

Prof. dr hab. inż. Waldemar Jędral
emerytowany profesor zwyczajny
Politechnika Warszawska
Instytut Techniki Ciepłej

Warszawa, 2022-05-25

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Machalskiego

p.t.: *Badanie i analiza zjawisk przepływowych w pompie o swobodnym przepływie z przesłoną czołową*

Recenzję opracowano na prośbę Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej (pismo W10/D/22/2022 z dnia.09.05.2022 r.), zgodnie z umową nr 18/05/PRR/2022 z dnia 09.05.2022 r.

1. Charakterystyka formalna pracy

Opiniowana rozprawa doktorska została wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Janusza Skrzypacza, profesora nadzwyczajnego w Politechnice Wrocławskiej; promotorem pomocniczym był dr inż. Wojciech Plutecki. Rozprawa liczy łącznie 185 stron wraz ze streszczeniami w języku polskim i angielskim oraz bibliografią. Rozprawa reprezentuje dyscyplinę *Budowa i Eksploatacja Maszyn*.

Rozprawa jest podzielona na 8 rozdziałów.

W krótkim, wprowadzającym **rozdziale 1** uzasadniono celowość wykonania badań przepływów w pompie o swobodnym przepływie z wirnikami Super Vortex, w kontekście przewidywanego rozszerzenia rozporządzenia nr 547/2012 Komisji Europejskiej, dotyczącego poziomów minimalnych sprawności pomp wirowych, na pompy m.in. tego rodzaju.

W **rozdziale 2**, a także w części rozdziału 1, dokonano przeglądu literatury dotyczącej pomp o swobodnym przepływie, jako jednego z rodzajów pomp do ścieków. Podano zarys kilku prostych metod jednowymiarowych projektowania wirników takich pomp. Przytoczono też wybrane wyniki doświadczalne dotyczące pomp zaopatrzonych w wirniki z przesłonami czołowymi.

W krótkim **rozdziale 3** przedstawiono przedmiot pracy oraz cel, zakres i tezę recenzowanej rozprawy.

W **rozdziale 4** przedstawiono pompę handlową NURT, którą przystosowano do badań doświadczalnych zastępując wirnik fabryczny wirnikiem wykonanym na drukarce 3D, zaopatrzonym w wymienne przesłony, oraz montując pokrywę przednią wykonaną ze szkła organicznego. Opisano stanowisko badawcze wraz z przyrządami

pomiarowymi i metodykę pomiarów oraz przedstawiono zmierzone charakterystyki pompy z wirnikiem bazowym (wyjściowym) jak również oszacowano wartości niepewności pomiarowych.

W **rozdziale 5** omówiono wyniki obszernych badań wstępnych, których celem było rozpoznanie wpływu geometrii przesłon wirnika na charakterystyki pompy. Na ich podstawie ustalono 4 parametry geometryczne przesłon wpływające na własności hydrauliczne pompy. Były one podstawą do ustalenia programu zasadniczych badań doświadczalnych.

W **rozdziale 6** wykonano analizę wymiarową, która potwierdziła, że na charakterystyki pompy wpływają 4 ww. parametry geometryczne. Stosując technikę planowania eksperymentu ustalono plan badań, tj. liczbę wariantów i geometrię osłon, a tym samym – liczbę badań doświadczalnych.

Przedstawiono obszerne wyniki badań doświadczalnych pompy dla wszystkich 25 wariantów w postaci charakterystyk przepływu $H(Q)$, mocy $P(Q)$ i sprawności $\eta(Q)$. Na ich podstawie utworzono zależności funkcyjne w postaci wielomianów 3-go stopnia, opisujących wpływ wybranych parametrów przesłon na uzyskane przyrosty ΔY energii właściwej i $\Delta \eta$ sprawności względem wartości Y i η dla wirnika referencyjnego (wyjściowego). Na podstawie analizy korelacji zbudowano równania opisujące wpływ parametrów geometrycznych przesłon na ΔY i $\Delta \eta$ i dokonano ich analizy wykorzystującej wykonane do tego celu wykresy.

W celu weryfikacji opracowanej metody wykonano badania innej pompy handlowej z wirnikiem o identycznej geometrii jak w oryginale, lecz zaopatrzonym w stałe przesłony, o geometrii ustalonej na podstawie wyników poprzednich badań. Pompa z nowym wirnikiem uzyskała lepsze parametry, zaś zmierzona i obliczona charakterystyka $H(Q)$ były dość dobrze zgodne.

