumienie wielkości fizycznych określane są np. w postaci $\dot{V}$.

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Wpłynęło dnia 24.04.2026.

W obszarze pomp wirowych istnieje norma *PN-EN ISO 17769-1:2012 Pompy do cieczy oraz instalacja. Nazwy ogólne, definicje, wielkości, symbole literowe i jednostki. Część 1: Pompy do cieczy*, która definiuje i ujednolica nazwy parametrów pompowych.

W rozprawie doktorskiej kinematyczny wyróżnik szybkobieżności oznaczany jest jako n_q - norma zaleca n_s , nadwyżka antykawitacyjna 3% oznaczana jest $NPSH_3$ – norma zaleca $NPSH_3$.

Do oznaczenia wysokości energii całkowitej na wlocie i wylocie pompy PN EN ISO 9906 zaleca stosowanie indeksów cyfrowych 1 i 2, Autorka stosuje s oraz t nie wprowadzone zresztą do spisu.

W rozdziale 1 WPROWADZENIE Autorka uzasadnia potrzebę badań nad poprawą sprawności pomp wirowych. Podkreśla szczególne wyzwania w obszarze pomp wolnobieżnych bowiem cechują się one wąskimi kanałami, względnie dużymi powierzchniami tarcz wirujących, małymi wielkościami, co prowadzi do relatywnie dużych strat. Podaje szacunki zużycia energii przez zespoły pompowe w skali światowej i krajowej. Wymienia dyrektywy i rozporządzenia unijne kładące nacisk na poprawę energochłonności pomp oferowanych na rynku europejskim. Wzbogaceniem tej części byłoby dołączenie informacji o obowiązujących normach krajowych będących następstwem dyrektyw tj.

PN-EN 16480:2022-03 -- Pompy -- Pompy wirowe -- Wymagana minimalna sprawność pomp wodnych oraz wyznaczanie wskaźnika minimalnej efektywności (MEI)

PN-EN 16297-1:2013-04 - Pompy obiegowe bezdławnicowe -- Część 1: Wymagania ogólne oraz procedury badań i obliczeń wskaźnika energochłonności (EEI)

PN-EN 16297-2:2013-04 - Pompy obiegowe bezdławnicowe -- Część 2: Obliczanie wskaźnika energochłonności (EEI) dla wolnostojących pomp obiegowych

PN-EN 16297-3:2013-04 - Pompy obiegowe bezdławnicowe -- Część 3: Obliczanie wskaźnika energochłonności (EEI) dla pomp obiegowych wbudowanych w urządzenia

PN-EN 17038-1:2019-06 Pompy - Metody wyznaczania i weryfikacji wskaźnika efektywności energetycznej dla pomp wirowych - Część 1: Wymagania ogólne i procedury badania i obliczania wskaźnika efektywności energetycznej (EEI)

PN-EN 17038-2:2019-06 Pompy - Metody wyznaczania i weryfikacji wskaźnika efektywności energetycznej dla pomp wirowych - Część 2: Badanie i obliczanie wskaźnika efektywności energetycznej (EEI) pojedynczego zespołu pompowego

W rozdziale 2 ANALIZA STANU WIEDZY w podpunkcie 2.1 doktorantka omawia straty w pompach wirowych i ich strukturę. Zauważa, że niski wyróżnik szybkobieżności nie jest wyłącznym wyznacznikiem tych strat. Znaczenie mają również gabaryty pompy. W mniejszych pompach rośnie chropowatość względna, maleją przekroje kanałów co przekłada się na straty hydrauliczne.

Tytułem uzupełnienie w małych pompach nie da się też dowolnie zmniejszyć szczeliny na szyjce wirnika więc rośnie strata objętościowa, a w wąskich kanałach dominuje udział warstw przyściennych co przekłada się na wyższą stratę hydrauliczną. Wpływ szerokości kanału dobrze zresztą ilustruje rys. 5.10 z pracy.

Podpunkty 2.2 – 2.5 dotyczą badań różnych rozwiązań konstrukcyjnych w pompach wolnobieżnych. W szczególności w podpunkcie 2.4 doktorantka omawia wirniki z łopatkami typu splitter stosując spolszczenie *łopatki dzielone*. Taka nazwa sugeruje, że łopatka jest podzielona, zaś ta łopatka, rozdziela lub oddziela łopatki podstawowe, więc lepszym spolszczeniem wydaje się *łopatka oddzielająca (rozdzielająca)* lub *pośrednia*. Oprócz wymienionych przez Autorkę zalet stosowania tych łopatek zabrakło informacji o redukcji poślizgu, co przekłada się na większą wysokość podnoszenia. Warto dodać, że wirniki z takimi łopatkami są oferowane przez producentów pomp, również polskich, od dekad.

