

Dr hab. inż. Marcin Trojan, prof. PK
Katedra Energetyki
Wydział Mechaniczny
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

Kraków, 30.08.2019 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Józefa Raka

pt. „Numeryczna analiza procesów ciepłno-przepływowych w komorze roboczej
maszyny spiralnej z uwzględnieniem wpływu przecieków wzdłużnych na
współczynnik wnikania ciepła”

1. Podstawa opracowania

Recenzję opracowano w oparciu o uchwałę Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej z dnia 3 lipca 2019 roku.

2. Informacje ogólne

Oceniana praca doktorska wykonana została w Katedrze Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem Pana dr hab. inż. Sławomira Pietrowicza, prof. uczelni, pełniącego w przewodzie doktorskim obowiązki promotora.

Praca doktorska liczy łącznie 97 stron tekstu zasadniczego i zawiera 5 rozdziałów (str. 9-84), które poprzedza spis treści (str. 2-3), wykaz ważniejszych oznaczeń (str. 4-5) oraz Wstęp (str. 6-8), kończy natomiast wykaz literatury (str. 85-97), zawierający 103 pozycje reprezentatywne dla tematu dysertacji, z których Doktorant jest współautorem jednej pracy.

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Wpłynęło dnia 03.08.2019 r.

49/1291/2019

3. Ocena tematyki pracy

Rozprawa doktorska dotyczy możliwości poprawy sprawności izotermicznej maszyn spiralnych, co pozwoli między innymi na ograniczenie zużycia energii potrzebnej do zasilania takich urządzeń, a tym samym obniży koszty ich pracy. Ma to bardzo istotne znaczenie, ponieważ rosnące zapotrzebowanie na energię w świecie oraz szkodliwe skutki jej wytwarzania skłaniają do poszukiwania oszczędności energii w celu zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego.

W rozprawie Autor podjął próbę określenia wpływu wybranych zjawisk przepływowo-cieplnych na intensywność wymiany ciepła między czynnikiem roboczym a łopatkami w maszynach spiralnych. Z uwagi na złożoność procesów zachodzących w komorach roboczych gazowych maszyn energetycznych podjęta tematyka jest trudna i wymagająca skomplikowanych badań. Posługując się modelowaniem numerycznym Doktorant określił współczynnik wnikania ciepła wewnątrz maszyny spiralnej, a uzyskane wyniki zweryfikował z dotychczas stosowanymi metodami. Na podkreślenie zasługuje weryfikacja eksperymentalna założeń modelu obliczeniowego z zastosowaniem pośredniej metody badawczej, co znacząco podnosi wartość pracy.

Biorąc pod uwagę fakt, że dotychczasowa wiedza na temat wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła wewnątrz maszyn spiralnych nie jest jeszcze pełna, a także możliwości zmniejszenia zużycia energii przez maszyn spiralnych poprzez zwiększenie ich sprawności, należy stwierdzić, że **tematyka pracy doktorskiej mgr inż. Józefa Raka jest ważna i aktualna**. Wymaga ona szerszego rozpoznania zarówno teoretycznego jak i praktycznego, począwszy od badań laboratoryjnych, aż do wdrożeń w większych skalach. Aktualność podjętej tematyki potwierdza również duża ilość publikacji naukowych z ostatnich lat cytowanych w pracy.

4. Cel i zakres pracy

Celem pracy było udowodnienie tezy w brzmieniu: „Zaburzenia przepływu czynnika, wywołane przez przecieki wzdłużne, wpływają na współczynnik wnikania ciepła i procesy mieszania w komorze roboczej maszyny spiralnej, co pozwala na przybliżenie procesu sprężania do teoretycznej przemiany izotermicznej.”

Udowodnienie tak postawionej tezy Autor uzyskał poprzez realizację założonego planu pracy, obejmującego zarówno część teoretyczno-obliczeniową, jak również część praktyczno-doświadczalną. Zarówno wyniki rozważań teoretycznych, skomplikowanych symulacji CFD jak również praktycznego eksperymentu pozwoliły na wykazanie istnienia zależności pomiędzy wewnętrznym polem przepływu czynnika roboczego w komorze roboczej maszyny spiralnej, przeciekami wzdłużnymi pomiędzy

komorami, a warunkami wymiany ciepła. Uzyskane wyniki umożliwiły Autorowi niniejszej rozprawy doktorskiej zaproponowanie współczynnika korekcyjnego do formuły na analityczne wyznaczenie liczby Nusselta, zmniejszającego rozbieżności pomiędzy wynikami modelowania numerycznego a wynikami uzyskanymi w oparciu o parametry zredukowane.

