

Prof. dr hab. inż. Andrzej Błaszczuk

Łódź 16.08.2022

Katedra Energetyki

Wydział Techniczny

Akademia im. Jakuba z Paradyża

Ul. Chopina 52

66-400 Gorzów Wielkopolski

Recenzja Rozprawy Doktorskiej

mgr inż. Marcina Bieganowskiego

„Analiza zjawisk przepływowych zachodzących
w pompach wirowych z mikrorowkami”.

Podstawa prawna recenzji.

Podstawa opracowania recenzji rozprawy doktorskiej, pismo Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna, dr hab. inż. Jacka Reiner. prof. uczelni Politechniki Wrocławskiej o sygnaturze W10/D/37/2022 z dnia 7 czerwca 2022.

Recenzowana praca została wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Janusza Skrzypacza. Promotorem pomocniczym był dr inż. Przemysław Szulc.

Struktura rozprawy.

Rozprawa liczy 148 stron i jest podzielona na 10 rozdziałów numerowanych i krótkich streszczeń w językach polskim i angielskim. Dodatkowo w pracy zamieszczono spis ważniejszych oznaczeń, zestawienie indeksów dolnych oraz zestawienie literatury obejmujących 115 pozycji. Recenzowana praca jest pod względem edycyjnym bez zarzutu, o strukturze treści przejrzystej i logicznej. Świadczy to o dobrej orientacji autora w dziedzinie będącej przedmiotem jego doktoratu. Na stronach 4 i 149 podano informację, że obliczenia wykonano przy użyciu zasobów udostępnionych przez Wrocławskie Centrum Sieciowe – Superkomputerowe (<http://wcss.pl>), grant obliczeniowy numer 444.

Uzasadnienie wyboru tematu.

Tematyka recenzowanej pracy jest obecnie bardzo aktualna, dotyczy bowiem zmniejszenia energochłonności pomp o niskich wyróżnikach szybkobieżności. W przypadku tych maszyn ich niskie sprawności pozostają w ścisłym związku z dużym udziałem mocy brożenia tarcz wirników w bilansie mocy oraz niskimi sprawnościami wolumetrycznymi η_Q . W związku z koniecznością dążenia do spełnienia wymagań stawianych przez normy europejskie np.: wskaźnika minimalnej efektywności $MEI/\geq 0,4$ podjęte zostały prace naukowo – badawcze celem zmniejszenia energochłonności pomp o niskich wyróżnikach szybkobieżności. W Polsce prace naukowo-badawcze według recenzenta

w obszarze modyfikacji kanałów międzyłopatkowych wirników celem zmniejszenia energochłonności pomp zapoczątkował zespół z Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem dr hab. inż. Janusza Skrzypacza, który już w 2007 roku na wirnik pompy wirowej otrzymał zatwierdzony przez Urząd Patentowy RP Patent PL 210647B1. W kolejnych latach opublikowane zostały artykuły dotyczące wirników dla pomp o niskich wyróżnikach szybkobieżności wymienione w wykazie literatury również autora niniejszej rozprawy doktorskiej [10,83,59,60].

W związku z powyższym uważam, że podjęta przez Doktoranta tematyka ma istotne znaczenie w aspekcie zmniejszania energochłonności pomp o niskich wyróżnikach szybkobieżności, które mają szerokie zastosowanie w przemyśle chemicznym, petrochemicznym często jako pompy dozujące, charakteryzujące się małymi wydajnościami a dużymi wysokościami podnoszenia. Znajdują one również zastosowanie w innych gałęziach przemysłu np.: produkcji smoły (koksochemii) i lotniczym.

We wstępie do obszernego rozdziału 2 pod tytułem „Analiza stanu wiedzy” Autor rozprawy uzasadnia konieczność zmniejszania energochłonności pomp o niskich wyróżnikach szybkobieżności $\eta_q < 15$, podaje obszar ich zastosowania oraz podkreśla małą skuteczność metod jednowymiarowych w projektowaniu pomp $\eta_q < 15$ w aspekcie sprawności i energochłonności stawianych przez Komisje UE.

