

Prof. dr hab. inż. Andrzej Błaszczak

Łódź, dnia 15.06.2022 r.

Katedra Energetyki

Wydział Techniczny

Akademia im. Jakuba z Paradyża
w Gorzowie Wielkopolskim

Recenzja Rozprawy Doktorskiej

mgr. inż. Łukasza Złotego

„Wpływ otworów odciążających w wirnikach pomp wirowych na zdolności ssawne oraz sprawność pompy”

Podstawa prawna recenzji

Podstawa opracowania rozprawy doktorskiej: pismo profesora dr hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej o sygnaturze RND-IŚGiE/45/2022 z dnia 28 kwietnia 2022.

Recenzowana praca została wykonana, pod kierunkiem dr hab. inż. Krzysztofa Karaśkiewicza

Struktura rozprawy

Rozprawa liczy 206 stron i jest podzielona na 11 rozdziałów. Dodatkowo w pracy zamieszczono wykaz ważniejszych oznaczeń, streszczenie pracy oraz zestawienie literatury obejmującej 51 pozycji. Uzupełnieniem pracy są zamieszczone na jej końcu załączniki :

- dokumentacja techniczna wybranych elementów stoiska badawczego,
- zestawienie wyników badań serii pomiarowej które zostały zestawione w tabelach ,
- z uwagi na dużą ilość wykonanych badań eksperymentalnych tabelę z wynikami ich pomiarów zapisane zostały na CD załączonym do pracy,

Uzasadnienie wyboru tematu rozprawy

Tematyka recenzowanej pracy jest obecnie bardzo aktualna. Konstruktorzy obecnie projektowanych pomp starają się ograniczyć ich wagę ze względu na koszty materiałów produkowanych pomp do technicznego minimum. Jednym ze sposobów ograniczenia masy i w związku z tym redukcji kosztów pomp jest zwiększanie obrotów ich zespołów wirujących co z kolei powoduje wzrost obciążeń siłami osiowymi i promieniowymi łożysk nośnych i oporowo-nośnych. Według danych statystycznych podawanych przez firmy ubezpieczające eksploatację maszyn blisko 90% awarii pomp wirowych związanych jest z układem odciążenia. Przyczynami tych awarii są zarówno błędy eksploatacyjne jak również dokładność metod projektowania układów odciążeń opartych na uproszczonych modelach przepływu w przestrzeniach okołowirnikowych. Jednym ze sposobów zmniejszenia sił osiowych są otwory odciążające wykonywane w tarczach tylnych wirników. Ograniczeniem ich jest ilość oraz geometria. Większa ich ilość i średnice powodują zwiększony przepływ cieczy zza tarczy tylnej w obszar wlotu do wirnika. Wypływ cieczy w kierunku wlotu pompy powoduje zakłócenia w napływie czynnika do wirnika skutkujące wzrostem wymagań dotyczących nadwyżki antykawitacyjnej. Wielkość

przepływu przez otwory odciążające za tarczy tylnej wirnika w kierunku wlotu napływu ma również wpływ na sprawność i zdolność ssania pomp.

W związku z powyższym uważam, że podjęta przez Doktoranta tematyka ma istotne znaczenie w aspekcie energochłonności i pewności ruchowej pomp.

W rozdziale pierwszym omówione zostały i zilustrowane rozkłady ciśnień na tarczach wirnika odśrodkowego w przypadku braku otworów odciążających i z otworami odciążającymi. Porównując oba przypadki konstrukcji wirników należy stwierdzić, że obecność otworów odciążających w tarczy tylnej wirnika zmniejsza siłę osiową skierowaną w kierunku wlotu do wirnika, ale wpływa negatywnie na rozkład prędkości cieczy napływającej do wirnika.

W rozdziale drugim pracy pt. „Tezy i cele pracy oraz zakres pracy” Doktorant sformułował w podrozdziale 2.1 niżej wymienione tezy:

- wpływ na strukturę przepływu w otworze odciążającym ma ruch obrotowy wirnika,
- rozmieszczenie otworów odciążających na tarczy tylnej wirnika ma wpływ na własności ssawne pompy,
- wielkość pochylenia otworów odciążających w stosunku do osi obrotów wirnika ma wpływ na wielkość przepływu przez nie oraz dysypację energii w otworze,
- obecne modele przepływu umożliwiają wykorzystanie metod CFD do wyznaczania parametrów przepływu przez wirnik pompy z otworami odciążającymi.

