

dr hab. inż. Adam Papierski
Instytut Maszyn Przepływowych
Politechniki Łódzkiej
ul. Wólczańska 219/223
90-924 Łódź
e-mail: adam.papierski@p.lodz.pl

Łódź, 16 maj 2022

Ocena rozprawy na stopień doktora nauk technicznych
w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka
Pana mgr inż. Marka Szlagi
„Wpływ łopatek odciążających na zmniejszenie hydraulicznej siły osiowej oraz
sprawność pompy wirowej”

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Marka Szlagi „Wpływ łopatek odciążających na zmniejszenie hydraulicznej siły osiowej oraz sprawność pompy wirowej”, której promotorem jest dr hab. inż. Krzysztof Karaśkiewicz, napisana jest w języku polskim i liczy 202 strony druku.

Zaczyna się wprowadzeniem, omówieniem celu pracy, sformułowaniem trzech tez oraz zakresu pracy. Kolejny rozdział to przegląd literatury w zakresie:

- przyczyn powstawania sił wzdłużnej,
- obliczania sił wzdłużnych,
- struktury przepływu w przestrzeniach bocznych wirnika wraz z równaniami opisującymi przepływ w przestrzeniach bocznych wirnika (model fizyczny i matematyczny),
- zastosowania łopatek odciążających wirnika.

Zasadnicza część rozprawy składa się z opisu stoiska pomiarowego oraz wyników badań eksperymentalnych jednostopniowej pompy wirowej, której tarcze wirnika wyposażone były w łopatki odciążające.

Następnie opisano model numerycznego przepływu w komorach około-wirnikowych pomp. Przedstawiono, wyniki symulacji CFD wielu wariantów geometrii łopatek odciążających. Wykonano walidację obliczeń numerycznych oraz przedstawiono związki ilościowe między geometrią łopatki, a parametrami hydraulicznymi, pozwalającymi wyznaczyć siły osiowe działające na zespół wirujący pompy.

W końcowej części pracy przedstawiony został wzór (7.12) pozwalający na poprawne zaprojektowanie układu odciążającego pompy przy zastosowaniu zakrzywionych łopatek. Jest to oryginalne osiągnięcie autora wnoszące wkład w rozwój nauki. Zaprezentowano wnioski końcowe i omówiono kierunki dalszych prac. Pracę zamyka poprawnie dobrany, w większości cytowany w tekście, obejmujący 76 pozycji spis literatury.

Podjęty temat pracy doktorskiej ma duże znaczenie praktyczne, gdyż dotyczy metody projektowania układów odciążających siły osiowe. W przypadku pomp wielostopniowych, niewłaściwie zaprojektowane układy odciążające mogą powodować trudności

AP

eksploatacyjne. Cele i zakres pracy są jasno wytyczone przez Autora w rozprawie. Opracowane przez Doktoranta zależności matematyczne pozwalające na określenie współczynnika krążenia w przypadku zastosowania zakrzywionych łopatek odciążających uzupełniają algorytm projektowania układu odciążającego pompy. Pozwala to na zaprojektowanie niezawodnej pompy umożliwiającej optymalną i niezawodną pracę instalacji oraz wysoką efektywność energetyczną układu pompowego.

Opis rozprawy

Merytoryczna część rozprawy rozpoczyna się wprowadzeniem w tematykę pracy. Autor przedstawia przyczynę występowania siły wzdłużnej oraz znaczenie poprawnego wyznaczenia tej siły w procesie projektowania pomp.

W rozdziale 2 przedstawiono cele tezy i zakres pracy.

W rozdziale 3 opisano strukturę przepływu cieczy w komorach około-wirnikowych. Przedstawiono metody obliczania sił osiowych. Zdefiniowano współczynnik krążenia cieczy stosowany w obliczeniach rozkładu ciśnienia wokół wirnika.

Rozdział 4 zawiera przegląd literatury dotyczący stosowania łopatek odciążających celem zmniejszenia siły wzdłużnej w pompach.

Rozdziały 5 i 6 opisują wyniki symulacji CFD i ich porównanie z wynikami badań eksperymentalnych wykonanych wcześniej (lata 70 ubiegłego wieku) w Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej, w ramach współpracy z Warszawską Fabryką Pomp.

Rozdział 7 opisuje badania doświadczalne oraz symulacje komputerowe wykonane przez Autora dla typowej jednostopniowej pompy odśrodkowej z zamkniętym wirnikiem i spiralą tłoczną. Głównym celem tych badań było zbadanie wpływu łopatek odciążających na wysokość podnoszenia i sprawność pompy.