W podrozdziale 2.1 pt. „Straty towarzyszące przepływowi cieczy” wyodrębnione zostały trzy główne straty oraz podane zostały miejsca ich generacji. Wydzielone zostały straty objętościowe, hydrauliczne, tarcz wirujących wirnika oraz mechaniczne. Podkreślono, że zmniejszenie wyróżnika szybkobieżności powoduje istotny wzrost strat tarcia tarcz oraz objętościowych, natomiast straty hydrauliczne i mechaniczne nie zmieniają się w szerokim zakresie wyróżnika szybkobieżności.

W podrozdziale 2.2 pt. „Pompy o niskiej szybkobieżności – problematyka pracy”. Zawarty jest przegląd najnowszych trendów konstrukcyjnych i badań. Autor rozprawy stwierdza, że publikacje dotyczące pomp wirowych o niskich wyróżnikach szybkobieżności koncentrują się na poznaniu procesów przepływowych w układach hydraulicznych pomp korzystając z wyników badań głównie eksperymentalnych.

W punkcie 2.2.1 „Metody badawcze i główne kierunki badań” omówione zostały wyniki badań eksperymentalnych i obliczeniowych pomp o niskich wyróżnikach szybkobieżności. W pracy [15] przedstawione zostały wyniki pomiarów rozkładu prędkości w kanałach międzyłopatkowych z wykorzystaniem specjalnie do tego celu zaprojektowanego lasera dopplerowskiego. Umożliwiło to pomiar składowych promieniowych i obwodowych względnych prędkości w kanałach wirnika. Wyniki pomiarów porównane zostały z wynikami obliczeń numerycznych które okazały się zadawalająco zbieżne. W pracy [17] przeprowadzone zostały obliczenia numeryczne dwuwymiarowe, na podstawie których wyznaczone zostały charakterystyki pompy. W artykule [18] przedstawione zostały wyniki obliczeń numerycznych przepływu w wirniku półotwartym. W [19] przedstawione zostały wyniki obliczeń numerycznych CFD wykorzystane do określenia charakterystyk pompy $Q=12\text{m}^3/\text{h}$ i wysokości podnoszenia $H=2427\text{ m}$ oraz prędkości obrotowej równej $150000\text{ obr}/\text{min}$. W pracy [21] przedstawione zostały wyniki badań wirników o niskich wyróżnikach szybkobieżności, w których występowała kawitacja w zakresie wydajności pompy. W pracy [25] zamieszczone zostały wyniki pomiarów i obliczeń sił osiowych w pompie o niskich wyróżnikach szybkobieżności. Wartości siły obliczonej i zmierzonej były porównywalne. Autorzy publikacji [26] omówili wyniki obliczeń przepływu nieustalonego w kanałach układu przepływowego pompy (wirnik + spirala). Z obliczeń numerycznych wynika, że największe fluktuacje ciśnień występują w trakcie przechodzenia łopatki wirnika w pobliżu języka spirali.



W punkcie 2.2.2 „Klasyczne konstrukcje, wirniki półotwarte” przedstawione zostały wyniki badań przez zespół Kurosawy [27], dotyczące określenia przyczyn i strat mających wpływ na niską sprawność pomp oraz dobór optymalny elementu odprowadzającego ciecz z wirnika. W tym celu zbadanych zostało sześć różnych konstrukcji wirników z dwoma elementami odprowadzającymi ciecz od wirników. Uzyskane wyniki pomiarów wykazały, że badany wirnik o najmniejszym wyróżniku szybkobieżności realizuje najmniejszą sprawność. Potwierdzono również, że wirniki półotwarte charakteryzują się najniższymi sprawnościami wolumetrycznymi.

Na podstawie pozostałych pozycji wykazu literatury zamieszczonego w rozprawie doktorskiej stwierdzić należy, że zostało opracowanych wiele rozwiązań konstrukcyjnych pomp o niskich wyróżnikach szybkobieżności, nie omawiając jednak metody ich projektowania, podając jedynie ich charakterystyki przepływowo-energetyczne oraz uproszczone rysunki konstrukcyjne ich elementów. Autor rozprawy przytacza tylko dwie publikacje w wykazie literatury, które zostały opublikowane w trakcie realizacji niniejszej pracy.

W drugiej części rozprawy obejmującej rozdziały 3-10 rozciągające wraz podrozdziałami od strony 54 do 139 Doktorant omawia wyniki prac własnych dotyczących obliczeń i badań doświadczalnych oraz numerycznych, które są oryginalnym wkładem w rozprawie Doktoranta.

