Prof. zw. dr hab. inż. Krzysztof Wierzcholski
PL 70781 Szczecin, Seledynowa 9/7
Poland, phone (004891)4 631-835
Kom.505729119

Szczecin 25.06.2019

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Czabana pt. ANALIZA HYDRODYNAMICZNEGO SMAROWANIA FERROOLEJAMI STOŻKOWEGO ŁOŻYSKA ŚLIZGOWEGO

1. UWAGI OGÓLNE

Praca doktorska mgr. inż. Adama Czabana jest z zakresu tribologii a w szczególności tarcia płynnego. Praca ma charakter analityczno-numeryczny z własną weryfikacją pomiarową oraz z jednoczesną solidną weryfikacją uzyskanych rezultatów, przeprowadzoną na bazie dotychczasowych wyników badań literaturowych. Fakt ten podnosi niewątpliwie wartość pracy.
Celem rozprawy jest próba sformułowania przez Autora własnego modelu tarcia płynnego w zakresie łożyska stożkowego, smarowanego ferro-olejem na szeroki zakres wartości parametrów materiałowych i konstrukcyjnych poprzecznych łożyskach ślizgowych z możliwością sterowania wartości wymienionych parametrów. Sformułowany przez Autora model nosi znamiona oryginalności i wydaje się, że stanowi twórcze rozwinięcie dotychczasowych nielicznie opracowanych modeli hydrodynamicznego smarowania ślizgowych łożysk stożkowych w światowej i krajowej literaturze w zakresie tarcia płynnego.
W niniejszej pracy Autor zamieszcza bibliografię liczącą aż **210** pozycji naukowych w porządku alfabetycznym z zakresu niekonwencjonalnych czynników smarujących oraz modelowania łożysk ślizgowych o różnych geometriach co świadczyłoby o tym, że Autor ma dobre rozeznanie w zakresie dotychczasowych osiągnięć naukowych minionej i współczesnej hydrodynamicznej teorii smarowania w dziedzinie tarcia płynnego. Warto tu zatem dokonać przekroju czasowej piramidy zamieszczonych pozycji bibliograficznych. Mamy więc 1 pozycję z 1885roku, 1 pozycję Osborne Reynoldsa z 1886 roku, 1 pozycję z 1948 roku, 1 pozycję z 1952 roku 1 pozycję z 1953 roku,1 pozycję z 1957 roku, 2 pozycje literaturowe z 1963 roku. Tak więc mamy **8** pozycji historycznych dotyczących hydrodynamicznego smarowania łożysk ślizgowych. Trudno stwierdzić, czy każda z tych pozycji

bibliograficznych jest trafnie raz cytowana, a powinna. Z ostatniej dekady 10 lat od 2009 do 2019 Autor zamieszcza **81** prac w tym **13** prac własnych.
Praca składa się z **5**-ciu rozdziałów, które są uzupełnione sześcioma dodatkami: A, B, C, D, E, F wraz ze spisem rysunków i tablic. Rozdziały pracy ilustruje **129** rysunków i **13** Tablic, natomiast sześć dodatków zawiera w sumie **95** oryginalnych rysunków Autora. Cała praca zawiera więc **224** oryginalne rysunki. Rysunki przedstawiają wyznaczone numerycznie rozkłady wartości ciśnienia hydrodynamicznego oraz jego przekrojów wzdłużnych i poprzecznych a także rozkłady wartości temperatury w szczelinie stożkowego łożyska ślizgowego. Tablice systematyzują wyznaczone numerycznie dane dotyczące materiałów łożyskowych, geometrii łożyska oraz niektórych wartości ciśnienia i temperatury dla różnych wartości indukcji magnetycznych.
Zdaniem recenzenta, temat niniejszej rozprawy został przez Autora podjęty trafnie i właściwie, ponieważ problem smarowania poprzecznych stożkowych łożysk ślizgowych z uwzględnieniem tarcia płynnego w polu indukcji magnetycznej ze względu na konieczność stosowania licznych czynników smarujących nowej generacji o własnościach wyłącznie nie newtonowskich oraz ferromagnetycznych, jest ciągle jeszcze nie dopracowany do końca na obecnie znanym recenzentowi etapie współczesnych badań tribologicznych.
Według informacji recenzenta, najbardziej wszechstronny szybko rozwijający się model tarcia i smarowania z uwzględnieniem czynników ferromagnetycznych w polu indukcji magnetycznej jest w większości przypadków modelem tarcia płynnego i granicznego na bazie molekularnej. Współcześnie silnym bodźcem do jego rozwoju jest nowa coraz bardziej udoskonalana generacja mikroskopów sił atomowych AFM umożliwiająca śledzenie dokonywających się procesów smarowania płynnego w obszarach mikronowych a nawet nanometrowych.
Obrany został przez Autora model zmian i skutków oddziaływującego pola indukcji magnetycznej na obszar tarcia powierzchni stożkowej, który może być wywołany na przykład stężeniem cząstek magnetycznych w czynniku smarującym. Taki typ modelu jest zgodnym przejawem współczesnych tendencji rozwojowych sterowania w zakresie hydrodynamicznej teorii smarowania w obszarach trących się cząsteczek magnetycznych. Cząstki magnetyczne miały wczoraj wymiar około 15 nanometrów a dzisiaj już zaledwie 5 nanometrowej średnicy z możliwością samoistnych ruchów Browna zapobiegających sedymentacji. Bo przecież tarcie mieszane w tym tarcie płynne i graniczne można definiować jako sumę tarć wewnętrznych pomiędzy cząsteczkami cieczy odbywającej przepływ smarujący. Wyniki badań analitycznych porównane oraz uzupełnione wynikami uzyskanymi przy pomocy obliczeń numerycznych oraz wynikami kluczowych pomiarów oraz wynikami literaturowymi innych Autorów, dają większą wiarygodność dowodzonej tezy oraz podjętych celi w niniejszej pracy.