Rozdział 8 przedstawia główne wnioski z przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz symulacji CFD dotyczących zastosowania łopatek odciążających w pompie wirowej. Opisano główne osiągnięcia oraz wskazano dalsze kierunki prac badawczo-naukowych w tym temacie.

Ocena rozprawy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Marka Szlagi, jest napisana poprawnie językowo i starannie zredagowana, wyniki przedstawione graficznie są przejrzyste i czytelne. Należy podkreślić, że wymagała ona pracochłonnych obliczeń i równie pracochłonnego wykonania badań eksperymentalnych oraz ich opracowania.

Dużym uproszczeniem jest według recenzenta założenie dotyczące, że przepływ jest osiowo symetryczny.

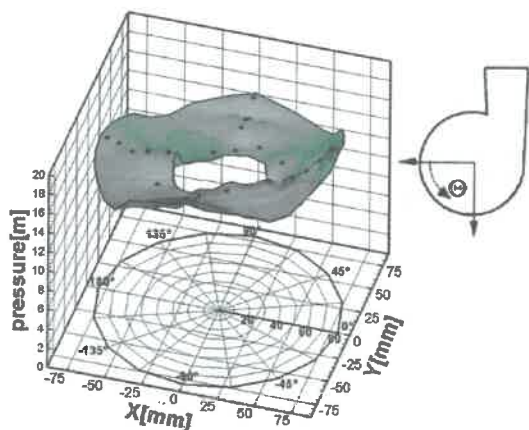
Założenie to jest dość dobrze spełnione w przypadku badań i obliczeń dotyczących stanowiska opisanego w rozdziale 6.2.1.

W przypadku badań eksperymentalnych pompy ze spiralą zbiorczą (rozdział 7.2.1) założenie dotyczące przepływu osiowo-symetrycznego nie jest spełnione. Sam Autor

pokazuje na rysunku 7.35 rozkład ciśnienia w funkcji współrzędnej kątowej gdzie różnica między maksymalną, a minimalną wartością ciśnienia sięga wartości 3 [bar] przy średniej wartości około 6,5 [bar].

W artykule^[1] pokazano rozkład ciśnienia w przedniej komorze wirnika otrzymany na podstawie pomiarów ciśnień dla 4 położenia kątowych oraz 5 wartości promienia (Rys. 1)

Brak symetrii osiowej spowodowany jest nierównomiernym w kierunku obwodowym rozkładem ciśnienia w spirali oraz tym, że w rzeczywistych warunkach szczelina uszczelnienia przedniego wirnika nie jest idealnie symetryczna (występuje zawsze pewna mimośrodowość) co skutkuje nierównomiernym obwodowo strumieniem masy pokazanym na Rys. 2.



Rys. 1. Rozkład ciśnienia w komorze przedniej wirnika(eksperyment) [1]



Rys. 2. Przecieki przez uszczelnienie przednie wirnika (CFD) [1]

Nierównomierny rozkład ciśnienia w komorze powoduje powstawanie dodatkowego momentu siły, który należy uwzględnić przy doborze układu łożyskowego pompy. Należy nadmienić, że tak jak siła promieniowa od spirali tak i ten dodatkowy moment dają obciążenie pulsacyjne (nieruchomy moment siły względem obracającego się wirnika) co powoduje zmęczeniowy charakter obciążenia i może prowadzić do pęknięcia wału.

Brak w pracy informacji dotyczącej zastosowanej metody dyskretyzacji przestrzennej. W programie Ansys-Fluent domyślnie przyjmowana jest dyskretyzacja 2-go rzędu członów konwekcyjnych równania Naviera-Stokesa, natomiast w przypadku modelu turbulencji jest to schemat 1 rzędu. Przemilczanie tzw. domyślnych ustawień w programach jest złym nawykiem, gdyż w kolejnych wersjach oprogramowania domyślana opcja może ulec zmianie (tak było w przypadku programu Ansys-CFX)

Kolejną kwestią jest brak komentarza dotyczącego bezwymiarowej odległości od ścianki

$$y^+ = \frac{y V_*}{\nu}$$

gdzie: y – odległość od ścianki w granicach $0 \leq y \leq \delta$ (δ - grubość warstwy przyściennej),

$$V_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \text{ – skala prędkości (shear velocity),}$$