Rozdział 3 pt „Teza cel i zakres pracy”

Autor rozprawy sformułował następującą tezę pracy : Istnieje zbiór parametrów geometrycznych mikrorowka, który przy stałej geometrii wirnika bazowego umożliwi zmaksymalizowanie ilości energii przekazywanej do cieczy poprzez zmianę struktury przepływu w obszarze warstwy przyściennej.

Główne cele pracy dotyczą:

- identyfikacji i poznania zjawisk przepływowych występujących w wirnikach z mikrorówkami;
- określenie wpływu parametrów geometrycznych mikrorowków na parametry pracy wirnika pompy wirowej o niskich wyróżnikach szybkobieżności;
- opracowanie metodologii modelowania tego typu zjawisk z wykorzystaniem CFD;

Rozdział 4 „Badanie wstępne” rozpoczyna prezentację prac realizowanych przez Autora rozprawy.

Podrozdział 4.1 „Przedmiot badań wstępnych”

Uzasadnieniem przeprowadzenia badań wstępnych była mała ilość publikacji w dostępnej literaturze dotyczącej wpływu mikrorowków na przepływ cieczy w kanałach międzyłopatkowych wirników pomp o małych wyróżnikach szybkobieżności. Celem badań wstępnych było określenie wpływu mikrogeometrii na parametry przepływowo - energetyczne wirnika. Rowki mikrogeometrii zostały równomiernie rozmieszczone na obu ścianach a ich zarysy odpowiadały linii szkieletowej łopatki. Pięć rowków rozmieszczonych było równomiernie w każdym z kanałów międzyłopatkowych wirnika.

Rozdział 5 Analiza wymiarowa

Określenie istotnych wielkości geometrycznych wirników z mikrorówkami na osiągnięcie zadanych parametrów przepływowo-energetycznych pompy wymaga przeprowadzenia analizy wymiarowej.

5.1. Założenia wstępne

Analiza wymiarowa wymagała zdefiniowania następujących założeń upraszczających:

- geometria głównego układu przepływowego wirnika jest stała (niezmienna),



- przekrój poprzeczny rowka jest prostokątem o szerokości s_i , głębokości g_i ,
- głębokość rowka jest stała wzdłuż całej jego długości,
- szkieletowa rowka odpowiada szkieletowej łopatki wirnika,
- rowki są równomiernie rozłożone na ściankach wewnętrznych wirnika,
- rowki wykonywane są symetrycznie wewnątrz otworu międzyłopatkowego wirnika (taka sama liczba rowków na przedniej i tylnej ściance),
- porównywane wirniki wykonywane są z tego samego materiału i w tej samej technologii co umożliwia uzyskanie takiej samej chropowatości (porównywalne straty tarcz wirujących).

5.2. Wielkości geometryczne wpływające na przekazywanie energii do cieczy.

Energia właściwa przekazywana przepływającemu czynnikowi jest funkcją niżej wymienionych niezależnych parametrów geometrycznych i hydraulicznych wirników z mikrorówkami.

$$Y = g \cdot H = f(Q, P_w, \rho, \vartheta, n, d_2, \beta_1, \beta_2, s_r, g_r, z_r) \quad (5.1)$$

W przypadku analizy dotyczącej wirników o tej samej geometrii układu hydraulicznego powyższa zależność upraszcza się do postaci

$$Y = g \cdot H = f(Q, P_w, \rho, \vartheta, n, d_2, s_r, g_r, z_r) \quad (5.2)$$

W tabeli 5.1 zestawione zostały oznaczenia i wielkości fizyczne.

Ponieważ wymiary wszystkich analizowanych parametrów zawierają wielkości podstawowe [m], [kg], [s] pozwala to na podstawienie twierdzeń Buckingham'a zapisać funkcję 5.2 w postaci

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9, \pi_{10}) = 0 \quad (5.3)$$

Analiza wymiarowa pozwoliła określić, które parametry geometrii mikrorówków wpłyną w największym stopniu na parametry pompy. Na tej podstawie autor rozprawy przygotował plan eksperymentu.

Rozdział 6 pt. Plan eksperymentu.

Określono parametry geometryczne, których zmiana w sposób istotny wpłynie na charakterystyki pompy. W wielkości zmian uwzględniono technologie wykonania wirników. Zakres zmian badanych parametrów (grubość, szerokość oraz liczbę rowków) zestawiono w tabeli 6.1.