Przy rozwiązywaniu problemu teoretycznego Autor wykorzystał w znacznym stopniu wiadomości z zakresu rachunku wektorowego i tensorowego matematyki kursu politechnicznego. Należy pozytywnie odnotować fakt, że Autor przeprowadził dodatkowo analizę błędów stosowanych przez siebie metod obliczeniowych przy jednoczesnym dokonaniu weryfikacji osiągniętych wyników na drodze licznych porównań z wynikami innych Autorów.
Wyniki niniejszej pracy koncentrują się w zakresie dotychczas nie znanych recenzentowi wpływów zmian działania indukcji magnetycznej pola magnetycznego na parametry przepływowe i eksploatacyjne poprzecznych stożkowych łożysk ślizgowych w trakcie smarowania ferromagnetycznym czynnikiem smarującym powierzchni poprzecznego stożkowego łożyska ślizgowego . Mamy tu na uwadze wpływy zmian pola indukcji magnetycznej na rozkłady prędkości czynnika smarującego, ciśnienie hydrodynamiczne, rozkłady wartości temperatury, wartości sił nośnych, siły tarcia, współczynniki tarcia wraz z prognozą zużycia. Takie badania zdaniem recenzenta wnoszą duży wkład twórczy w dziedzinie tribologii.

2. OMÓWIENIE PRACY

Praca została napisana na 268 stronach formatu A4, wraz ze spisem treści i zestawem symboli i oznaczeń na początku oraz oddzielnym zestawem i opisem rysunków i tabel na końcu numeracji. Bibliografia umieszczona jest na końcu pracy na oddzielnych 18 stronach rzymskiej numeracji.
Omówimy teraz w skrócie treści poszczególnych rozdziałów.

2.1. Rozdział 1 pt. **Wprowadzenie**. W rozdziale tym przedstawiono:
2.1.1: Podstawowe informacje z zakresu ferro-cieczy wraz z rozwojem twórczym ich właściwości w ostatnich dwóch dekadach. Autor na podstawie własnych pomiarów zamieścił interesujące zależności wzrostu lepkości ferro-cieczy ze wzrostem indukcji magnetycznej oraz zależności spadku lepkości dynamicznej ze wzrostem prędkości deformacji w trakcie przepływu smarującego.
2.1.2: Aktualny literaturowy, szczegółowo omówiony i cytowany stan wiedzy z zakresu ferro-hydrodynamicznego smarowania ze szczególnym uwzględnieniem poprzecznych stożkowych łożysk ślizgowych na tle historycznym z ostatnich 50 lat. Pomimo tak szczegółowego przeglądu Autor pominął dwóch istotnych autorów polskich prekursorów ślizgowych łożysk stożkowych są nimi prof. Andrzej Szaniawski IMPAN oraz prof. Zbyszko Kaźmierski i Prof. Zdzisław Parszewski z Politechniki Łódzkiej.
2.1.3: Tezę pracy formułuje Autor poprzez następującą sentencją:
Zastosowanie ferro-czynnika smarującego w poprzecznym stożkowym łożysku ślizgowym daje możliwość regulacji i sterowania parametrami przepływowymi

i eksploatacyjnymi łożyska ślizgowego poprzez oddziaływanie na olej zewnętrznym polem indukcji magnetycznej.
2.1.4. Główne cele pracy to:
2.1.4.1. Semianalityczne rozwiązanie układu równań ruchu i energii w stożkowym układzie współrzędnych ortogonalnych dla nie izotermicznego przepływu w cienkiej warstwie przyściennej nie newtonowskiej ferro-cieczy wiodące do wyznaczenia w 3D pięciu funkcji określających trzy współrzędne wektora prędkości, ciśnienia i temperatury. Stąd wynika wyznaczenie sił tarcia i współczynnik tarcia.
2.1.4.2. Opracowanie programu obliczeniowego według znanej metody Newtona do numerycznego wyznaczenia wartości poszukiwanych funkcji w przypadku uwzględniania w obliczeniach numerycznych nieliniowych członów równań różniczkowych cząstkowych a w szczególności przy uwzględnieniu charakterystycznego dla łożyska stożkowego ssącego efektu wirującego czopa stożkowego.
2.1.4.3. Weryfikacja uzyskanych wyników symulacji numerycznej na podstawie dokonanych porównań z analitycznymi rezultatami otrzymanymi przy wykorzystaniu komercyjnego oprogramowania CFD oraz wynikami uzyskanymi przez innych cytowanych autorów w zakresie pewnych szczególnych przypadków dotyczących łożysk krótkich i nieskończenie długich.