Potwierdzenie wyżej wymienionych tez pracy wymagało od Doktoranta realizacji szerokiego zakresu badań doświadczalnych oraz numerycznych i zapoznania się z kilkudziesięcioma publikacjami.

Podane w podrozdziale 2.2 cele rozprawy pozostają w ścisłym związku ze sformułowanymi tezami pracy.

W obszernym rozdziale 3 zatytułowanym „Stan wiedzy” Doktorant analizuje podane w wykazie literatury prace. W podrozdziale 3.1 Doktorant omawia wyniki przedstawione w pracach opisujących zastosowanie i przepływ w otworach odciążających mających wpływ na przepływy okołowirnikowe, decydujące między innymi o sprawności pompy, zmianie wartości siły osiowej. W pracach tych jest mało informacji na temat wpływu przepływów przez otwory na nadwyżkę antykawitacyjną pompy (NPSH3). W większości zanalizowanych pozycji literatury Doktorant ma słuszne zastrzeżenia do wyników badań doświadczalnych i wyników numerycznych. Świadczy to o wiedzy Doktoranta w obszarze zagadnień będących przedmiotem rozprawy doktorskiej. Doktorant nie ma jedynie zastrzeżeń do pozycji nr 41 w wykazie literatury dotyczącej redukcji siły osiowej w pompie diagonalnej, w której wirnik ma tarczę tylną i przednią oraz otwory odciążające o osi równoległej do osi wału. Jediną uwagą Doktoranta jest stwierdzenie, że wykonawcy tej pracy nie badali wpływu otworów odciążających na własności ssawne pompy.

Pytanie recenzenta, czy znane są Doktorantowi przykłady stosowania otworów odciążających z wirnikami półotwartymi (bez tarczy przedniej).

Podrozdział 3.2 „Przegląd formuł obliczeniowych siły osiowej wirników z otworami odciążającymi”

Dostępne w literaturze formuły wykorzystano w obliczeniach siły osiowej w układzie hydraulicznym w pompie zabudowanej na stanowisku badawczym zaprojektowanym i zbudowanym przez Doktoranta. Formuły obliczeniowe zostały zaczerpnięte z następujących pozycji podanych w wykazie literatury [3,27,5,2,7,8,12]. Wyniki obliczeń z wykorzystaniem wymienionych formuł empirycznych zostały zestawione w tabeli 4 z podaniem ilości otworów odciążających. W tabeli 4 również zostały zamieszczone wyniki z pomiarów na stanowisku badawczym. Analizując wyniki obliczeń numerycznych i z pomierzonymi można zauważyć duże rozbieżności między wartościami sił z obliczeń i z pomiarów. Doktorant podejmuje próbę wyjaśnienia tych rozbieżności. Z doświadczeń recenzenta wynika, że korzystanie w procesie projektowania maszyn z zależności algebraicznych podawanych w artykułach czy książkach związane jest często z dużym ryzykiem. Można z tych zależności korzystać jedynie dla zbudowania pierwszego wariantu maszyny, która następnie zostanie zbadana na stanowisku laboratoryjnym. Różnice między obliczeniowymi, założonymi a wynikającymi z pomiarów powinny być podstawą do skorygowania zależności, które zostały przyjęte dla zbudowanego pierwszego wariantu maszynowego.