Rozdział 7 Przygotowanie modeli do badań numerycznych i eksperymentalnych.

7.1. Przygotowanie modeli wejściowych.

Opracowane zostało 16 modeli wirników w tym jeden wirnik bazowy, które umożliwiły przygotowanie geometrii do wydruku 3D oraz budowę bryły wodnej wirnika do badań numerycznych.

Rozdział 8 Obliczenia numeryczne.

8.1 Wstęp

Dla wyznaczenia zależności energii jednostkowej w funkcji parametrów geometrycznych Doktorant, z uwagi na trójwymiarowy charakter przepływu turbulენტnego, w obliczeniach numerycznych wykorzystał program ANSYS CFX192. W kolejnych podrozdziałach 8.2, 8.3 autor rozprawy doktorskiej

na podstawie literatury omawia: Numeryczne modelowanie przepływu, Modelowanie turbulencji a na Rys. 8.1 przedstawione jest porównanie metod modelowania.

Rozdział 8.4 Opis modelu numerycznego.

Rozdział ten zawiera 9 podrozdziałów.

Podrozdział 8.4.1 pt. Bryła wodna części przepływowej pompy.

Obliczenia numeryczne wymagały wykonania bryły wodnej, dla której zostanie opracowana siatka do obliczeń. Graficzna ilustracja modelu numerycznego pompy została przedstawiona na Rys. 8.2.

Zastosowane w modelu uproszczenia nie budzą zastrzeżeń ze strony recenzenta.

Podrozdział 8.4.2 Model dyskretny pompy.

Założenia dotyczące siatki obliczeń nie budzą zastrzeżeń. Główne parametry siatek numerycznych zestawiono w tabeli T 8.1.

Wprowadzanie parametru y^+ dla określenia wymiarów y^+ jest działaniem standardowym.

Podobnie oznaczanie wysokości pierwszej warstwy (Δy_1). Dla zamodelowania wszystkich zjawisk w warstwie przyściennej Doktorant podaje w tekście podrozdziału niezbędne dane do wyznaczenia siatki. Siatki zostały opracowane tak aby można było je wykorzystać w obliczeniach niestacjonarnych w modelu LES. Graficzną ilustrację siatki numerycznej przedstawia Rys. 8.4.

Podrozdział 8.4.3 Warunki brzegowe dla obliczeń stacjonarnych.

Obliczenia numeryczne zostały wykonane w programie ANSYS CFX192. Warunki początkowe do obliczeń stacjonarnych zestawione zostały w tabeli 8.2.

W trakcie obliczeń kontrolowana była różnica ciśnień między wlotem a wylotem z wirnika.

Podrozdział 8.4.4 Wybór modelu turbulencji do obliczeń stacjonarnych.

W obliczeniach stacjonarnych wykorzystany został model SST ponieważ łączy zalety k- ϵ i k- ω .

Najważniejszą zaletą modelu SST jest odwzorowanie przepływu przy ściankach kanału oraz niewrażliwość na rozdzielczość siatki. Badania wykazały, że w przypadku dużych różnic rozdzielczości siatek naprężenia ścinające w warstwie przyściennej różnią się o mniej niż 2%.

Podrozdział 8.4.5 Wyznaczanie wysokości podnoszenia i sprawności.

Podane zostały podstawowe zależności na wysokość podnoszenia pompy oraz sprawność całkowitą.

Podrozdział 8.4.6 Walidacja modelu numerycznego.

Stosowanie symulacji numerycznych jako podstawowej metody badawczej wymaga aby wyniki obliczeń zostały zweryfikowane wynikami pomiarów doświadczalnych.

Sprawdzenia wyników obliczeń numerycznych dokonano porównując charakterystyki przepływowo-energetyczne pomp z wirnikami WIR1, WIR15 (tabela 6.3).

Ilustrację porównania charakterystyk wysokości podnoszenia wirnika rzeczywistego z wirnikiem obliczonym przedstawiono na Rys. 8.7.

Porównanie bezwymiarowej charakterystyki sprawności wirnika rzeczywistego w wynikami obliczeń numerycznych przedstawiono na Rys. 8.8.

Łatwo zauważyć, że obliczenia numeryczne bardzo dobrze odwzorowują charakterystykę badanego wirnika. Z porównania charakterystyk sprawności wynika, że w punktach nominalnych błąd wynosi 4% a poza tym punktem dochodzi do 16%.