Autor recenzowanej pracy deklaruje przeprowadzenie na drodze analityczno-numerycznej dowodu tezy oraz wykazanie przedsięwziętych celi.

Należy pozytywnie odnotować świadomość autora o ograniczeniach rozpatrywanego modelu. Ograniczeniami deklarowanymi przez autora jest między innymi: stacjonarny przepływ smarujący, pominięcie wędrówki środka czopa, uwzględniany przepływ laminarny, brak poślizgu, brak deformacji powierzchni łożyskowych, sprowadzenie podatności magnetycznej do skalaru, brak wpływu ciepła Joule`a na wartości parametrów smarowania, pominięcie dyssypacji ciśnieniowej na parametry smarowania. Autor pomija również zmiany ciśnienia po kierunku wysokości szczeliny, które mogą zaistnieć dla niektórych cieczy nie Newtonowskich objawiając się tym, że po uproszczeniach cienkiej warstwy filmu, w drugim równaniu zachowania pędu (2.4.83), pochodna ciśnienia po kierunku wysokości szczeliny jest różna od zera. Tego ograniczenia Autor nie napisał w początkowym opisie modelu, lecz wspomniał o tym na końcu pracy w podsumowaniu i wnioskach.

2.2. Rozdział 2 pt. **Model matematyczny** został prawidłowo opracowany i opisany. Treść tego rozdziału obejmuje model geometryczny i równania podstawowe.
Opis modelu hydrodynamicznego nie izotermicznego smarowania w stacjonarnym polu magnetycznym składa się w pracy z pięciu równań a

mianowicie trzech skalarnych równań zachowania pędu rozpisanych w trzech kierunkach, z równania ciągłości strugi cieczy smarującej oraz z równania zachowania energii wraz z członami reprezentującymi siły masowe pochodzące od pola indukcji magnetycznej. Do tych równań dołącza Autor równania Maxwella dla pola magnetycznego wraz z związkami fizycznymi pomiędzy wektorem indukcji magnetycznej a wektorem natężenia pola magnetycznego i wektorem namagnesowania. Ponadto równania podstawowe mechaniki płynów obejmują związki konstytutywne pomiędzy współrzędnymi tensora naprężeń w nie newtonowskiej ferromagnetycznej cieczy smarującej a współrzędnymi tensora prędkości deformacji z uwzględnieniem lepkości pozornej zależnej od ciśnienia, temperatury, prędkości deformacji oraz indukcji magnetycznej.
Opisany układ pięciu równań wyznacza pięć niewiadomych a mianowicie trzy składowe wektora prędkości cieczy smarującej, ciśnienie hydrodynamiczne oraz temperaturę.
Rozpatrywane równania doprowadza Autor do postaci bezwymiarowej w cienkiej przyściennej warstwie granicznej wykorzystując w opisie liczby kryterialne Reynoldsa, Brinkmanna, Graetza oraz bezwymiarową liczbę ciśnienia magnetycznego, która po raz pierwszy została wprowadzona w pracy doktorskiej R. Janiszewskiego w 1981 roku. Dla takich równań przyjmuje Autor właściwe warunki brzegowe dla poszukiwanych niewiadomych.
Nowe elementy opisu teoretycznego koncentrują się w otoczeniu nieklasycznego, zmodyfikowanego, nieliniowego modelu zapisanego między innymi równaniem (2.6.119) wyznaczającym ciśnienie hydrodynamiczne, które jest sprzężone z nieliniowymi, nieklasycznymi równaniami (2.7.139)+…. wyznaczającymi temperaturę.

2.3. Rozdział 3 pt. Metoda numeryczna, dotyczy schematów symulacji obliczeń numerycznych przeprowadzonych z wykorzystaniem metody różnic skończonych (MRS) implementowanej metodą Newtona dla rozwiązań nieliniowych równań cząstkowych II rzędu. Korzysta również z metody oprogramowania Fluent. Autor dokonuje weryfikacji zbieżności schematu procedury uzyskanych wyników obliczeń. Porównuje uzyskane wyniki z wynikami znanymi z literatury dla łożyska nieskończenie długiego oraz dla łożyska krótkiego przy różnych mimośrodowościach względnych. Weryfikacja dotyczy poprawności działania opracowanej procedury obliczeń numerycznych.
W tych porównaniach bierze Autor pod uwagę klasyczne rozwiązania dla łożysk walcowych. Recenzent uważa, że bardziej stosowne byłoby porównać znane wyniki klasycznych rozwiązań dla łożyska stożkowego z analogicznymi odszukanymi z literatury wynikami dla klasycznych rozwiązań łożyska stożkowego będących szczególnymi przypadkami najogólniejszych rozwiązań analitycznych (2.6.119), (2.7.139) przedstawionych w niniejszej pracy. Dopiero na końcu pracy w piątym rozdziale podsumowań i wniosków, Autor krótko informuje, że łożysko walcowe można byłoby potraktować jako szczególny