W rozdziale 4 omówione zostały przepływy w otworze odciążającym. W analizie przepływu przez otwory odciążające autor rozprawy wykorzystał wyniki pomiarów doświadczalnych podane w pracy [2]. Natomiast obliczenia numeryczne przepływu wykonał Doktorant. Geometrię otworów odciążających oraz średnie prędkości w otworach wyznaczone zostały z równania ciągłości dla wszystkich przypadków zostały zestawione w tabeli 6. Wyniki obliczeń numerycznych oraz wyniki z pomiarów zostały zestawione w tabeli T8. W większości przypadków średnie odchylenie wartości ciśnień statycznych z pomiarów i z obliczeń nie przekracza 5%. Obliczenia numeryczne przepływu w otworach odciążających umożliwiły poznanie struktur wirów typu Taylora, które są źródłem strat energii oraz blokują przepływ cieczy na wlocie do pompy.

Wyniki obliczeń numerycznych zilustrowały również niekorzystny wpływ cieczy na strukturę cieczy wpływającej do wirnika. W rozdziale tym również podane zostały współczynniki przepływu μ_u w funkcji bezwymiarowego współczynnika K_ω . Zależność tą można stosować do oszacowania wartości przecieku w otworze odciążającym. Autor rozprawy wykazał również, że wielkość przecieku zależy od prędkości obrotowej oraz różnicy ciśnień po obu stronach tarczy wirnika. Potwierdzona została również utrata stabilności przepływu (wiry typu Taylora) powodująca zablokowanie części otworów odciążających generując straty przepływu w otworach. Numeryczne obliczenia przepływu w przypadku dużych prędkości obrotowych otworów z wykorzystaniem modelu turbulencji K- ϵ umożliwia osiągnięcie dobrej zgodności wyników obliczeń z wynikami pomiarów.

Stoisko badawcze

Istotnym wkładem Doktoranta w realizację rozprawy jest projekt oraz wykonanie stoiska badawczego.

Z założenia stoisko powinno umożliwiać:

- zapis wszystkich mierzonych wielkości,
- optyczne badania kawitacji w wirnikach bez otworów i z otworami odciążającymi,
- pomiar sił osiowych,

-badania wariantów z wirnikami bez otworów i z otworami, 5 wariantów z otworami prostymi i 2 wariantów z otworami pochylonymi dla określenia ich wpływu na wysokość podnoszenia, sprawność oraz nadwyżkę antykawitacyjną,

-realizację zmian prędkości obrotowej zespołu wirującego badanej pompy

-automatyzację pomiarów i opracowanie systemu akwizycji danych pomiarowych

Realizacja stanowiska do badań w wyżej wymienionym zakresie wymagała:

- projektu zamkniętego układu instalacji z regulacją ciśnienia w całym obiegu celem wyeliminowania w badaniach niekontrolowanego zjawiska kawitacji,

- pomiarów parametrów cieczy dla określenia (NPSH₃),

- zaprojektowania i wykonania układu do pomiaru siły osiowej,

- zabudowy układu do obserwacji efektów zjawiska kawitacji w króćcu wlotowym pompy,

Na szczególne podkreślenie zasługuje rozwiązanie układu do pomiaru siły osiowej oraz układu do badania początku i rozwoju kawitacji metodą optyczną. W tym celu zabudowany został w króćcu wlotowym wziernik umożliwiający filmowanie kamerą obszaru ssawnego pompy.

Pozostałe elementy i układy stanowiska spełniały wymagania normy, pozycja [51] w wykazie literatury.

W rozdziale 6 omówiona została „Analiza wpływu pochyleń otworu na przecieki”. Przedmiotem analiz była ocena wpływu różnych konfiguracji pochyleń otworów odciążających o średnicy $\varphi 6$ na średnicy podziałowej 57 mm. Obliczenia przecieku zostały wykonane dla jednego otworu o wymienianych parametrach jak w wirniku badanym, prędkości obrotowej 2940 obr./min i różnicy ciśnień między wlotem a wylotem 0,4 bar. Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla niżej wymienionych przypadków:

- (1) otworu niepochylnego w stosunku do osi wału pompy,

- (2) pochyleń odśrodkowego w kierunku komory odciążającej,

- (3) pochyleń dośrodkowego w kierunku komory odciążającej,

- (4) pochyleń poziomego w kierunku komory zgodnym z kierunkiem obrotów,

- (5) pochyleń poziomego w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów.