5. Szczegółowa charakterystyka pracy

We Wstępie Doktorant dokonał krótkiego wprowadzenia do podjętej tematyki omawiając problemy związane ze zużyciem energii przez maszyny spiralne i konieczność podniesienia ich sprawności w celu redukcji zużywanej energii. Osiągnięcie wysokiej sprawności izotermicznej procesu wymaga wymiany ciepła pomiędzy gazem a ścianami komory roboczej na drodze konwekcji. Istnieją jednak duże problemy z wyznaczeniem współczynnika wnikania ciepła wewnątrz maszyny spiralnej. Wymieniona przez Autora, najczęściej stosowana formuła na liczbę Nusselta, oparta na wzorze Dittusa-Boeltera, nie daje jednak w pełni satysfakcjonujących rezultatów. Stąd między innymi podjęta tematyka pracy. We Wstępie została również krótko scharakteryzowana zawartość rozprawy doktorskiej.

Kolejną część pracy stanowi Rozdział 1 – Wprowadzenie, zawierający opis dotychczasowego stanu zagadnienia. Rozdział rozpoczyna się od ogólnej charakterystyki maszyn spiralnych z uwzględnieniem podziału gazowych maszyn objętościowych na różne typy. Przedstawiono w tej części rozdziału zakres parametrów gazowych maszyn energetycznych i wykonano krótki opis maszyn rotacyjnych podpierając się odpowiednimi pozycjami literaturowymi. Dokonano również porównania maszyn rotacyjnych z konstrukcjami tłokowymi, opisując wady i zalety ich stosowania.

Dalsza część Rozdziału 1 podzielona została na 3 podrozdziały.

W podrozdziale 1.1 Autor skupił się na opisie konstrukcji maszyn spiralnych, przedstawiając w sposób zrozumiały zasadę ich działania. Kształt łopatek determinuje parametry maszyny spiralnej, dlatego część pracy poświęcona została krzywym możliwym do zastosowania jako podstawa geometrii łopatki maszyny spiralnej. W głównej mierze skupiono się na krzywej ewolwentowej (najczęściej stosowana krzywa).

Podrozdział 1.2 zawiera opis aktualnego stanu wiedzy o warunkach wymiany ciepła w komorze roboczej. W pierwszej kolejności zestawiono czynniki mające wpływ na ilość ciepła możliwego do wyprowadzenia z komory roboczej maszyny spiralnej, wśród których współczynnik wnikania ciepła do ścian komory roboczej ma istotne znaczenie. Następnie pokazano jak zmienia się położenie i geometria komory roboczej w procesie sprężania. Omówiono spręż naturalny podkreślając, że właściwe dobranie tego parametru ma istotny wpływ na osiągane sprawności maszyn spiralnych. W dalszej części podrozdziału przedstawiono bilans masy w komorze roboczej z uwzględnieniem przecieków

wzdłużnych mających z kolei wpływ na niejednorodność rozkładu pola ciśnienia, prędkości i temperatury w maszynach spiralnych. Doktorant wyjaśnił w tym miejscu pojęcie przecieku.

Istotną część Rozdziału 1 stanowi podrozdział 1.3 opisujący stosowane modele matematyczne maszyn spiralnych. W praktyce wykorzystywane są modele uproszczone, bazujące na parametrach zredukowanych oraz modele szczegółowe, oparte na metodach CFD. W tej części pracy Autor skupił się na opisie modeli opartych o parametry zredukowane. Zapisano podstawowe równania, na których bazują modele matematyczne maszyn spiralnych (równanie oparte na pierwszej zasadzie termodynamiki dla procesu sprężania oraz równanie ciągłości). Następnie opisano metodykę modelowania wymiany masy w maszynie spiralnej, z uwzględnieniem założeń i uproszczeń przyjętych w opisanym modelu. W kolejnej części podrozdziału omówiono bilans cieplny w komorze roboczej maszyny spiralnej oraz sposób wyznaczania liczby Nusselta, pozwalającej na określenie możliwości odbioru ciepła przez ścianki komory roboczej. W ostatniej części podrozdziału 1.3 opisano spotykane w literaturze modele dwu i trójwymiarowe.