przypadek łożyska stożkowego gdy kąt $90^o-\gamma$ pomiędzy osią czopa a tworzącą czopa dąży do zera. Taką uwagę należało by podać przy formułowaniu modelu. Wtedy model winien być tak sformułowany, aby równanie określające ciśnienie (2.6.119) oraz temperaturę (2.7.139) przy omawianym kącie dążącym do zera sprowadzałoby się do znanych równań ciśnienia i temperatury w łożyskach walcowych.
Recenzent prosi o wyjaśnienie, że wzór (3.6.19) opisujący ciśnienie w łożysku walcowym jest funkcją graniczną ogólnego wzoru (2.6.119) dla łożyska stożkowego gdy kąt $\gamma \rightarrow 90^o$. Winno wtedy zanikać ssące działanie wirującego czopa, gdyż łożysko stożkowe staje się łożyskiem walcowym.
Przyjęto siatkę obliczeń numerycznych (51×51) gdyż program zdołał dokonać obliczenia dla kwadratowych macierzy odwrotnych rzędu (51×51). Badana została wartość współczynnika tempa zbieżności procedury obliczeniowej przy określonym residuum zbieżności. Na Rys.3.1 przedstawiony został schemat procedury obliczeniowej.
Dodatkowego uwiarygodnienia obliczeń dokonano poprzez porównanie uzyskanych wyników z rezultatami otrzymanymi z wykorzystaniem oprogramowania CFD Fluent platformy Ansys Workbench.

2.4. Rozdział 4 pt. Wyniki symulacji, jest częścią pracy, w której Autor przy pomocy obliczeń numerycznych o wynikach zilustrowanych na 83 rysunkach przedstawia wartości ciśnienia hydrodynamicznego, rozkłady temperatury, składowe siły nośnej, składowe siły tarcia, współczynniki tarcia dla poprzecznego, stożkowego łożyska ślizgowego, przy uwzględnieniu ferromagnetycznego czynnika smarującego w polu indukcji magnetycznej. Do obliczeń przyjmuje ferro-ciecz o 2% stężeniu cząstek magnetycznych, dla których czynnik smarujący ma optymalne właściwości, jak wykazał Marcin Frycz.
Obliczenia i ilustracje wyników koncentrują się wokół następujących trzech czynników oddziaływujących na parametry eksploatacyjne a mianowicie: 1. Wpływ jednorodnego pola indukcji magnetycznej; 2. Wpływ niejednorodnego pola indukcji magnetycznej; 3. Wpływ ssącego działania wirującego czopa stożkowego.
Do obliczeń przyjmuje Autor różne kąty nachylenia powierzchni stożkowej wirującego czopa, różne wartości mimośrodowości względnej, bezwymiarową długość najchętniej L_1=1, dla łożyska krótkiego L_1=0.25, dla łożyska długiego L_1=2, oraz różne wartości bezwymiarowej indukcji magnetycznej.

2.5. Rozdział 5 pt. Podsumowanie i wnioski, przedstawione przez Autora w tym rozdziale rekapitulują Jego pogląd w zakresie osiągniętych rezultatów zawartych w pracy. Jednym z centralnych i nowatorskich modeli jest trójwymiarowa zmienność lepkości dynamicznej czynnika smarującego oraz zaproponowany przez Autora iloczynowy model lepkości dynamicznej

(2.8.143), którego poszczególnymi czynnikami w iloczynie są wpływy temperatury, ciśnienia, szybkości ścinania w przepływie, oraz pole indukcji magnetycznej. Znajdujemy tam iloczyny wzorów (2.8.144), (2.8.147), (2.8.148), (2.8.146). Zdaniem Recenzenta postać iloczynowa ma wtedy zaletę, gdy badamy wpływy jednoczesne. Ponadto, opis iloczynowy daje wtedy korzyści, gdy wyeliminowanie jakiegokolwiek wpływu nie eliminuje z racji iloczynu pozostałych wpływów. Taki przypadek szczęśliwie występuje w niniejszej pracy. Ten fakt dokumentuje Autor wzorami (2.8.144-145), (2.8.147-148).
Wiadomo, że w pracy Autor nie uwzględnia wpływu stężenia cząstek magnetycznych na parametry hydrodynamicznego smarowania. Jak wytłumaczyć sformułowania Autora na str.82, 4, 5 w. od dołu + na str.95, 14-14 w. od dołu a mianowicie: *Dopasowując zależności….dla oleju o 2% stężeniu cząstek magnetycznych… + … określone własnymi metodami wartości współczynników o 2% stężeniu cząstek magnetycznych… ??*
Autor uzasadnia swoje stanowisko w sprawie realizacji podjętych przez siebie celi oraz zasadności udowodnionej w pracy tezy. Recenzent odniesie się do tego problemy w rozdziale „Realizacja Tezy i Celów pracy” niniejszej recenzji.
Dalsze badania widzi Autor w obszarach badań zmian parametrów eksploatacyjnych łożysk powodowanych przekoszeniem osi czopa w stosunku do osi symetrii panewki, stochastyczną zmianą wysokości szczeliny, niestacjonarnym ustalonym a nawet niestacjonarnym turbulentnym przepływem czynnika smarującego w szczelinie łożyska ślizgowego.