Dobrym zwyczajem przy przeglądzie i ocenie literatury jest podanie ograniczeń i krytycznych uwag na temat prezentowanych badań. W pracy jest ich niewiele.

W rozdziale 3 Autorka przedstawia cel, tezę i zakres pracy.

Jako cel podaje określenie wpływu parametrów geometrycznych łopatki szczelinowej wirnika na charakterystyki pracy pompy odśrodkowej wolnobieżnej a także podanie zaleceń projektowych dotyczących stosowania tej modyfikacji.

Autorka stawia hipotezę, że jest taka postać geometryczna łopatki szczelinowej, której zastosowanie w wirniku wolnobieżnej pompy wirowej prowadzi do wzrostu wysokości podnoszenia i/lub sprawności.

Zakres pracy, pozwalający zweryfikować postawioną tezę, obejmuje:

- przegląd literatury dotyczącej wolnobieżnych pomp oraz rozwiązań wpływających korzystnie na ich parametry pracy, w tym konstrukcji wirników z łopatką szczelinową,
- określenie geometrii szczeliny w łopatce oraz opracowanie sposobu jej parametrycznego opisu przy zachowaniu niezmienionej geometrii wirnika bazowego,
- przeprowadzenie badań wstępnych w celu oceny zasadności proponowanej modyfikacji oraz zawężenia zakresu zmienności parametrów geometrycznych szczeliny,
- zaplanowanie badań zasadniczych z wykorzystaniem planu eksperymentu (CCD) oraz przygotowanie modeli wirników do badań,
- realizację badań eksperymentalnych oraz wyznaczenie charakterystyk $H(Q)$ i $\eta(Q)$,
- opracowanie wyników z zastosowaniem metod statystycznych, w tym wyznaczenie modeli regresyjnych opisujących zależności H i η od geometrii szczeliny, a także ocenę istotności czynników oraz ich interakcji,
- przygotowanie oraz walidację modeli CFD dla wybranych wariantów geometrii i warunków pracy,

- przeprowadzenie ilościowej i jakościowej analizy wyników oraz interpretację zmian charakterystyk w odniesieniu do przebiegu przepływu w kanale międzyłopatkowym,
- sformułowanie zaleceń projektowych oraz określenie obszarów efektywnego zastosowania łopatkki szczelinowej w wolnobieżnych pompach odśrodkowych

Wyjaśnienia wymaga stwierdzenie, że „w zakresie niskiego nq rosną straty hydrauliczne, m.in. wskutekzwiększonej skłonności do separacji przepływu w wirniku”

W rozdziale 4 omówione są badania eksperymentalne, użyta aparatura, wzory obliczeniowe oraz analiza niepewności pomiarów.

W podrozdziale 4.1 w tabeli 4.1 Autorka podaje dla przepływomierza elektromagnetycznego Arkon MAGS1–ST klasę przyrządu 0,2%, tymczasem producent podaje dokładność przyrządu jak 0,2% wartości bieżącej a ta może być np. w środku zakresu. Brakuje w tabeli typu, zakresu i dokładności pomiaru dla obrotomierza.

W podrozdziale 4.2 indeksy we wzorach (4.1) – (4.7) jakkolwiek odpowiadają oznaczeniom w literaturze polskiej to nie są zgodne z normą PN – EN ISO 9906:2012, na którą Autorka się powołuje.

W podrozdziale 4.3. przeprowadzona jest dyskusja niepewności pomiarowych.

Nie jest podane dla jakiego punktu pomiarowego prowadzona jest analiza niepewności a to decyduje o niepewnościach względnych. Np. jeśli pomiar ciśnienia statycznego był w połowie zakresu to przy klasie 0,1% niepewność względna wyniesie 0,2% czyli dwukrotnie więcej i taka wartość powinna być brana pod uwagę w analizie niepewności. Potrzebne też jest określenie poziomu ufności.

Autorka stosuje prawo przenoszenia niepewności nie do końca prawidłowo, bowiem dotyczy ono niepewności standardowych. Dokumentem regulującym ocenę niepewności jest *JCGM 100:2008 Ewaluacja danych pomiarowych Przewodnik wyrażania niepewności pomiaru* Określenie niepewności standardowej (typu B) dla przyrządu wymaga założenia rozkładu prawdopodobieństwa.

Wzór (4.19) nie uwzględnia wysokości prędkości po stroni ssawnej i tłocznej pompy, w efekcie niepewność wysokości podnoszenia jest tylko funkcją niepewności ciśnienia i prędkości obrotowej a nie wydajności. Nie ma też oceny wpływu tej brakującej części niepewności na końcową jej wielkość.