W podsumowaniu analizy porównawczej zgodność charakterystyk Doktorant stwierdza, że model CFD może być użyty jako narzędzie badawcze.

Podrozdział 8.4.7 Wyniki obliczeń numerycznych dla $Q/Q_n = 1$ ($Q_{CFD} = 8 \text{ m}^3/\text{h}$)

W tabeli 8.3 zestawione zostały wartości wysokości podnoszenia i sprawności dla punktu optymalnego wszystkich 14 wirników. Nie był brany pod uwagę wirnik 8 z powodu nie uzyskania wymaganych zbieżności w trakcie obliczeń numerycznych. Analizując zestawienie wyników obliczeń wirników można zauważyć, że największe przyrosty wartości wysokości podnoszenia realizują wirniki WIR_04 i WIR_10 w stosunku do wirnika bazowego o około 10%.

Największymi sprawnościami charakteryzowały się wirniki WIR_10 i WIR_14. W odniesieniu do wirnika bazowego dawało to wzrost sprawności o 10 %.

Podrozdział 8.4.8 Budowa modelu matematycznego zależności energii jednostkowej Y od parametrów geometrycznych rowka dla Q/Q_n ($Q_{CFD}=8 \text{ m}^3/\text{h}$)

Określenie zależności wpływu parametrów geometrycznych mikrorowków wyznaczonych z analizy wymiarowej na wysokość podnoszenia analizowanego wirnika wymagało od Doktoranta korzystania z wytycznych podanych w pozycji zamieszczonych w wykazie literatury [109, 110, 73, 111, 112, 113].

Podrozdział 8.4.9 Budowa modelu matematycznego zależności energii jednostkowej Y od parametrów geometrycznych dla pozostałych analizowanych wydajności ($Q_{CFD} \neq 8 \text{ m}^3/\text{h}$)

Ponieważ wysokość podnoszenia H zależy nie tylko od parametrów geometrycznych układu przepływowego pompy, ale zależy również od jej wydajności Q wprowadził równania (8.63 i 8.64), które opisują charakterystykę przepływową pompy $H(Q)$. W tabeli 8.12 zestawiono wysokości podnoszenia pompy określone na podstawie modelu matematycznego H_{model} z wysokościami podnoszenia otrzymanymi z symulacji CFD. Różnice wysokości nie przekraczały ± 3 zmian wydajności $(0,56 \div 1,35)Q/Q_n$. Dla oceny modelu określonego równaniem (8.63) oraz obliczeń CFD został wykonany i przebadany wirnik WIR_14. Na rysunku 8.15 przedstawione zostały charakterystyki przepływowe w zakresie zmian wydajności $(0,5 \div 1,5)Q/Q_n$ z pomiaru na stanowisku badawczy oraz krzywe $H(Q)$ określone na podstawie obliczeń CFD i modelu matematycznego. Z przedstawionych krzywych $H(Q/Q_n)$ wynika, że od Q_n równe od 0,8 do 1,5 charakterystyki te praktycznie pokrywają się. Natomiast w zakresie od 0,5 do 0,8 występuje niewielka różnica w przebiegu krzywych $H(Q/Q_n)$.

Podrozdział 8.5 Ocena graficzna wyników obliczeń w pompie – obliczenia stacjonarne

Podrozdział 8.5.1 Sposób prezentacji wirników

Ilustracja wyników obliczeń numerycznych dotyczy rozkładów prędkości i ciśnień cieczy przepływającej przez kanały międzyłopatkowe wirnika w trzech przekrojach ortogonalnych prostopadłych do przebiegu mikrorowków.

Podrozdział 8.5.2 Analiza rozkładów ciśnienia i prędkości – obliczenia stacjonarne

Autor rozprawy omawia i graficznie ilustruje rozkłady ciśnień i prędkości w kanałach międzyłopatkowych wirników: bazowego, WIR_14 i WIR_1 w trzech liniach ortogonalnych do zarysu

mikrorowków oznaczonych na rysunku 8.17 ORTO1, ORTO2, ORTO3 oraz w płaszczyznach merydionalnych SPAN5, SPAN10, SPAN50, SPAN95. Porównanie rozkładów prędkości w wyżej wymienionych płaszczyznach przedstawiono na Rys. 8.19÷8.27. Zamieszczone ilustracje rozkładów ciśnień i prędkości umożliwiają ocenić strukturę przepływu czynnika w kanałach międzyłopatkowych wirnika.

