

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Błasiaka

„Wpływ zmiennych warunków ruchu płynu w pobliżu ścianki na wymianę ciepła”

Opinia została opracowana na zlecenie dziekana Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej pismo nr W9/PW/1366/2015 z dnia 03.11.2015

Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Zbigniew Gnutek.

I. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 145 stron. Praca składa się z następujących części: wykazu ważniejszych oznaczeń, wstępu, wprowadzenia do zagadnienia, przeglądu literatury (rozdziały 1–2), sformułowanie tezy, celów i zakresu pracy, właściwych rozdziałów pracy doktorskiej (rozdziały 4–6), wniosków końcowych, wykazu literatury. Zawartość poszczególnych rozdziałów obejmuje:

1. **Wstęp**, w którym Autor ogólnie zasygnalizował potrzebę stosowania intensyfikacji wymiany ciepła. Poprawa wymiany ciepła pozwoli zmniejszyć rozmiary wymienników oraz zwiększyć sprawność urządzeń i prowadzonych procesów. Autor zauważa, że pomimo wielu prowadzonych w tym zakresie badań, stan wiedzy jest nadal niewystarczający.
2. **Wprowadzenie do zagadnienia**. Rozdział ten podzielony został na trzy podrozdziały, w których Doktorant wprowadza czytelnika w zagadnienia mechanicznego wspomaganie wymiany ciepła. Tematyką, na którą zwrócił tu szczególną uwagę jest zrywanie, usuwanie, skrobanie i zdzieranie termicznej warstwy przyściennej.
3. **Przegląd literatury**. Autor wykonał tu obszerny przegląd stanu badań podzielony na dwa podrozdziały. Pierwszy podrozdział poświęca przeglądowi badań w nieco już historycznym aspekcie, ponieważ kończą się one na roku 1980. W okresie tym, analizowane zagadnienia dotyczyły ogólnie wymiany ciepła w aparatach typu mieszalnikowego, w których czynnikami roboczymi były woda, oleje, parafiny, smary i czekolada (generalnie były to ciecze o wysokiej lepkości i gęstości). Podrozdział drugi opisuje stan badań po 1980 i dotyczy głównie wymienników typu skrobakowego, ponieważ były one wiodącym tematem prac badawczych. Rozwój technik komputerowych, jaki miał miejsce w latach 80. i 90. przyczynił się do wzbogacenia prowadzonych prac badawczych o nowoczesne analizy numeryczne.
4. **Sformułowanie tezy, celów i zakresu pracy**.
W rozdziale tym Autor definiuje tezę pracy, a następnie w podpunktach określa listę celów naukowych pracy i jej zakres.

5. **Obliczenia numeryczne.** Rozdział ten opisuje modelowanie numeryczne procesów zrywania warstwy przyściennej rozpatrywane w dwóch stopniach trudności. W pierwszej części jest to analiza numeryczna oparta na siatce 2D, w drugiej części na siatce 3D.
6. **Stanowisko badawcze.** W rozdziale tym Autor opisał stanowisko badawcze, na jakim prowadził badania, których celem było walidacja wykonanych wcześniej obliczeń numerycznych. Opisano sposób wykonania stanowiska, sposób wykonywania pomiaru wybranych parametrów cieplno-przepływowych, analizę błędów pomiarowych.
7. **Wyniki badań doświadczalnych.** W rozdziale tym zestawiono otrzymane wyniki obliczeń i badań doświadczalnych. Zestawienie to jest wykonywane odrębnie dla zakresu przepływu turbulentnego oraz zakresu przepływu laminarnego.
8. **Podsumowanie i wnioski.** W rozdziale tym Autor przedstawił w 8 podpunktach podsumowanie poprzednich etapów prac a następnie wyprowadza 4 syntetyczne wnioski.
9. **Spis literatury** zawierający 120 pozycji literatury, obejmujący zarówno pozycje klasyczne, jak również najnowsze publikacje, głównie z renomowanych czasopism międzynarodowych z tematyki wymiany ciepła, z czego:
 - 63 cytowane opracowania pochodzą z ostatnich 15 lat,
 - 48 cytowane opracowania pochodzą z ostatnich 10 lat,
 - 27 cytowane opracowania pochodzą z ostatnich 5 lat.Autor cytuje także 7 własnych publikacji, z czego jedną z renomowanego czasopisma *Heat and Mass Transfer* (Springer, pismo z listy LF o IF wynoszącym 0,946).

II. teza, cele i zakres rozprawy

Doktorant sformułował tezę pracy:

„Podczas mechanicznego wspomagania wymiany ciepła w warunkach przepływu turbulentnego, wielkość szczeliny pomiędzy elementem ruchomym zaburzającym przepływ a powierzchnią wymiany ciepła nie wpływa znacząco na wartość przekazywanego strumienia ciepła. W zakresie laminarnym wpływ wielkości szczeliny nie może być pominięty i z tego powodu model matematyczny oparty na teorii penetracji nie powinien być stosowany.”