3. KRYTYCZNA OCENA PRACY DOKTORSKIEJ

W przedstawionym opracowaniu, recenzent zauważył pewne partie materiału, które są niedopracowane oraz ustępy pracy posiadające zbyt odważne stwierdzenia nie zawsze odzwierciedlające poprawność wnioskowania. Do ujemnych stron rozprawy zaliczyć można nieliczne niedociągnięcia edytorskie i drobne błędy przedstawione poniżej:

3.1. W przedstawionych wzorach i równaniach (2.6.119)-(2.7.143) występują całki podwójne iterowane po kierunku zmiennej wysokości szczeliny y_1 z funkcjami podcałkowymi typu Γ_m, Γ_d, Γ_c, … zależnymi od y_1. Należy zaznaczyć, że funkcje te od y_1 zależą. Na przykład $\Gamma_m(y_1)$.

3.2. W przedstawionych wzorach i równaniach (2.6.120), … występują całki podwójne iterowane po kierunku zmiennej wysokości szczeliny y_1 z funkcjami podcałkowymi typu η_1, … zależnymi od y_1. Należy wtedy to koniecznie zaznaczyć na przykład $\eta_1(y_1)$.

3.3. W przedstawionych wzorach i równaniach (2.6.123), … występują całki nawet potrójnie iterowane po kierunku zmiennej wysokości szczeliny y_1 z funkcjami podcałkowymi typu Γ_m, Γ_d, Γ_c, …, η_1, …. przy czym występują nie poprawnie zapisane górne granice całkowania y_1 w dwóch kolejno po sobie następujących krokach iteracji w miejscach od 0 do y_1.Należy wtedy w całce wewnętrznej przyjąć granice od 0 do y_2, natomiast w całce zewnętrznie iterowanej granice od 0 do y_1,w końcu w następnej zewnętrznej o ile istnieje taka granice całkowania winny być przyjęte granice od 0 do h_{p1}. Pod każdym wzorem winna być wtedy **koniecznie** uwidoczniona nierówność a mianowicie: $0 \le y_2 \le y_1 \le h_{p1}$. Wtedy wzór będzie czytelny.

3.4. Pod wzorami (2.5.108)+(2.5.109) należy koniecznie napisać ile wynosi Γ_m, Γ_d w miejscach $y_1=0$ i $y_1= h_{p1}$ oraz przede wszystkim ile wynosi Γ_m, Γ_d w przypadku gdy lepkość η_1 jest niezależna od y_1 czyli dla przypadku klasycznego!! Jest to konieczne, gdyż w konsekwencji Czytelnik domaga się komentarza pod równaniem (2.6.119) wyznaczającym ciśnienie, a mianowicie jaką postać ono przybiera gdy lepkość η_1 jest niezależna od y_1.Takie obliczenie uwiarygodni przedstawiony przez Autora nowy model matematyczny.

3.5. Równanie wyznaczające temperaturę (2.7.139) należy również sprowadzić do postaci klasycznej przyjmując, że lepkość η_1 jest niezależna od y_1 czyli od temperatury uzależnionej od wysokości szczeliny. Wtedy Autor może zauważyć, że temperatura będzie zależała od ciśnienia, ale w niektórych przypadkach ciśnienie może nie być zależne od temperatury w pierwszym kroku przybliżenia. Jest to istotny problem w rozpatrywaniu lepkości zależnej od temperatury.

3.6. Wśród warunków bazowych na uwagę zasługuje warunek wymiany ciepła między czopem a panewką (2.3.45) umożliwiający wyznaczenie niewiadomego rozkładu temperatury na stożkowej powierzchni tulei panewki. Mankamentem jest brak wprowadzenia zależności Fouriera-Newtona oraz liczby Nusselta, która kształtuje i modeluje rozpatrywaną wymianę ciepła wraz z rozkładem temperatury na panewce.

3.7. Następnym mankamentem we wprowadzonych warunkach brzegowych (2.4.99) dla składowej prędkości cieczy smarującej po kierunku wysokości szczeliny jest brak uzasadnienia tego warunku chociaż warunek ten został napisany poprawnie. Przyjęcie wartości zerowej na ruchomej, opływanej powierzchni czopa i opływanej, nieruchomej powierzchni panewki jest w świetle praw mechaniki płynów tylko możliwe dla cieczy lepkiej opływającej powierzchnię. W przepływie potencjalnym nie lepkim takie założenie byłoby nie poprawne.

3.8. Recenzent z uwagą czytał schemat obliczeniowy na Rys. 3.1. Węzeł numeryczny w niniejszej pracy jest następujący: Nie można wyznaczyć temperatury z równań (2.7.139), (2.7.141), (2.7.142) bez uprzedniego wyznaczenia ciśnienia z równania (2.6.119). Ale wyznaczenie ciśnienia z równania (2.6.119) jest uzależnione od wprowadzenia wyznaczonej już uprzednio temperatury z równania (2.7.139), następnie podstawienia tej funkcji temperatury do funkcji lepkości zależnej od temperatury i występującej we współczynnikach równania (2.6.119) oraz wyznaczenie ciśnienia z tak przedstawionego nieliniowego równania różniczkowego cząstkowego. Ciśnienie pozostanie nadal funkcją tylko dwóch zmiennych w kierunku obwodowym i wzdłużnym a niezależne od współrzędnej promieniowej. Recenzent ma więc zapytanie dotyczące numerycznego oprogramowania nowego modelu analitycznego zawartego w rozdziale 2. Czy została uwzględniona zmiana lepkości oleju po kierunku wysokości szczeliny? Jeśli zaś została pominięta to Autor nie zaznaczył wyraźnie tego faktu. Jak rozumieć sformułowanie Autora na str. 157, 11+12 w. od góry:….*wpływ temperatury na lepkość*….Czy w 2D czy 3D?