W tabeli T10 zestawiono wyniki obliczeń wielkości przepływu w otworze oraz średniej prędkości, z których wynika, że :

- pochyleń (2) zmniejsza przeciek i średnią prędkość przepływu,

- pochyleń (3) zwiększa przeciek i średnią prędkość przepływu,

- pochyleń (4) zwiększa przeciek i średnią prędkość przepływu,

- pochyleń (5) zmniejsza przeciek i średnią prędkość przepływu,

Z zestawiania wyników obliczeń numerycznych wielkości przepływu i prędkości cieczy wynika, że zmieniając konfigurację otworów można uzyskać różne ich wartości.

Projektując układ otworów odciążających celem zmniejszenia siły osiowej należy również określić wielkości przecieków przez otwory, które mają istotny wpływ na sprawność Volumetryczną pompy. Również kierunek wypływu czynnika ma istotny wpływ na kształt struktury napływu cieczy na wirnik decydując o wartości NPSH3. Autor rozprawy przewiduje również walidację obliczeń numerycznych.

Pytanie recenzenta do Doktoranta: Czy w rozdziale 6 rozprawy dotyczącym wpływu pochyleń otworów na wartość przecieków i średnią prędkość przepływu cieczy wirniki miały tę samą geometrię układu przepływowego (ilość, zarys, grubość łopatek, średnicę wlotową i wylotową)?

W tekście rozdziału 6 Doktorant odwołuje się do rozdziału 9.2, w którym omówione są dwa warianty otworów pochylonych. Pytanie recenzenta: które warianty były przedmiotem porównań, czy geometria układu hydraulicznego wirnika była taka sama w przypadku obliczeń numerycznych i zabudowanego w badanej pompie na stanowisku badawczym?

Rozdział 7 „Metodologia badań – serie pomiarowe”

W rozdziale tym omówiono badania dwóch wirników A i B różniących się konfiguracją otworów. Wirnik A wykorzystany był w pomiarach dotyczących wpływu średnicy i ilości otworów odciążających na parametry przepływowe energetyczne pompy (H,P,η,F). Wirnik ten posiadał otwory odciążające o osi równoległej do osi wału. Wirnik B charakteryzował się pochylonymi otworami o tej samej średnicy jakie były w wirniku A. Badania były przeprowadzone dla czterech prędkości obrotowych m.in. 1750, 2500, 2940. Oznaczenie serii pomiarowych podane zostało w tabeli T11. Wyniki badań posłużyły do sporządzenia charakterystyk (H,P,F) oraz charakterystyki (NPSH3).

Rozdział 8 „Analiza niepewności pomiarów”

W rozdziale tym zestawione zostały przyrządy pomiarowe zabudowane na stanowisku badawczym pompy. Podane zostały również wzory określające niepewność standardową B, standardową niepewność pomiaru przepływu, wysokości podnoszenia, określenia gęstości, ciśnienia parowania, lepkości kinematycznej, mocy, sprawności pomiaru siły wzdłużnej i (NPSH). W tabelach od 13 do 22 zestawione zostały wszystkie wyżej wymienione niepewności. Wyniki obliczeń niepewności potwierdzają słuszność doboru przyrządów pomiarowych.

W rozdziale 9 pt. „Wyniki badań doświadczalnych” zestawione zostały przez autora rozprawy wyniki pomiarów w postaci bezwymiarowej. Wysokość podnoszenia Ψ , mocy na wale λ , sprawności pompy η , siły osiowej δ oraz nadwyżki antykawitacyjnej ξ . Wartości te następnie przeliczone zostały na ustalone prędkości obrotowe i zamieszczone w tabeli 11. Przeliczono również lepkość kinematyczną i gęstość wody w temperaturze 20°C.