Cele pracy określono następująco:

1. Głębsze poznanie fizyki zjawiska zrywania i odbudowywania warstwy przyściennej zachodzącego w wyniku jej mechanicznego zaburzenia.
2. Określenie wpływu prędkości obrotowej łopatek zaburzających przepływ, wielkości szczeliny pomiędzy końcem łopatki a ścianą oraz rodzaju gazu (jedno-, dwu, wieloatomowego) na wymianę ciepła.
3. Opracowanie metody badawczej i eksperymentalne wyznaczenie współczynników wnikania ciepła w warunkach periodycznego zaburzania ruchu płynu w pobliżu ścianki.
4. Rozwinięcie i opracowanie modelu numerycznego pozwalającego wyliczyć współczynnik wnikania ciepła w warunkach mechanicznego usuwania warstwy przyściennej.
5. Określenie jaką intensyfikację wymiany ciepła można osiągnąć przy wykorzystaniu techniki mechanicznego zaburzania termicznej warstwy przyściennej dla płynów o liczbie $Pr < 1$ w przypadku braku przepływu osiowego.

Zakres rozprawy został określony jako:

1. Usystematyzowanie obecnego stanu wiedzy na temat intensyfikacji (wymiany) ciepła za pomocą mechanicznego zaburzania termicznej warstwy przyściennej.
2. Modelowanie numeryczne wymiany ciepła podczas periodycznego zaburzania termicznej warstwy przyściennej
3. Zaprojektowanie i zbudowanie stanowiska badawczego służącego do wyznaczania współczynnika wnikania ciepła w warunkach periodycznego usuwania termicznej warstwy przyściennej.
4. Zaplanowanie i przeprowadzenie badań eksperymentalnych na stanowisku badawczym. Zbadanie wpływu: prędkości obrotowej, wielkości szczeliny pomiędzy końcem ostrza łopatki a ścianką, oraz rodzaju czynnika roboczego na wymianę ciepła.
5. Opracowanie wyników w formie wykresów i tabel.

Cel oraz zakres rozprawy zostały sformułowane na podstawie dotychczasowego stanu wiedzy opisanego w rozdziałach 2 i 3. W dostępnej literaturze brak jest głębszych analiz zjawisk zachodzących w okolicy krawędzi łopatek zgarniających, wobec których Autor ma nadzieję na pozyskanie nowego materiału badawczego. Można więc uznać, że cele i zakres pracy w pełni odpowiadają sformułowanej tezie pracy.

III. Treść rozprawy

Wstęp

We wstępie Autor ogólnie zasygnalizował potrzebę intensyfikacji wymiany ciepła. Poprawa wymiany ciepła pozwala zmniejszyć rozmiary wymienników oraz zwiększyć sprawność urządzeń lub prowadzonych procesów. Autor zauważa, że „*zjawisko zaburzania warstwy przyściennej jest powszechne i ma szerokie zastosowanie, ale mimo to nadal nie jest dobrze opisane i poznane*”. Pomimo wielu prowadzonych w tym zakresie badań, stan wiedzy jest nadal niewystarczający. W dużym skrócie autor sygnalizuje tu czytelnikowi, jaki zakres badań zostanie opisany w dalszej części pracy.

Rozdział 1. Wprowadzenie do zagadnienia.

Rozdział ten, podzielony został na trzy podrozdziały, w których Doktorant kolejno wprowadza czytelnika w zagadnienia mechanicznego wspomaganie wymiany ciepła. Potrzeba takiego wspomaganie zachodzi głównie dla cieczy silnie lepkich. Tematyką, na którą zwrócił tu uwagę autor w jednej ze swoich wczesnych publikacji konferencyjnych jest zrywanie, usuwanie, skrobanie i zdzieranie termicznej warstwy przyściennej. W podrozdziale drugim przedstawione zostały trzy podstawowe model matematyczne opisane w literaturze przedmiotu: teoria cienkiego filmu opisana przez Kerna i Karnakasa, teoria penetracji opisana przez Koola, Latinena i Harriota, teoria penetracji cienkiego filmu opisana przez Penney i Bella. Każda z opisanych teorii opisuje pewien obszar zjawisk i jest adekwatna dla wybranego zakresu parametrów, zależnie od wartości Pr , Re , relacji grubości szczeliny do średnicy cylindra. W trzecim podrozdziale Autor opisał sposób pomiaru gęstości strumienia ciepła za pomocą stosu termopar. Pomiar ten zostanie wykorzystany w dalszej części pracy i posłuży do wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła w badanych procesach wymiany ciepła.