3.9. Podpisy pod rysunkami od 3.2 do 3.21 budzą zdaniem Recenzenta liczne pytania. Autor porównuje rozwiązania analityczne z rozwiązaniami numerycznymi MRS. Czyni to dla łożyska walcowego. Dlaczego porównuje tutaj wyniki dla łożyska walcowego a nie stożkowego?? Patrz koniec akapitu 2.3.

3.10. W niektórych podpisach pod rysunkami od 3.22 do 3.40 brakuje precyzyjnych podpisów. Ten fakt nasuwa Czytelnikowi istotne pytania:

- Czy porównania dotyczą łożyska stożkowego?
- Czy Autor dostosował wiarygodnie ilość węzłów obliczeniowych w siatce obliczeń numerycznych?
- Skąd wiadomo, że próba dostosowania oprogramowana Fluent do obliczeń dla łożysk stożkowych jest dostateczna??
- Czy obliczenia porównań zawartych na rysunkach od 3.22 do 3.40 dotyczą najogólniejszych rozwiązań (2.6.119) przy współudziale temperatury (2.7.139), (2.7.141), (2.7.142), czy też tylko szczególnych przypadków tych rozwiązań czyli klasycznych przypadków, gdy lepkość czynnika smarującego nie zmienia się po kierunku wysokości szczeliny???

3.11. W rozdziale 4 jest widoczny odczuwalny brak pisemnej informacji dotyczących sposobu względnie modelu, według którego otrzymano wyniki obliczeń bogato zilustrowane 83 rysunkami. Autor nie podał jasno informacji w treści opisu pod rysunkami i nie podał odpowiedzi na następujące pytanie:

- Czy obliczenia wartości prezentowanych na rysunkach od 4.1 do 4.83 dotyczą najogólniejszych rozwiązań (2.6.119) przy współudziale temperatury (2.7.139),

(2.7.141), (2.7.142), czy też tylko szczególnych przypadków tych rozwiązań czyli klasycznych przypadków, gdy lepkość czynnika smarującego nie zmienia się po kierunku wysokości szczeliny??? Na to pytanie należy bezwarunkowo odpowiedzieć. Jeżeli w obliczeniach pominięto wpływ zmian lepkości ferro-oleju po grubości warstwy, to obowiązkiem Autora jest podanie lub wskazanie szczególnych postaci rozwiązań analitycznych, na podstawie których Autor dokonał obliczeń numerycznych w rozdziale 4.

3.11. Na rysunku 2.1 przedstawiono geometrię łożyska stożkowego z naniesionym kątem γ i innymi niezbędnymi oznaczeniami. W spisie oznaczeń czytamy, że kąt γ definiuje stożek czopa i panewki. Powinno być napisane dokładniej, że jest to kąt pomiędzy tworzącą stożka a prostą prostopadłą do osi czopa??? Ponadto oznaczenie rozpatrywanego kąta literką γ oraz oznaczenie szybkości ścinania tą samą literką γ lecz z kropką u góry, jest niewłaściwe w tej samej pracy.

4. UWAGI POZYTYWNE O PRACY DOKTORSKIEJ

4.1. Zdaniem recenzenta, Autor niniejszej rozprawy jest jedynym z nielicznych badaczy łożyskowych w Polsce w zakresie tribologii, który rozwiązuje w sposób nowoczesny problemy związane z analitycznym smarowaniem ferromagnetycznym poprzecznego, ślizgowego łożyska stożkowego w stałym polu indukcji magnetycznej przy ograniczonym wykorzystaniu metod numerycznych.

4.2. W pracy podano analityczną metodę wyznaczania parametrów przepływowych i eksploatacyjnych uzyskanych w trakcie ferro-hydrodynamicznego smarowania stożkowych poprzecznych łożysk ślizgowych przy uwzględnieniu stacjonarnego pola indukcji magnetycznej. W znanej literaturze z zakresu tribologii, recenzent nie zna takich wszechstronnych rozwiązań analitycznych dla łożyska stożkowego jakie w niniejszej pracy zostały przedstawione.

4.3. Recenzent z uznaniem komentuje przyjęte przez Autora współczesne założenia zmian lepkości cieczy smarującej po kierunku wysokości szczeliny łożyska, leżące u podstaw rozpatrywanego modelu matematycznego hydrodynamicznej teorii smarowania poprzecznego stożkowego łożyska ślizgowego.

4.4. Autor pracy jako jeden nielicznych tribologów widzi zasadność przyjmowania właściwego krzywoliniowego układu współrzędnych do opisu smarowanych powierzchni. Dlatego też powierzchnie stożkowe łożyska opisuje

Autor we współrzędnych stożkowych. Konieczność ta wynika z charakteru przepływu medium smarującego w cienkiej warstwie granicznej, gdzie opływana krzywizna ma istotny wpływ na rozkład prędkości i przyspieszeń. Zjawisko takie uwidacznia się zwłaszcza w smarowanych powierzchniach mikro-łożysk. Niestety właściwość ta przez wielu tribologów jest często niezauważalna co skutkuje najchętniej błędnie przyjmowanym prostokątnym układem współrzędnych do opisu nieomal że każdego węzła tarcia ślizgowego.