Rozdział 1 dobrze wprowadza czytelnika w tematykę pracy dając ogólny pogląd na dotychczasowy stan zagadnienia. Cytowane pozycje literaturowe dobrane zostały w sposób prawidłowy. W zdecydowanej większości są to publikacje z ostatnich lat.

W Rozdziale 2 opisany został cel podjętej pracy doktorskiej, skupiającej się głównie na poszerzeniu wiedzy na temat możliwości poprawy sprawności izotermicznej maszyn spiralnych. Następnie zdefiniowano tezę pracy o brzmieniu: „Zaburzenia przepływu czynnika, wywołane przez przecieki wzdłużne, wpływają na współczynnik wnikania ciepła i procesy mieszania w komorze roboczej maszyny spiralnej, co pozwala na przybliżenie procesu sprężania do teoretycznej przemiany izotermicznej.” Oraz tezę pomocniczą: „Możliwe jest modelowanie zjawisk zachodzących w maszynach spiralnych w określonej fazie procesu za pomocą układu z tożsamą geometrią, opartego na ruchu obrotowym.” Na koniec Rozdziału 2 Autor przedstawił zakres i plan prac przewidzianych do realizacji w ramach recenzowanej pracy doktorskiej.

Bardzo ważną część pracy doktorskiej stanowi Rozdział 3 zawierający opis przeprowadzonego modelowania CFD. Do obliczeń zastosowany został opracowany przez Doktoranta model numeryczny wykorzystujący metodę elementów skończonych do rozwiązywania równań zachowania masy, pędu i energii ściśliwego gazu w zmiennej geometrii. Uwzględnienie zmiennych warunków brzegowych, odwzorowujących zmianę kształtu komór roboczych w maszynie spiralnej, polegało na transformacji domeny obliczeniowej w czasie. Do obliczeń wykorzystano pakiet ANSYS-CFX oraz program ICEM CFD. Obliczenia wykonywane były dla zadanej liczby kroków czasowych, po wykonaniu których generowana była automatycznie nowa siatka odpowiadająca aktualnej geometrii (funkcja „remesh” wykorzystująca opracowany przez Doktoranta algorytm do generowania siatki blokowo-strukturalnej). Wygenerowana siatka numeryczna spełniała założone wymagania w stosunku do ortogonalności i jakości w całym obszarze domeny obliczeniowej. Następnie obliczenia były kontynuowane po

interpolacji dotychczasowego rozwiązania na nową siatkę numeryczną. Należy zaznaczyć, że deformacja siatki numerycznej możliwa była tylko w niewielkim zakresie kąta obrotu wału maszyny, z uwagi na spadek ortogonalności siatki w rejonach punktów wspólnych spiral.

Wykonanie właściwych obliczeń poprzedzone było serią obliczeń próbnych mających na celu weryfikacji działania przygotowanego modelu numerycznego. Obliczenia próbne przeprowadzono dla uproszczonej geometrii walca i pozwoliły one na sprawdzenie tempa narastania błędów numerycznych w stosunku do rozwiązania analitycznego. Stwierdzono, że zarówno deformacja siatki numerycznej, jak i interpolacja wyników pośrednich na nową siatkę są źródłem błędów w uzyskiwanych wynikach. Błędy te można jednak zredukować do akceptowalnego poziomu, a wnioski z symulacji testowych zostały wykorzystane do dobrania warunków symulacji i kryterium stosowania remeshu.

Właściwe symulacje komputerowe przeprowadzono na bezolejowej sprężarce spiralnej, w której geometria łopatek oparta była o krzywą ewolwentową. Model geometryczny maszyny zredukowany został do przestrzeni zajmowanej przez czynnik roboczy. Ponadto przyjęte założenia w postaci wyłączenia z rozważań zjawisk przepływowych w kierunku osiowym oraz przecieków czołowych sprawiły, że przecieki wzdłużne były jedynym sposobem wymiany masy pomiędzy komorami. Pozwoliło to na uproszczenie modelu do postaci dwuwymiarowej.

Doktorant dokonał również analizy wpływu gęstości siatki numerycznej na wyniki obliczeń. Spośród przetestowanych przypadków wybrany do dalszej analizy został model o liczbie węzłów numerycznych równej 20 tys.