¹ S. Najdecki, A. Papierski; "Influence of a volute casing on the flow in chambers behind the front and back shroud in the single-stage centrifugal pump"; CMP No. 123; 2008; str 255-262

ν – lepkość kinematyczna,
 τ_0 – naprężenie na ścianie,

która dla warstwy przyściennej pełni rolę podobną do liczby Reynoldsa. Autor podał (zresztą błędnie) na Rys. 5.2 wartości tego parametru na nieruchomej obudowie. Zgodnie z definicją wartość y^+ na obudowie powinna być zero. Podpis pod rysunkiem 5.2, zatem powinien brzmieć „Rozkład bezwymiarowej odległości y^+ od ścianki w węzłach siatki najbliższych nieruchomej obudowy”. Autor nie podaje czy wartości y^+ spełniają kryterium i jakie jest to kryterium.

Autor na stronie 149 w5g podaje kryterium zakończenia procesu iteracyjnego jako osiągnięcie wartości residuum poniżej wartości 10^{-3} , nie podając o jakie residuum chodzi (maksymalne, czy średnie) oraz residuum czego? Sugerowałbym używać sformułowań typu niezbilansowany strumień masy, niezbilansowany strumień pędu czy energii.

Autor przemilczał w pracy tzw. warunki brzegowe, które są nierozłącznie związane z rozwiązywaniem równań różniczkowych. Równanie N-S jest równaniem różniczkowym cząstkowym drugiego rzędu, czyli do wyznaczenia stałych całkowania potrzebne są dwa warunki brzegowe. Dotyczy to również równań modelu turbulencji. Równania 6.9 i 6.10 są równaniami drugiego rzędu, czyli potrzebne są również dwa warunki brzegowe (jakie?)

Kolejnym przemilczanym w pracy tematem jest przejście z domeny wirującej (wirnika) do domeny stacjonarnej (spirali). Dla obliczeń stacjonarnych w programie Ansys-Fluent możliwe są dwie techniki:

1. Multiple Moving Reference Frame (MRF) nazywana niekiedy Frozen Rotor. W technice tej obie siatki są nieruchome a uzyskane rozwiązanie dotyczy wzajemnego położenia komponentów w konfiguracji jakiej dostarczono je wraz z siatką.
2. Mixing Plane. Cechą charakterystyczną tej metody jest przesyłanie danych pomiędzy domenami wykorzystujące obwodowe uśrednianie.

W obu przypadkach uzyskujemy zupełnie różne wyniki.

Poniżej zamieszczono zauważone formalne usterki edytorskie oraz niefortunne sformułowania:

- Str. 21 w12d „Widmo nieustalonego składnika siły osiowej występuje, podobnie jak widmo pulsacji ciśnienia w paśmie niskich i wysokich częstotliwości i rzadko powodują niepożądane efekty, szczególnie w przypadku pracy w okolicach punktu optymalnego pompy” – niezrozumiałe zdanie, jakie efekty autor miał na myśli?
- Str. 170 w1g „Zbadanie na stanowisku badawczym większych średnic zewnętrznych łopatek ...” Powinno być „Zbadanie na stanowisku badawczym wirników o większych średnicach zewnętrznych łopatek ...”
- Str. 189 7wd „Na stanowisku badawczym nie było możliwe zbadanie większych średnic zewnętrznych łopatek ...” Powinno być „Na stanowisku badawczym nie było możliwe zbadanie wirników o większych średnicach zewnętrznych łopatek ...”

Podsumowanie

Merytorycznie pracę należy ocenić wysoko. Praca jest również starannie zredagowana, zawiera bardzo mało usterek formalnych i językowych. Doktorant wskazał ważne zagadnienie naukowe, podjął się pracy nad jego rozwiązaniem i w efekcie tej pracy uzyskał oryginalne, wartościowe i nowe wyniki naukowe. Wykazał się znajomością metod obliczeniowych nowoczesnej numerycznej mechaniki płynów i umiejętnością praktycznego ich zastosowania. Przebieg i efekty swojej działalności naukowej opisał w sposób satysfakcjonujący. Stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca Pana mgr inż. Marka Szłagi spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z Ustawą „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz.U. nr 65 poz. 595 z dn. 14 kwietnia 2003 r. z późniejszymi zmianami) i w związku z tym wnoszę o dopuszczenie doktoranta do dalszej części przewodu.

Adam Papierski

dr hab. inż. Adam Papierski