4.5. Opis modelu smarowania przedstawia Autor prawidłowo trójwymiarowym rozkładem trzech współrzędnych wektora prędkości medium smarującego. Często nieuwzględniana przez licznych tribologów współrzędna wektora prędkości czynnika smarującego w kierunku wysokości szczeliny smarnej jako dużo mniejsza od pozostałych współrzędnych wektora prędkości, ma jednak istotne znaczenie w procesie smarowania zwłaszcza przy wyprowadzeniu tak zwanego zmodyfikowanego równania Reynoldsa wyznaczającego rozkład ciśnienia hydrodynamicznego. Zmodyfikowane równanie Reynoldsa jest konsekwencją nałożenia właściwych warunków brzegowych na składową wektora prędkości w kierunku wysokości szczeliny smarującej, dlatego też ta składowa wektora prędkości chociaż bardzo mała, jest niezbędna w modelu hydrodynamicznego smarowania.

4.6. Następnym pozytywnie odnotowanym efektem przez Recenzenta jest 3D zmienność temperatury czyli nie tylko w kierunku obwodowym i wzdłużnym ale również po kierunku grubości filmu smarującego. Zmienność temperatury filmu po kierunku wysokości szczeliny jest już widoczna w bezwymiarowej i doprowadzonej do postaci warstwy granicznej formuły równania zachowania energii (2.4.96). Oczywiście wiadomo, że różnica pomiędzy wyrównaną temperaturą na powierzchni czopa i zmienną temperaturą na powierzchni panewki może być niewielka ale nie zawsze, natomiast różnice gradientów w rozkładzie temperatury w poprzek wysokości szczeliny bywają dość znaczne w niektórych miejscach kąta opasania. Ponadto, właśnie przyjęcie zmian gradientów temperatury we filmie po kierunku wysokości szczeliny, uzależnia i sprzęga wzajemnie poprzez lepkość równanie zachowania energii z równaniem zmodyfikowanym wyznaczającym ciśnienie hydrodynamiczne. Ciśnienie musi bezpośrednio zależeć od temperatury i temperatura musi być bezpośrednio w pierwszym przybliżeniu zależna od ciśnienia. Wynika stąd dalej zmienność lepkości dynamicznej czynnika smarującego nie tylko w kierunku obwodowym i wzdłużnym, ale również w kierunku grubości filmu olejowego. Właściwość zmian gradientów funkcji temperatury po kierunku grubości filmu olejowego nasila się szczególnie w mikro-łożyskach dla ultra cienkich warstewkach czynnika smarującego o wysokości poniżej 1 mikrometra.

4.7. Pozytywnym rezultatem osiągniętym przez Autora jest przyjęcie modelu zmiennej lepkości od temperatury a jednocześnie zmian lepkości po grubości filmu. Wynika stąd zmodyfikowane równanie (2.6.119) wyznaczające ciśnienie hydrodynamiczne. Równanie (2.6.119) jest ściśle sprzężone z równaniami (2.7.139),(2.7.141),(2.7.142) wyznaczającymi temperaturę. Równania (2.6.119)+(2.7.139)+… kreują oraz tworzą układ dwóch równań cząstkowych o dwóch niewiadomych, którymi są ciśnienie i temperatura.

4.8. Pozytywnie ocenia Recenzent samo przedsięwzięcie podjęte przez Autora a dotyczące porównania wyników numerycznych uzyskanych przy pomocy narzędzia numerycznego wykorzystanego w niniejszej pracy ze znanymi wynikami literaturowymi oraz z wynikami otrzymanymi za pomocą oprogramowania CFD Fluent.

4.9. Bogata literatura i wykaz prac cytowanych w liczbie 210 pozycji, z których duża ilość jest z ostatniego dziesięciolecia, świadczą o tym, że Autor posiada gruntowne i aktualne rozeznanie w temacie badawczym, który realizuje w przedstawionej pracy.

4.10. Duża liczba ilustracji rysunkowych w ilości 224 oraz 13 tablic zawierających oryginalne wyniki numeryczne ułatwia Czytelnikom-inżynierom zrozumienie i praktyczne wykorzystanie rozwiązywanego w pracy problemu.

5. REALZACJA TEZY I CELÓW PRACY

5C1. Autor zrealizował podjęty cel pod tytułem:
Semi-analityczne rozwiązanie układu równań ruchu i energii w stożkowym układzie współrzędnych ortogonalnych dla nie izotermicznego przepływu w cienkiej warstwie przyściennej nie newtonowskiej ferro-cieczy,
ponieważ w Rozdziale 2 uzyskał rozwiązania analityczne i semi-analityczne 3D dla pięciu funkcji określających trzy współrzędne wektora prędkości, ciśnienie i temperaturę. Stąd dokonał semi-analitycznego wyznaczenia sił tarcia i współczynnika tarcia.