W przeprowadzonych symulacjach najpierw zbadano wpływ przecieków na sprawność izentalpową procesu sprężania w maszynie spiralnej poprzez sprawdzenie wpływu pola przepływu w komorze roboczej na realizację przemiany termodynamicznej. Zastosowanymi w symulacjach czynnikami były suche powietrze i dwutlenek węgla. Na ścianach maszyny założono warunek adiabatyczny. Uzyskane wyniki porównano z wynikami obliczeń bazujących na parametrach zredukowanych. Natężenie przecieków obliczone za pomocą modelu przepływu izentropowego miało lepszą zgodność z wynikami CFD od modelu Fanno. Rezultaty pokazały rosnący strumień przecieków wraz ze wzrostem ciśnienia tłoczenia. Wyznaczono również pole temperatury wewnątrz komory. Wyniki przeprowadzonych symulacji pokazały, że najbardziej efektywne pod względem energetycznym jest wykorzystywanie sprężarki spiralnej na ciśnienie projektowe, określone geometrią łopatek.

W kolejnych symulacjach analizie poddano odbiór ciepła od gazu roboczego dla trzech wariantów pracy sprężarki. Na ścianach bocznych łopatek sprężarki zastosowano warunek brzegowy stałej temperatury. Wyznaczono chwilową liczbę Nusselta dla komory roboczej sprężarki obliczoną na podstawie wyników numerycznych oraz wartości wynikających ze wzoru Dittusa-Boeltera. Rozbieżności pomiędzy wynikami uzyskanymi za pomocą różnych formuł miały charakter systematyczny. Pozwoliło to Doktorantowi na zaproponowanie poprawki, którą należy wprowadzić do wzoru analitycznego w przypadku dużych strumieni masy przecieków wzdłużnych, aby uzyskać zgodność wyników otrzymanych z modelowania numerycznego i ze wzorów analitycznych. Po przeprowadzeniu obliczeń

z zastosowaniem zaproponowanej poprawki uzyskano lepszą zgodność w uzyskanych obciążeniach metodami wyników.

Rozdział 4 poświęcony został weryfikacji eksperymentalnej przeprowadzonego modelowania numerycznego. W celu przeprowadzenia pomiarów cieplnych, stwierdzenia poprawności wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła w komorze roboczej maszyny spiralnej oraz sprawdzenia zasadności wykorzystania modelu turbulencji SST w przeprowadzonym modelowaniu, zbudowano stanowisko badawcze, które następnie zostało zamodelowane numerycznie wykorzystując ten sam model i narzędzia, które zostały użyte w symulacjach sprężarki spiralnej. Wyniki eksperymentu były zgodne ilościowo z wartościami z symulacji zarówno w przypadku gęstości strumienia ciepła przejmowanego przez ściany cylindra, jak również temperatury przy jego dnie.

Ostatni rozdział (Rozdział 5) zawiera formalne podsumowanie pracy, osiągnięcia celów i dowiedzenia tezy pracy.

6. Ocena pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi interesującą pracę o dobrym poziomie merytorycznym i dużym znaczeniu w kontekście poszerzenia wiedzy na temat możliwości poprawy sprawności izotermicznej maszyn spiralnych.

6.1 Główne osiągnięcia Autora

Z ważniejszych osiągnięć Autora warto wskazać:

- Podjęcie trudnej próby zdefiniowania wpływu wybranych zjawisk przepływowo-cieplnych na intensywność wymiany ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym a łopatkami w maszynach spiralnych. W mojej ocenie Autor w pełni wywiązał się z podjętego, określonego celem i tezą zadania. Wyczerpująco zrealizował założony zakres prac, wykonując rewizję dotychczasowych zasad wyznaczania współczynnika wnikania ciepła poprzez modelowanie numeryczne oraz przeprowadzając weryfikację eksperymentalną założeń modelu z zastosowaniem pośredniej metody badawczej. Dzięki identyfikacji kluczowych czynników wpływających na współczynnik wnikania ciepła możliwe było poszerzenie wiedzy na temat możliwości poprawy sprawności izotermicznej maszyn spiralnych.
- Opracowanie własnego modelu numerycznego wykorzystującego metodę elementów skończonych, uwzględniającego zmienne warunki brzegowe, odwzorowujące zmianę kształtu komór roboczych w maszynie spiralnej, poprzez transformacje domeny obliczeniowej w czasie. Opracowany model zaimplementowany został do pakietu ANSYS-CFX oraz ICEM CFD, a jego

wykorzystanie wymaga zastosowania skomplikowanej procedury omówionej w recenzowanej pracy.