Wyniki pomiarów serii 44-47 zestawione zostały w tabelach 23-26. Graficzne ilustracje tych wyników przedstawiono na wykresach Rys. 53. Z rysunku tego wynika, że odpowiednie krzywe charakterystyk dla różnych obrotów nakładają się na siebie. Natomiast charakterystyka siły wzdłużnej czyli osiowej funkcji $\delta(\varphi)$ zbliżone jest do charakterystyki $\Psi(\varphi)$, co wskazuje na związek siły osiowej z wysokością podnoszenia pompy. Wyniki kolejnych serii pomiarowych 48-50 wirnika B (bez otworów odciążających) dla obrotów 1750, 2500, 2940 zestawione zostały w tabeli 27. Graficzną ilustrację wyników serii 48-50 przedstawiono na Rys. 55. Analizując przebiegi krzywych można w przypadku wirnika B zauważyć, że różnice między seriami 48-50 są niewielkie.

W podrozdziale 9.2 przedstawiono wyniki badań pompy z wirnikami o różnych położeniach otworów. Na Rys. 56 przedstawione są przebiegi charakterystyk przepływowo-energetycznych pompy układach bezwymiarowych $\Psi(\varphi)$, siły osiowej $\delta(\varphi)$, sprawności $\eta(\varphi)$, nadwyżki antykawitacyjnej $\xi(\varphi)$.

Na kolejnych rysunkach 57-63 zilustrowane zostały przebiegi charakterystyk przepływowo-energetycznych siły osiowej oraz nadwyżki antykawitacyjnej. Opis każdego rysunku zawiera pełną informację o badanym wariancie geometrii, ilości otworów, pochyleniu otworów oraz nadwyżce kawitacyjnej. Kształt charakterystyk odpowiada krzywym z Rys. 56.

W podrozdziale 9.3 omówione są badania kawitacji metodą optyczną. Na Rys. 64 przedstawiony został układ do obserwacji wlotu wirnika pompy. W skład tego układu wchodzi kamera doświetleniowa, wziernik. Na zdjęciach A,B,C,D Rys. 65 przedstawiono mało czytelny rozwój kawitacji dla wydajności pompy $1,3 Q_{opt}$ i obrotów wirnika 2940 na min. Pod zdjęciami w układzie H(NPSHa) zamieszczone zostały wykresy z odniesieniem do wyżej wymienionych zdjęć, które ułatwiają czytelność zdjęć. Z wykresu pod zdjęciami wynika, że początek kawitacji występuje dla MPSHa około 14 m. Na kolejnych rysunkach 66-67 zamieszczone zostały wykresy z odniesieniami do zdjęć z rozwoju kawitacji dla wydajności $1,5 Q_{opt}$. Na Rys. 68 porównano obszary początkowej kawitacji z rozkładem ciśnień otrzymanych z obliczeń numerycznych. Wyniki z pomiarów i obliczeń numerycznych wskazują na te same miejsca. W podsumowaniu badań kamerą stwierdzam, że umożliwia ona zaobserwowanie zjawiska kawitacji i jakościową oceną warunków jej zaistnienia.

Rozdział 10 poświęcony jest obliczeniom numerycznym przepływu w badanej pompie. Treść rozdziału w małej części nawiązuje do rozdziału 6 pt „Analiza wpływu pochylenia otworów na przeciek. W obszernym rozdziale w skład którego wchodzi podrozdziały: 10.1 model ciągły, 10.2 model dyskretny, 10.3 model matematyczny, 10.4 wyniki obliczeń numerycznych. W podsumowaniu w rozdziale 10 stwierdza się, że ilość, średnica i położenie prostych otworów odciążających mają wpływ na strukturę pola prędkości na wlocie do wirnika i na (NPSH3). Im większa ilość otworów tym mniejszy przeciek przez pojedynczy otwór. Mniejszy przeciek tym mniejsze zakłócenie pola prędkości przed wlotem cieczy na wirnik, ma znaczenie również rozmieszczenie otworów na średniej podziałowej i ich średnicy co powoduje różną odległość otworu w stosunku do łopatki, co z kolei może wpływać na pole prędkości i ciśnienia w pobliżu obszaru najbardziej narażonego na kawitację. Pomiaru dla stałego pola otworów ale innej ich liczby i średniej średnicy i wynikającej z tego różnego rozmieszczenia ich w stosunku do krawędzi wlotowej łopatek wskazuje na ich wpływ i charakterystyki (NPSH3). Również pochylenie otworów ma wpływ na wartość NPSH3. W przypadku podwójnego pochylenia otworu wypływająca z niego ciecz najmniej zakłóca z wszystkich badanych konfiguracji i umożliwia realizację najmniejszej nadwyżki antykawitacyjnej. Natomiast kierunek wypływającej z otworu strugi niezgodny z kierunkiem przepływu w wirniku ma duży wpływ na pole prędkości na wlocie wirnika co zwiększa wartość (NPSH3) pompy. Najwyższą sprawność osiągnęła pompa w przypadku pochylenia otworu w dwóch płaszczyznach.