W **rozdziale 7** wykonano symulacje numeryczne RANS przepływu w pompie, wykorzystując 3 różne modele turbulencji i siatki obliczeniowe o różnych liczbach elementów. Uzyskano dość dobre zgodności charakterystyk obliczonych numerycznie i doświadczalnych – najlepsze dla modelu $k-\varepsilon$ Realizable. Pokazano szereg wyników symulacji komputerowych w postaci pól prędkości i ciśnień dla wirników o różnych geometriach i dokonano ich starannej analizy.

Rozdział 8 stanowi podsumowanie wyników badań doświadczalnych i numerycznych, które można uznać za dowód postawionej w rozdziale 3 tezy pracy.

Praca zakończona jest **bibliografią** liczącą 84 pozycje, z których 59 to publikacje stosunkowo nowe, z roku 2000 i lat późniejszych.

2. Uwagi ogólne

2.1. Recenzowana rozprawa dotyczy zagadnienia projektowania wirników pomp o swobodnym przepływie i podwyższonej sprawności wskutek zaopatrzenia typowych łopatek wirnika w czołowe przesłony (prostopadłe do osi łopatek). Pompy o swobodnym przepływie mają szerokie zastosowanie do transportu mieszanin cieczy i ciał

stałych, m.in. ścieków. Oprócz wielu zalet mają one podstawową wadę, jaką jest sprawność znacznie niższa od sprawności typowych pomp odśrodkowych, nawet jednołopatkowych (kanałowych). Wszelkie próby podwyższenia tych sprawności są celowe, a nawet konieczne, wobec aktualnych wymagań powiększania efektywności energetycznej wszystkich procesów produkcyjnych i eksploatacyjnych, w kontekście *Europejskiego Zielonego Ładu* i *Fit for 55*, w tym także efektywności energetycznej pompowania ścieków.

2.2. Mimo dość obszernej literatury dotyczącej pomp o swobodnym przepływie, złożony obraz przepływu w nich jest rozpoznany w stopniu wciąż jeszcze niezadowalającym, co rzutuje na opracowane dotąd metody projektowania takich pomp, zwłaszcza o podwyższonej sprawności. Wszelkie próby poszerzenia wiedzy w tym zakresie są więc pożądane, w szczególności w kontekście wskazówek dla konstruktorów pomp.

2.3. Rozprawa obejmuje szeroki zakres prac doświadczalnych oraz obliczeniowych – w zakresie numerycznej symulacji przepływów turbulentnych, jak również obszerną analizę wyników przeprowadzonych w jej ramach badań. Poszczególne elementy badań zostały starannie zaplanowane i wykonane, a ich wyniki przedstawiono w eleganckiej i przejrzystej formie graficznej. Wymagało to wielu pracochłonnych pomiarów i obliczeń oraz równie pracochłonnego ich opracowania.

2.4. Z powyższych względów wysoko oceniam zarówno wybór tematu jak i zrealizowany zakres prac. Podane niżej uwagi dotyczą głównie usterek natury formalnej i w żadnym stopniu nie obniżają wartości opiniowanej dysertacji.

3. Uwagi szczegółowe

3.1. Uwagi merytoryczne

Recenzent nie znalazł w opiniowanej rozprawie większych błędów merytorycznych, toteż uwagi zamieszczone w tym punkcie nie mają zasadniczo charakteru zarzutów i można je w części uznać za dyskusyjne.

3.1.1. Nie uzasadnione jest, konsekwentnie stosowane przez autora rozprawy, rozróżnienie między pompami o swobodnym przepływie, z łopatkami promieniowymi, a pompami *Vortex*, z łopatkami wygiętymi. Nazwa „*pompa Vortex*” jest synonimem nazwy „*pompa o swobodnym przepływie*” i rozpowszechniła się dlatego, że jest po prostu krótsza. Można to łatwo sprawdzić w różnych publikacjach a także w wielu materiałach zamieszczonych w Internecie. Można natomiast zgodzić się na rozróżnienie wirnika *Vortex* (bez przesłon) i *Super Vortex* (z przesłonami), niezależnie od kształtu łopatek.

3.1.2. W punktach 6.5-6.9 opracowano, na podstawie wyników pomiarów, formuły na przyrosty ΔY i $\Delta \eta$ w funkcji podstawowych zmiennych geometrycznych przesłon, umożliwiającących przeliczenie Y i η z wartości otrzymanych dla wirnika bazowego. Formuły sprawdzono dla innej pompy, ale z tego samego typoszeregu pomp NURT; wirniki obu pomp miały przy tym dość zbliżone wartości, $n_q = 36,4$ i $32,7$. Uzyskano dość dobrą zgodność wyników przeliczeń i pomiarów, co jednak nie znaczy, że dla innych typoszeregów pomp, z innych wytwórni (a więc o innych proporcjach

wymiarowych wirników) zgodność będzie równie dobra. Uwagę o możliwości wykorzystywania formuł podczas projektowania pomp należy więc traktować bardzo ostrożnie.