5C2. W pracy wykonany został następujący cel badawczy**:**
Opracowanie programu obliczeniowego według znanej metody Newtona do numerycznego wyznaczenia wartości poszukiwanych funkcji, **ponieważ** w Rozdziale 3 i 4 uzyskał wartości numeryczne ciśnienia, temperatury, sił nośnych, sił tarcia w przypadku uwzględniania w obliczeniach pola indukcji magnetycznej oraz nieliniowych członów równań różniczkowych cząstkowych a w szczególności przy uwzględnieniu charakterystycznego dla łożyska stożkowego ssącego efektu wirującego czopa stożkowego.

Dodatkowo opracowany przez Autora nowy program obliczeniowy, pozwolił w rozdziale 4 dojść do nieznanych do tej pory wniosków opisanych poniżej.

• W Tab. 4.10, 4.11, 4.12 Autor ilustruje procentowy **wpływ pominięcia** członów nieliniowych opisujących **ssące działanie wirującego czopa** na wartość siły nośnej, siły tarcia i współczynnika tarcia przyjmując przy tym różne wartości mimośrodowości względnej, brak indukcji magnetycznej i jej obecność oraz różne kąty nachylenia powierzchni stożkowej.

• Autor na drodze obliczeń numerycznych wnioskuje, że największe efekty wzrostu siły nośnej i współczynnika tarcia wywołane pominięciem ssącego działania wirującego czopa mają miejsce dla małych wartości mimośrodowości względnych.

5C3. Autor zrealizował zamierzony cel badawczy dotyczący:
weryfikacji uzyskanych wyników symulacji numerycznej na podstawie dokonanych porównań z analitycznymi rezultatami otrzymanymi przy wykorzystaniu komercyjnego oprogramowania CFD oraz porównań z rezultatami innych cytowanych autorów,
ponieważ między innymi w Rozdziale 3 sprowadził numerycznie wartości rozwiązań o skończonej długości do pewnych szczególnych przypadków rozwiązań dotyczących łożysk krótkich i nieskończenie długich.

5T1. Praca niniejsza udowadnia następującą Tezę:

Zastosowanie ferro-czynnika smarującego w poprzecznym stożkowym łożysku ślizgowym daje możliwość regulacji i sterowania parametrami przepływowymi i eksploatacyjnymi łożyska ślizgowego poprzez oddziaływanie na olej zewnętrznym polem indukcji magnetycznej,

ponieważ Autor na podstawie uzyskanych przez siebie ogólnych rozwiązań analitycznych dla łożyska stożkowego w rozdziale 2, otrzymuje w rozdziale 4 pewne nowe inteligentne właściwości smarowania hydrodynamicznego władające możliwością sterowania parametrami eksploatacyjnymi przy zewnętrznym oddziaływaniu pola indukcji magnetycznej**.** Właściwości takie uzyskane przez Autora podano poniżej.

• Autor konkluduje, że w przypadku **jednorodnego** pola indukcji magnetycznej, największe przyrosty nośności, temperatury, sił tarcia spowodowane oddziaływaniem pola indukcji magnetycznej pojawiają się w obszarze największych ciśnień.

• Autor wykazuje, że w przypadku **jednorodnego** pola indukcji magnetycznej, wraz ze wzrostem mimośrodowości względnej, przy panewce łożyska stożkowego, powstają obszary o coraz niższych wartościach bezwymiarowej temperatury.

• Autor dowodzi, że w przypadku **jednorodnego** pola indukcji magnetycznej, wzrasta lepkość ,której wzrost implikuje wzrost siły nośnej.

• Autor uzyskuje, że w przypadku wzrostu wartości **jednorodnego** pola indukcji magnetycznej następuje wzrost wartości siły tarcia oraz zmniejszenie wartości umownego współczynnika tarcia.

• Autor analizuje zmiany rozkładu wartości ciśnienia hydrodynamicznego oraz lokalizację jego ekstremalnych wartości spowodowane oddziaływaniem **niejednorodnego** pola indukcji magnetycznej a konkretne w dwóch przypadkach a mianowicie gdy pole indukcji magnetycznej wzrasta oraz gdy maleje w kierunku wzdłużnym.

6. PODSUMOWANIE WYNIKÓW PRACY

Oceniając pracę naukową mgr. inż. Adama Czabana oraz osobiste dyskusje z nim przeprowadzone na temat jego rozprawy mogę stwierdzić, że pracę wykonał samodzielnie z dużym twórczym zaangażowaniem. Pracę oceniam pozytywnie bez większych błędów merytorycznych.

Biorąc pod uwagę przedstawione w niniejszej recenzji wartości twórcze rozprawy doktorskiej pt. ANALIZA HYDRODYNAMICZNEGO SMAROWANIA FERROOLEJAMI STOŻKOWEGO ŁOŻYSKA SLIZGOWEGO,
Recenzent jednoznacznie stwierdza, że w myśl ustawy o stopniach i tytułach naukowych, mgr inż. Adam Czaban może być dopuszczony do obrony pracy doktorskiej przed Radą Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni.

Prof. zw. dr hab. inż. KRZYSZTOF WIERZCHOLSKI
Professor of Theoretical and Applied Mechanics
PL-70781 SZCZECIN, POLAND
Seledynowa street 9/7, Phone: 0048-91-631835

Phone:0048-91-4631-835

Wierzcholski Krzysztof