Rozdział 5 pracy dotyczy badań wstępnych, których celem jest porównanie różnych konfiguracji szczeliny i wyznaczenie do dalszych badań tych najbardziej obiecujących od strony energetycznej. Autorka przyjęła trzy wymiary geometryczne jako różnicujące poszczególne wersje

wirnika i ustaliła liczbę tych wersji na siedem przy początkowej szerokości wirnika 2mm. Badania pokazały, że szczególnie korzystana była konfiguracja z przesunięciem wtórnej części łopatki w kierunku strony czynnej łopatki głównej (BW–W5) – rys. 5.8. Do dalszych badań przyjęła te wymiary geometryczne jako centralne oraz nieznacznie pomniejszone i nieznacznie powiększone względem centralnych. Dodatkowo sprawdziła zakres możliwych wyróżników szybkobieżności zmieniając szerokość wirnika. Dla dwóch skrajnych możliwych szerokości wirnika a więc wyróżnika szybkobieżności wykonała badania wirnika W5 i jego wariacji pokazując, że poprawa parametrów pompy jest możliwa tylko przy mniejszym wyróżniku.

Rozdział 6 składa się z kilku podrozdziałów. Podrozdział 6.1 dotyczy analizy czynników wpływających na podstawowe parametry pompy w tym wysokość podnoszenia H . Wśród typowych takich jak wydajność, lepkość itp. Autorka dodaje ustalone wcześniej jako istotne z punktu widzenia różnicowania cech wirnika trzy parametry geometryczne. W końcowej części podrozdziału „zamraża” większość czynników i otrzymuje zależność tylko od tych trzech parametrów geometrycznych.

Wydaje się, że decyzję o tym jakie parametry powinny różnicować wirnik Autorka już podjęła w rozdziale 5. Kompozycyjnie więc podrozdział 6.1 powinien poprzedzać rozdział 5.

Nie jest jasna potrzeba przeprowadzenia analizy wymiarowej w tym podrozdziale, skoro nigdzie potem związki bezwymiarowe nie są wykorzystywane.

W podpunkcie 6.2 Autorka omawia plan eksperymentu wykorzystując metodologię powierzchni odpowiedzi i wybierając wstępnie powierzchnię drugiego stopnia. W tekście używane są nazwy „rotabilny” i „rotabilność” jako odpowiedniki angielskich „rotatable” , „rotability” wskazujących na zdolność do wykonania obrotu. Lepszym zastępnikiem byłoby: rotowalność i rotowalny. Na usprawiedliwienie doktorantki te nieczytelne nazwy są używane w kilku źródłach literatury polskojęzycznej. Do finalnych badań eksperymentalnych Autorka ustala 17 wariacji parametrów geometrycznych wirnika W5 i dwie szerokości $b_2 = 2 \text{ mm}$ ($n_s = 12,46$) oraz $b_2 = 1 \text{ mm}$ ($n_s = 9,90$).

Dalej omawia stronę technologiczną eksperymentu (6.3).

Wyniki badań zasadniczych omówione są w podrozdziałach 6.4 i 6.5.

Doktorantka konkluduje, że zastosowanie szczelin po stronie czynnej łopatki w przeważającej liczbie przypadków wiązało się z korzystnymi zmianami charakterystyk energetycznych pompy. Najczęściej obserwowano wzrost wysokości podnoszenia H oraz wzrost sprawności η przy zbliżonych przebiegach mocy na wale P_w , co wskazuje na ograniczenie strat hydraulicznych jako dominujący mechanizm poprawy. To uzasadnia potrzebę zastosowania łopatek szczelinowych jako modyfikacji konstrukcyjnej wirnika o niskim wyróżniku szybkobieżności. Rezultatem prac Autorki było opatentowanie rozwiązania (nr P.451555).

W rozdziale 7 doktorantka wyznacza powierzchnie odpowiedzi dla dwóch szerokości wirnika, podaje ich parametry i pokazuje jak taki model pozwala na bardziej precyzyjne określenie parametrów geometrycznych aby uzyskać maksymalną sprawność.

Ten model pojawia się a posteriori, po wykonaniu wielu badań, porównań i analiz, nie prowadzi więc do skrócenia procesu pozyskania optymalnej konfiguracji wirnika. Autorka nie sprawdziła doświadczalnie czy konfiguracja otrzymana za pomocą tego modelu potwierdziła by się, co ogranicza jego wartość użyteczną w pracy. Wreszcie z perspektywy biura konstrukcyjnego zasadność używania takiego modelu nie jest oczywista.

W rozdziale 8 doktorantka przedstawia symulacje przepływu przez badane wirniki przeprowadzone w środowisku ANSYS CFX 2024 R2, przyjmując stacjonarne ujęcie RANS oraz model turbulencji $k-\omega$ SST. Ruch wirnika opisano metodą MRF (*Multiple Reference Frame*), przy czym element doprowadzający oraz kanał koncentryczny modelowano jako domeny nieruchome, natomiast wirnik jako domenę ruchomą. Prędkość obrotową wirnika przyjęto $n = 2870$ obr/min, a połączenia pomiędzy domenami zdefiniowano jako interfejsy typu *frozen rotor*.