W końcowej części pracy (str. 162-163) autor rozprawy wymienia najważniejsze osiągnięcia oraz proponowane dalsze kierunki badań.

Wśród wymienionych przez Doktoranta osiągnięć recenzent uważa, że do najważniejszych zrealizowanych przez autora prac należy zaliczyć:

- zbudowanie stanowiska badawczego (projekt i wykonanie),
- automatyzacja pomiarów i opracowanie systemów akwizycji danych pomiarowych,
- projekt i wykonanie zmian w konstrukcji pompy do badań kawitacji metodą optyczną oraz do pomiaru siły osiowej,
- wykonanie obszernych badań eksperymentalnych pompy z różnymi wirnikami charakteryzującymi się brakiem otworów odciążających, otworami prostymi, pochyłymi dla czterech prędkości obrotowych,

-obliczenia numeryczne przepływu w otworach i porównanie wyników obliczeń numerycznych z wynikami badań,

-wykazanie, że sprawność pomp z otworami odciążającymi zależy nie tylko od strat objętościowych ale i od dyssypacji energii w otworach.

Doktorant w końcowej części rozprawy proponuje następujące dalsze kierunki badań:

-badania wpływu położenia otworów odciążających (tradycyjnych i pochylonych) dla wirników o przestrzennej krzywiznie łopatek na zdolności ssawne i siłę wzdłużną,

-badania wpływu pochylenia otworów odciążających dla szerszego zakresu wyróżnika szybkobieżności w szczególności pomp diagonalnych, na sprawność, nadwyżkę antykawitacyjną i redukcję siły osiowej

-opracowanie metody optymalizacji stosowania pochylonych otworów odciążających w celu osiągnięcia najniższej możliwej nadwyżki antykawitacyjnej oraz najwyższej sprawności siły osiowej

Wniosek końcowy

Treść rozprawy dowodzi, że Doktorant bardzo dobrze orientuje się w przedstawionej problematyce. Nie stwierdzam w tym zakresie żadnych uchybień i oceniam znajomość przedmiotu przez Doktoranta w tym jego przygotowanie zawodowe i naukowe bardzo pozytywnie. W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana praca doktorska spełnia wymagania jakie stawia rozprawom Ustawa o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule z Zakresu Sztuki. Wobec tego wnioskuję o jej przyjęcie jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Uzasadnienie wniosku o wyróżnienie pracy

Recenzent wnioskuje o wyróżnienie rozprawy. Swoją propozycję opieram na szerokim zakresie prac zrealizowanych przez autora rozprawy zaprezentowanych w pracy dotyczących:

-krytycznych uwag wynikających z analizy pozycji literaturowych z obszaru tematu rozprawy,

-wykonania obliczeń numerycznych przepływu przez różnej konfiguracji i geometrii otworów odciążających w tarczy tylnej wirnika,

-przeprowadzonych obszernych badań doświadczalnych na stoisku zaprojektowanym i wykonanym przez Doktoranta,

-przeprowadzenie przez Autora rozprawy analizy porównawczej wyników obliczeń numerycznych z wynikami badań doświadczalnych.

Wnioski z analizy porównawczej wyżej wymienionych wyników przyczynią się do uściślenia formuł empirycznych wykorzystywanych obecnie w obliczeniach sił osiowych, poprawy sprawności pompy, zmniejszenia nadwyżki antykawitacyjnej (MPSH). Rezultaty przedstawione w pracy są wartościowe, które zdaniem recenzenta zostaną wdrożone w metodach projektowania współczesnych pomp wirowych.