- Zaproponowanie współczynnika korekcyjnego do formuły na analityczne wyznaczenie liczby Nusselta, pozwalającego na zmniejszenie rozbieżności pomiędzy wynikami numerycznymi i opartymi o parametry zredukowane.
- Wykazanie istnienia zależności pomiędzy wewnętrznym polem przepływu czynnika roboczego w komorze roboczej maszyny spiralnej, przeciekami wzdłużnymi pomiędzy komorami i warunkami wymiany ciepła.
- Opracowanie koncepcji, wykonanie i wykorzystanie do pomiarów cieplnych stanowiska badawczego z zastępczą komorą roboczą, pozwalającego na weryfikację opracowanego modelu numerycznego i walidację poczynionych dla niego założeń.

6.2 Uwagi krytyczne

Praca przygotowana została prawidłowo, cel i teza pracy są jasne, tok prac zmierzających do ich udowodnienia są czytelne i prawidłowe, jednakże w trakcie szczegółowej lektury rozprawy doktorskiej można znaleźć elementy mogące wymagać dodatkowego wyjaśnienia lub dyskusji. Poniższe uwagi krytyczne nie umniejszają mojej dobrej oceny merytorycznej oceny rozprawy.

- W pracy Autor zaproponował współczynnik korekcyjny do formuły na analityczne wyznaczenie liczby Nusselta oraz przedstawił wyniki obliczeń przy jego zastosowaniu. Propozycja w/w współczynnika korekcyjnego stanowi jedno z osiągnięć Doktoranta. W moim odczuciu ta kwestia została jednak zbyt pobieżnie potraktowana w recenzowanej pracy doktorskiej i powinna zostać lepiej opisana. Sugeruje się również, w celu lepszego pokazania sposobu zastosowania w/w współczynnika, przeprowadzenie i pokazanie całego toku obliczeń dla wybranego punktu, tzn. wyznaczenie liczby Nusselta bez zastosowania współczynnika korekcyjnego, wyznaczenie liczby Nusselta z zastosowaniem współczynnika korekcyjnego oraz zestawienie wyników w formie tabeli, z uwzględnieniem wyników uzyskanych z modelowania CFD.
- W pracy Autor opisuje metodykę generowania siatki numerycznej oraz podaje, że około 80% siatki było o jakości powyżej 0.95. Siatka numeryczna powinna spełniać wymagane kryteria jakości. Jakość siatki oceniana jest przez solver programu ANSYS-CFX według trzech kryteriów: minimalny kąt ortogonalności, maksymalny współczynnik proporcji oraz maksymalny współczynnik ekspansji siatki. Sugeruje się uzupełnienie niniejszej pracy o informacje zawierające parametry siatki, takie jak: rozmiar minimalny elementu, rozmiar maksymalny elementu, liczba elementów, minimalny kąt ortogonalny, maksymalny współczynnik ekspansji siatki, maksymalny współczynnik proporcjonalności. Wymienione dane można zestawić w formie tabelarycznej.

- W pracy Autor podaje informację, że obliczona dla użytej siatki numerycznej wartość parametru y^+ była zawsze mniejsza od 40. W pobliżu powierzchni ścianki można wyróżnić trzy podwarstwy: podwarstwa laminarna, dla której $0 \leq y^+ \leq 5$, podwarstwa buforowa, dla której $5 \leq y^+ \leq 30$ oraz podwarstwa burzliwa, dla której $30 \leq y^+$. W podwarstwie burzliwej górna granica parametru y^+ zależy od liczby Reynoldsa. Sugeruje się zatem odniesienie podanej wartości parametru y^+ do liczby Reynoldsa dla badanego zagadnienia.
- W modelowaniu numerycznym Autor zastosował model turbulencji *SST*. W pracy pojawia się jedynie informacja, że w cytowanej literaturze stosowany w obliczeniach był model *k- ω SST*, w którym przepływ w warstwie przyściennej i przez szczeliny obliczany jest za pomocą modelu *k- ω* . W mojej ocenie wątek wyboru modelu turbulencji należałoby rozwinąć, ponieważ ma on duży wpływ na uzyskiwane wyniki symulacji. Uzasadniając wybór modelu *SST* do symulacji należałoby uwzględnić jego krótką charakterystykę.