Podrozdział 8.6 Wytyczne do projektowania wirników z mikrorowkami

Wyniki obliczeń numerycznych oraz ich analizy statystyczne wskazują, że największy wpływ na parametry przepływowo-energetyczne wirnika ma głębokość g_r oraz jego szerokość s_r . Na Rys. 9.28 przedstawiony został wpływ stosunku s_r/g_r na względny przyrost sprawności. Natomiast na Rys. 8.29 p[przedstawiona została zależność przyrostu sprawności od pola przekroju wszystkich rowków $\Delta p(A_r)$, gdzie A jest iloczynem $A = s_r \cdot g_r \cdot z_r$ dla wydajności nominalnej. Podany został również wzór na pole przekroju $A_r = \frac{b_2 \cdot \pi \cdot d}{\varphi_2}$, gdzie b_2 – szerokość kanału na wylocie, d_2 – średnica na wylocie z wirnika, Φ_2 – współczynnik przesłonięcia kanału przepływowego na wylocie z wirnika. Autor rozprawy podaje również wzór na optymalny stosunek pól przekroju wylotowego z wirnika do pola przekroju rowków

$\zeta_r = \frac{A_2}{A_{r\text{opt}}}$. Znajomość wartości ζ_r dla założonej wartości stosunku wymiarów rowka z zakresu $(0,8 \div 2)s_r/g_r$ i przyjętej ilości łopatek pozwala określać optymalne wymiary rowka dla wirnika o innej średnicy.

Podrozdział 8.7 Wnioski ze stacjonarnych obliczeń numerycznych

W oparciu o analizę wyników badań oraz obrazu przepływu Doktorant sformułował sześć wniosków z których trzy dotyczą geometrii rowków:

- 1- Największy wpływ na wielkość energii właściwej ma głębokość rowka g_r . Analiza obrazu przepływu potwierdziła również największy wpływ głębokości rowka na parametry przepływowe.
- 2- Analizując porównania rozkładów prędkości można zauważyć, że odsuwanie się od ścianek wirnika wpływ rowka na prędkość maleje szybciej dla rowków o mniejszej głębokości.
- 3- Określony został również stosunek pól wylotowego wirnika do pola przekroju rowków.

Podrozdział 9 Obliczenia niestacjonarne

Z doświadczeń Recenzenta wynika, że obliczenia niestacjonarne wymagają długiego czasu obliczeń dlatego stosowane są w przypadkach koniecznej identyfikacji zjawisk w obszarze przepływu przez wirnika i spiralę pompy.

Podrozdział 9.2 Opis zastosowanej procedury obliczeniowej

Autor rozprawy w celu identyfikacji zjawisk nieustalonych (zmiennych w czasie) w przepływie przez wirnik wykonał obliczenia numeryczne z wykorzystaniem modelu LES WALE. Wyniki tych obliczeń zostały porównane do rezultatów obliczonych za pomocą modelu SST Transient. Obliczenia niestacjonarne przeprowadzone zostały dla tych samych wirników co niestacjonarne wirnika bazowego, WIR_0 oraz wirnika z mikrorowkami WIR_14. Jako wartości początkowe do obliczeń niestacjonarnych numerycznych wykorzystane zostały wyniki obliczeń stacjonarnych. Wartość kroku czasowego gwarantującego stabilność numeryczną rozwiązania została dobrana tak, aby średnia

wartość liczby $Co_{RMS} \approx 1$ oraz umożliwiła uzyskanie odpowiedniej liczby Couranta. Obliczenia zostały wykonane dla wydajności nominalnej. W Tabeli 91 zestawione zostały pozostałe warunki początkowe dla obliczeń niestacjonarnych.

W trakcie obliczeń rejestrowano wartość y^+ na powierzchniach wirnika, momenty na powierzchniach kontrolnych oraz zbieżności głównych pętli obliczeń niestacjonarnych. Wykresy wymienionych wielkości przedstawione zostały odpowiednio na rysunkach 91, 92, 93.