W przeprowadzanych obliczeniach brakuje informacji o teście niezależności siatki, czy był przeprowadzony a jeśli tak to dla jakich gęstości siatek. Autorka nie podaje otrzymanych w obliczeniach wartości y^+ a tylko docelową. Brakuje też informacji o kryterium zbieżności.

W tabeli 8.2 dla wirnika referencyjnego i oraz wariantów szczelinowych od BW–W1 do BW–W7 w punktach BEP doktorantka prezentuje pola prędkości w kanałach między-łopatkowych. Przyjęta konwencja graficzna nie pozwala na dokładną ocenę jakości tych pól. Brakuje ujęcia w postaci wektorów prędkości, co pozwoliłoby dokładniej zobaczyć strukturę przepływu.

Rysunki w tabeli 8.3. zestawiające pola ciśnienia bezwzględnego dla tego samego zestawu wirników nie są czytelne i nie pokazują na czym polega przewaga najlepszych wirników ze szczeliną w porównaniu z referencyjnym.

Te uwagi dotyczą większości pozostałych rysunków prezentowanych w pracy.

W symulacji zabrakło też porównania przypadków szerokiego wirnika (większy wyróżnik szybkobieżności) i wąskiego wirnika (mniejszy wyróżnik szybkobieżności) które w skrajnie różny sposób reagują na obecność szczeliny. Brakuje wyjaśnienia jakie zjawiska przepływowe mają na tę różnicę wpływ.

W rozdziale 9 będącym podsumowaniem pracy Autorka zaznacza, że zostało potwierdzone istnienie takiej geometrii szczeliny w wirniku pompy wirowej o niskim wyróżniku szybkobieżności, która prowadzi do wzrostu wysokości podnoszenia i/lub sprawności, potwierdzając tezę rozprawy.

W pracy została wyznaczona górna granica stosowalności rozwiązania, która nie przekracza $n_s \approx 13-15$.

Największy przyrost sprawności na skutek wprowadzenia szczeliny wyniósł $\Delta\eta = 4,91\%$ (punktu procentowego), co przy sprawnościach pompy rzędu 40-45% jest dużą wartością.

Zastosowanie szczeliny powoduje przesunięcie obszaru najwyższej sprawności w stronę większych wydajności oraz spłaszczenie charakterystyki $\eta(Q)$, co można interpretować jako poszerzenie zakresu pracy o podwyższonej sprawności.

Na podstawie analizy jakościowej Autorka konkluduje, że parametry E_{gap} i R_{1gap} wpływają w największym stopniu na przebieg charakterystyk $H(Q)$ i $\eta(Q)$, natomiast wpływ L_{gap} jest zwykle mniej wyraźny i ujawnia się głównie w wybranych zakresach pracy.

Podsumowanie

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pani mgr inż. Anety Nycz stanowi twórczy wkład w rozwój pomp wirowych w zakresie niskich wyróżników szybkobieżności. Doktorantka, na podstawie analizy literatury przedmiotu, zidentyfikowała lukę badawczą dotyczącą wirników z łopatkami szczelinowymi oraz zaproponowała program badań stanowiący istotne uzupełnienie dotychczasowego stanu wiedzy. W jego ramach określiła kluczowe parametry geometryczne wirnika wpływające na charakterystyki pracy pompy.

Zrealizowała szeroki zakres badań eksperymentalnych z wykorzystaniem technologii druku 3D. Opracowała metodykę badań, w której zastosowała Metodologię Powierzchni Odpowiedzi oraz Centralny Plan Kompozycyjny, co pozwoliło na wyznaczenie ciągłego modelu umożliwiającego precyzyjne określenie optymalnych parametrów.

Doktorantka wykazała się również umiejętnościami w zakresie obliczeń CFD, realizując symulacje przepływu przez analizowane wirniki.

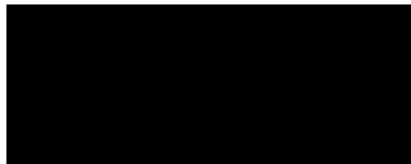
Sposób przeprowadzenia badań świadczy o jej dojrzałości naukowej.

W pracy potwierdzono postawioną tezę, wykazując, że zastosowanie łopatek szczelinowych według zaproponowanej metodyki może istotnie poprawić sprawność pomp wolnobieżnych.

W związku z powyższym stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pani mgr inż. Anety Nycz spełnia wymagania określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2022 r., poz. 574 z późn. zm.).

Ponadto uważam, że rozprawa potwierdza posiadanie przez kandydatkę ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiot rozprawy stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Wnoszę o dopuszczenie doktorantki do dalszych etapów postępowania doktorskiego.



Dr hab. inż. Krzysztof Karaśkiewicz