6.3 Uwagi edytorskie

Poniższe uwagi natury edytorsko-redakcyjnej nie mają żadnego negatywnego wpływu na wartość merytoryczną ocenianej pracy doktorskiej. Wskazanie tych uwag ma za zadanie pomóc w doskonaleniu warsztatu i może być przydatne w dalszej pracy naukowej Doktoranta przy pisaniu i redagowaniu publikacji.

- Brak streszczenia pracy w języku angielskim
- Praca doktorska napisana jest w języku polskim. Sugeruje się ujednoczyć opisy na rysunkach i zamieścić je w języku polskim
- Sugeruje się wprowadzić wykaz indeksów
- Należy uzupełnić wykaz ważniejszych oznaczeń. Brakujące oznaczenia: r_b , h_p (rys. 1.4), l_p (rys. 1.4), D_h , r , m , St , t , U_j , W_j , P , μ , Γ , R
- Należy uporządkować literaturę, albo w kolejności cytowania w tekście, albo w kolejności alfabetycznej
- Jakość rysunku 1.2 jest słaba
- Strona 11: zmienić fragment zdania:
jest: „Ze względu na charakter pracy, maszyny są one niewrażliwe na obecność fazy ciekłej.”
sugeruje się zmianę na: Ze względu na charakter pracy, maszyny rotacyjne są niewrażliwe na obecność fazy ciekłej.
- Strona 12, linijka nr 1:
jest: „... nie przekraczając...”
sugeruje się zmianę na: nie przekraczają

- Strona 12, linijka nr 11:
jest: „... producentem...”
powinno być: ... producentami ...
- Strona 12, linijka nr 21:
jest: „... co utrudnia poprawne uszczelnienie komór roboczych i zużycie mechaniczne łopatek...”
powinno być: „... co utrudnia poprawne uszczelnienie komór roboczych i powoduje zużycie mechaniczne łopatek...”
- Strona 24: w opisie oznaczeń pod wzorem brak jest kropek na „m” w oznaczeniach strumieni masy wpływających do i wypływających z komory.
- Strona 25: we wzorze 1.11 pojawia się parametr „a”. Należy wyjaśnić co ten parametr oznacza.
- Strona 26, 4 linijka: współczynnik korekcyjny oznaczony jest ψ . We wzorze 1.11 współczynnik korekcyjny oznaczony jest Ψ . Należy ujednoczyć oznaczenia.
- Strona 27, wzór 1.16: objaśnić oznaczenie NU_{DB}
- Strona 40, linijka nr 7 :
jest: „Wyraźnie widoczna cykliczność charakterystyki błędów względnych.”
powinno być: Wyraźnie widoczna jest cykliczność charakterystyki błędów względnych.
- Rysunek 3.7 – brak powołania na ten rysunek w tekście pracy doktorskiej (brak jego opisu).
- Strona 46, 2 linijka:
jest: „... dalsze zwiększanie rozmiaru siatki numerycznej przynosi minimalną poprawę wyników.”
sugeruje się zmianę na: ... dalsze zwiększanie ilości węzłów w siatce numerycznej przynosi minimalną poprawę wyników.”
- Strona 46, 4 linijka
jest: „... wynosił w tym przypadku około 40 godzin.”
powinno być: ... wynosił w tym przypadku około 40 godzin.
- Strona 59, 3 linijka
jest: „... wynikające ze wzoru...”
powinno być: ... wynikających ze wzoru...
- Strona 62, 2 linijka
jest: „...póle...”
powinno być: pól
- strona 76, 4 linijka od dołu:
jest: „... od 6 i 90°C.”
powinno być: ... od 6 do 90 °C.
- strona 79 i 80, tytuł rysunku:

jest: „Gęstość strumienia wnikania ciepła od”

powinno być: Gęstość strumienia ciepła przekazywanego od ...

7. Wniosek końcowy

Oceniana rozprawa doktorska, mimo zauważonych usterek, może być uznana za oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje odpowiednią wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie naukowej mechanika i budowa maszyn oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Uważam, że podjęta przez Doktoranta tematyka badawcza jest trudna, ale ważna i istotna, przede wszystkim ze względu na powszechność stosowania maszyn spiralnych. Uzyskane przez Niego wyniki badań, potwierdzone eksperymentem mają w moim przekonaniu dużą wartość merytoryczną.

Reasumując, uważam, że **praca doktorska mgr inż. Józefa Raka w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim** określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku wraz z późniejszymi zmianami i **stawiam wniosek o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.**

.....