Podrozdział 9.3 Porównanie obrazu przepływu dla obliczeń niestacjonarnych (SST i LES)

Przedmiotem porównania były rozkłady ciśnienia (Rys. 9.4÷9.5) prędkości względnej (Rys. 9.6) oraz wirowości (Rys. 9.11). wymienione rozkłady są wynikami niestacjonarnych obliczeń numerycznych z wykorzystaniem modeli turbulencji SST oraz LES WALE wyznaczone dla czasu $t_e=0,01017$ s (pół obrotu wirnika).

Rozdział 10 pt. Podsumowanie i wnioski końcowe

Doktorant potwierdza tezę pracy, że istnieje zbiór parametrów geometrycznych mikrorowka, który przy stałej geometrii bazowej wirnika umożliwia zmaksymalizowanie ilości energii przekazywanej do cieczy poprzez zmianę struktury przepływu w obszarze warstwy przyściennej.

W oparciu o wyniki obliczeń numerycznych i badań doświadczalnych autor rozprawy formułuje 9 wniosków:

- istnieje związek między parametrami geometrycznymi mikrorowka,
- największy wpływ na wielkość energii jednostkowej ma głębokość rowka g_r , mniejszy ma szerokość rowka $3s_r$, a najmniejszy ma liczba rowków,
- wyniki obliczeń numerycznych potwierdziły, że głębokość rowka g_r ma istotny wpływ na pole prędkości przepływu,
- mikrogeometria przyczynia się do zmniejszenia strat powodowanych krążeniem cieczy w kanałach wirnika. Mikrorowki powodują również zmniejszenie prędkości cieczy w warstwie przyściennej zmniejszając jednocześnie straty przepływu w wirniku,
- mikrorowki zmniejszają względną prędkość w kanałach międzyłopatkowych przyczyniając się również do zmniejszenia strat przepływu,
- obliczenia niestacjonarne zjawisk szybkozmiennych metodą RANS są wystarczające w ocenie ilościowej przepływu,
- obliczenia numeryczne modelem LES-WALE umożliwiają szczegółową analizę zjawisk występujących w przepływie przez wirnik,
- numeryczna mechanika płynów może być traktowana jako narzędzie badawcze do modelowania i analiz przepływowych,
- walidacja modelu obliczeniowego wykazała, że błędy uzyskanych wirników nie przekraczają 4%.

Doktorant w końcowej części rozprawy proponuje następujące dalsze kierunki prac:

- Badanie wpływu przesunięcia fazowego rowka na zmniejszenie krążenia cieczy,
- Badanie wpływu rowków o zmiennej szerokości i głębokości na przebieg konwersji energii,
- Możliwość zastąpienia rowków konstrukcją ryflowaną co ułatwi ich wykonanie za pomocą tradycyjnych metod odlewniczych.

Podsumowując rozprawę doktorską mgr inż. Michała Bieganowskiego stwierdzam, że jest napisana bardzo starannie a jej przejrzysta struktura pomaga czytelnikowi w swobodnym poruszaniu się wśród bogatej tematyki omówionych zagadnień eksperymentalnych i numerycznych. Ponadto bogata ilustracja otrzymanych wyników w formie tabel i graficznych ilustracji oraz rezultatów obliczeń numerycznych stanowi także o wysokiej jakości rozprawy doktorskiej.

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 rozprawy przez Doktoranta w tym jego przygotowanie zawodowe i naukowe bardzo pozytywnie.

W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana rozprawa 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

Oceniana rozprawa wnosi nowe elementy poznawcze w zakresie: zależności parametrów przepływowo-energetycznych pomp od parametrów geometrycznych mikrorowków w wirnikach pomp o małych wyróżnikach szybkobieżności (równania 8.63 i 8.84). Podane w rozprawie ilustracje struktury przepływu w kanałach układu przepływowego są wynikiem obliczeń numerycznych przepływu stacjonarnego i niestacjonarnego. Znajomość położenia i występowania struktur przepływu wewnątrz kanałów pozwoli na wyeliminowanie obszarów zawirowania cieczy, skutkiem czego będzie zmniejszenie strat przepływowych oraz energochłonności pomp.

Interpretacja i omówienie przez Doktoranta przedstawionych na rysunkach 9.4÷9.19 porównań rozkładów prędkości, wirowości dla różnych konstrukcji wirników, modeli turbulencji, dla różnych płaszczyzn nie budzi zastrzeżeń u recenzenta.

Jednocześnie doceniając wysoki poziom merytoryczny i staranność edytorską stwierdzam, że w mojej ocenie praca zasługuje na wyróżnienie.