3.1.3. (do stron 80, 84, 88) Przeliczanie parametrów pracy pompy, oparte na zasadach podobieństwa dynamicznego, dotyczy pomp podobnych geometrycznie. Nie powinno się go stosować w omawianym przypadku, podobnie jak do pomp ze stoczonymi wirnikami; obowiązują wówczas inne zależności.

3.1.4. (s. 136⁴) Równania Naviera-Stokesa dla przepływów laminarnych także rozwiązuje się numerycznie (nie analitycznie!), choć jest to dużo prostsze niż dla przepływów turbulentnych.

3.1.5. (s. 46) Recyrkulacja może dotyczyć cieczy; pojęcie *recyrkulacja strat* jest niepoprawne.

3.1.6. Interesująca jest kwestia wpływu przesłon wirnika na ryzyko zatkania się go materiałami włóknistymi zawartymi w pompowanej cieczy, np. w ściekach. Możliwość taką potwierdza np. rysunek 5.34 na str. 86. Warto by m.in. o ten element rozszerzyć plan dalszych badań, o których jest mowa w rozdz. 8 (s. 178), o badania eksploatacyjne w przepompowni ścieków; w pompach z typowymi wirnikami Vortex (bez przesłon) dość często obserwuje się owijanie łopatek wirników właśnie materiałami włóknistymi.

3.1.7. Zbiornik stanowiska badawczego ma stosunkowo niewielką objętość 1,2 m³, zaś pompa badawcza ma silnik o mocy 4 kW. Długotrwała praca pompy będzie powodowała powolne, ale jednak nagrzewanie się wody, spadek jej lepkości i zmniejszanie się strat hydraulicznych. Czy uwzględniono ten fakt w badaniach robiąc dłuższe przerwy na ochłodzenie się wody lub nawet jej wymianę?

3.2. Uwagi formalne i porządkowe

Poniżej wymieniono ważniejsze, z zauważonych przez opiniodawcę, usterki i nieścisłości, pomijając tzw. literówki i drobne błędy stylistyczne. Podane przy numerach stron wskaźniki liczbowe dotyczą numerów wierszy, licząc od góry lub od dołu strony.

- 1 – tytuł pracy jest trochę niezręczny – przesłonę czołową ma nie pompa, lecz jej łopatki; lepiej: ...z *przesłonami czołowymi łopatek wirnika*
- 7, 41,44 – błędnie oznaczone punkty jako 2.1, 2.2; powinno być 2.9, 2.10.
- 9⁸ – co to są „reszty z modelu”? (określenie zbyt żargonowe)
- 11₁₀ – powinno być: ...zużycia energii... (zamiast zużycia prądu)
- 11₁₁ – 9%, to chyba trochę za mało
- 11₃ – „*przepływ*” to zbyt gwarowe; lepiej: wydajność lub strumień objętości
- 12, wzór (1.2) – należało dodać: dotyczy pompy jednostopniowej, 1-strumieniowej
- 12₁₀ – powinno być: pompa z wlotem in-line (nie ma *wlotu osiowego inline*)
- 13^{2,7}, 15³ – 547/2012 to jest rozporządzenie, nie dyrektywa
- 15, 16 – informacje zawarte na s. 15, 16 lepiej było przenieść do rozdz. 2
- 17₈ – „...*wraz z łopatkami*” można było pominąć (łopatki są częścią wirnika)
- 17_{12,13} – energia hydrauliczna, to także energia mechaniczna

- 25¹ – powinno być: krawędzie wlotowe łopatek (nie: *krawędzie natarcia*)
- 31₉ – należało zdefiniować wyróżnik n_{sf}
- 35⁵ – wirniki Vortex mają cały czas kontakt z pompowanym medium; krótki kontakt mają z zawartymi w nim cząstkami stałymi
- 37⁵ – niepotrzebna pozycja literatury [70]; ewentualnie dodać: np. [70]
- 41₂, 64_{12,13} – należało dodać, że płaszczyzna *bis* jest prostopadła do osi wirnika
- 50, rys. 4.2, 4.3 – model i zdjęcie stanowiska trochę się różnią, co utrudnia czytanie opisu
- 56₄ – powinno być: $\eta_{max} = 38,3\%$, nie 30,3%
- 60, (4.5), (4.6) – powinno być η , nie η_p
- 66 – należało wyjaśnić, że „W” dotyczy wirnika do badań wstępnych
- 66, tabl. 5.2 – w kolumnie *Swobodny przelot* należało dopisać d_w
- 66₃ – dla W_{12} powinno być: $\Phi = 1,00$ (nie 10,0)
- 71₅ – stwierdzenie dyskusyjne; za nieprzeciężną uznaje się charakterystykę mocy, dla której P_{max} jest osiągnięte przy Q_{opt} (tj. η_{max})
- 76₁ – w podpisie pod rys. 5.23 powinno być: Zależność sprawności maksymalnej..., a na osi pionowej rysunku: η_{max}
- 77_{8,9} – dla $\Phi = 100\%$ cała łopatka będzie przesłonięta (nie strona bierna)
- 81⁸₂ – sprzeczne zdania (...nie może... i ...może...)
- 82, 83 – podpisy pod rys. 5.28-5.31: „• punkty przeliczeniowe” – wg których wzorów?
- 88³ – tzn. stosując wzory (5.3) i (5.4) ?
- 90⁵ – powinno być: ...płaszczyzny prostopadłej do osi wirnika, tj. *bis*
- 95² – tj. tylko $0,60 \cdot 45,4 = 27,24$ mm ?
- 95₂ – należało wyjaśnić pojęcie „promień gwiazdny”
- 96,97 – należało wyjaśnić, że „PE...” dotyczy badań zasadniczych
- 101-103 – czy nie lepiej było charakterystyki przedstawić w postaci krzywych gładkich (jak na rys. 5.10-5.21) a nie pofalowanych ?
- 104⁴ – lepiej: ...w porównaniu do... zamiast: „...w stosunku do...”
- 123⁵ – lepiej: ...i ostatecznie... zamiast: „...i kolejno...”
- 134₈ – lepiej: należy stwierdzić, że opracowane równanie (6.69)...
- 152_{7,8} – jeśli zastosujemy wirnik całkowicie przesłonięty, to już nie będzie to pompa o swobodnym przepływie
- 154¹ – co oznacza symbol: $PE_{00/W_{13}}$?
- 179 – lepiej: Literatura; *Bibliografia* to uporządkowany zbiór piśmiennictwa z jakiegoś okresu i/lub kraju i/lub dziedziny
- 183, poz. [63] – brak danych bibliograficznych
- 184, poz. [66], [67], [74] – należało podać przynajmniej numery Pomp Pompowni.

4. Podsumowanie i wnioski końcowe

1. Opiniowana rozprawa dotyczy zagadnienia ciekawego z powodów poznawczych a równocześnie ważnego pod względem zastosowań praktycznych,

- stwarzając możliwość wykorzystania jej wyników w procesie projektowania pomp o swobodnym przepływie, często stosowanych w transporcie ścieków. Podwyższenie sprawności takich pomp, przy dostatecznie dużej niezawodności, jest ważne w kontekście poprawy efektywności energetycznej pompowania.
2. Rozprawa jest udanym połączeniem obszernych badań doświadczalnych, poprzedzonych analizą z zakresu planowania eksperymentu, wnikliwej analizy ich wyników, wraz z opracowaniem przydatnych dla konstruktorów pomp formuł empirycznych, oraz symulacji numerycznej przepływów turbulentnych z uzyskaniem pól prędkości i ciśnień w pompie z wieloma wariantami wirników.
 3. Należy podkreślić bardzo dużą pracowitość badań jak również staranną formę jej przedstawienia, w tym eleganckie i przejrzyste opracowania graficzne wyników pomiarów i obliczeń numerycznych.
 4. Pracę należy ocenić bardzo wysoko, zarówno pod względem merytorycznym, wspomnianym wyżej sposobem jej przedstawienia jak również praktyczną przydatnością uzyskanych w niej wyników.
 5. Doktorant wykazał umiejętność samodzielnego rozwiązania trudnego i pracochłonnego zagadnienia naukowo-badawczego i technicznego. Uwagi krytyczne dotyczą głównie usterek formalnych i w żadnym stopniu nie umniejszają merytorycznej i praktycznej wartości rozprawy.
 6. Reasumując stwierdzam, że dysertacja mgr. Inż. Artura Machalskiego p.t.: ***Badanie i analiza zjawisk przepływowych w pompie o swobodnym przepływie z przesłoną czołową***, reprezentująca dyscyplinę *Budowa i Eksploatacja Maszyn (Inżynieria Mechaniczna)*, spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę o tytule i stopniach naukowych i może być dopuszczona do publicznej obrony.



/prof. dr hab. inż. Waldemar Jędrał/