Rozdział 2. Przegląd literatury.

Autor wykonał tu stosunkowo obszerny przegląd stanu badań podzielony na dwa okresy czasowe. Pierwszy podrozdział autor poświęca przeglądowi badań w nieco już historycznym aspekcie, ponieważ kończą się ona na roku 1980. W okresie tym, analizowane zagadnienia dotyczyły ogólnie wymiany ciepła w aparatach typu mieszalnikowego, w których czynnikami roboczymi były woda, oleje, parafiny, smary i czekolada (ogólnie były to ciecze o wysokiej lepkości i gęstości). Stosowane ówczesnie skrobaki zachowywały relatywnie duży odstęp od ścianek cylindra, dlatego jednym z tematów badań był wpływ grubości szczeliny i prędkości obrotowej na intensyfikację procesów wymiany ciepła. W wyniku prowadzonych prac, jako jeden z bardziej uniwersalnych wzorów kryterialnych wskazywano wykładniczą zależność kryterialną liczby Nu od liczby Re i Pr oraz prędkości obrotowej n . W wyniku analizy badań z tego okresu, wskazano, że teoria stałego filmu oraz teoria penetracji opisują dwa skrajne przypadki, jakie zależą od struktury przepływu (laminarnej lub turbulentnej), która zależy głównie od lepkości płynu. W podrozdziale tym łącznie zacytowano 22 prace badawcze merytorycznie istotne dla tematu rozprawy i uzupełniająco przywołano także 28 prac dodatkowych.

Podrozdział drugi opisuje stan badań po 1980 r i dotyczy on głównie wymienników typu skrobakowego, ponieważ były one wiodącym tematem prac badawczych. Rozwój technik komputerowych, jaki miał miejsce w latach 80. i 90. przyczynił się do wzbogacenia prowadzonych prac badawczych o analizy numeryczne. Analizy takie prowadzono dla najróżniejszych konstrukcji, wśród których były zarówno proste skrobaki jak i skrobaki wykonujące złożone ruchy posuwisto-zwrotne. W podrozdziale tym łącznie zacytowano 31 prac badawcze merytorycznie istotnych dla tematu rozprawy.

W podrozdziale trzecim Doktorant wysnuł wnioski z wykonanego przeglądu literatury. Zauważył, że mechaniczne zaburzenie warstwy przyściennej jest podstawowym zjawiskiem występującym w wymiennikach skrobakowych. Pomimo, że przeprowadzono wiele badań mających na celu optymalizację tych procesów to nie wyjaśniono ostatecznie fizyki zachodzących zjawisk. Autor zauważa, że na intensyfikację wymiany ciepła większy wpływ ma prędkość obrotowa skrobaka niż przepływ strumienia masy przez wymiennik. Podobnie, intensyfikacja rośnie wraz ze wzrostem lepkości płynu, choć wrasta również wtedy moc potrzebna do napędu skrobaków. Zauważa także, że najpowszechniej stosowanym modelem matematycznym jest model Koola, Latinena i Harriota oparty na modelu penetracji, który nie uwzględnia wpływu szczeliny. Pomimo dużej liczby opisanych badań korelacji, otrzymywane wyniki mogą się od siebie różnić nawet o jeden rząd. Pokazuje to, że nie opisują one jeszcze dobrze wszystkich zachodzących zjawisk. Autor zwraca tu również uwagę na to, że stosunkowo mało badań poświęcono do tej pory zjawiskom zachodzącym w okolicy łopatki rotora, gdzie występują największe gradienty prędkości, temperatury i naprężeń ścinających.

Rozdział 3. Sformułowanie tezy, celów i zakresu pracy.

Treść tego rozdziału opisano już wcześniej w punkcie *II. teza, cele i zakres rozprawy*

Rozdział 4. Obliczenia numeryczne

W rozdziale tym Autor opisuje zagadnienia modelowania numerycznego procesów zrywania warstwy przyściennej. Zagadnienia te rozpatruje w dwóch stopniach trudności, najpierw w postaci analiz opartych na siatce 2D, następnie przechodzi do analiz na siatce 3D.

Analizy oparte na modelu 2D Autor postanawia oprzeć na wymienniku skrobakowym, w postaci stacjonarnego cylindra i obrotowego wału z czterema łopatkami zamocowanymi co 90° , przy czym ciepło w tym układzie dostarczane jest z wnętrza wału. Model matematyczny oparto na równaniach ciągłości, momentu pędu i równania energii. Obliczenia prowadzono dla parametrów bezwymiarowych liczby Reynoldsa adekwatnej dla mieszania, liczby Grashofa i liczby Prandtla. Do modelowania numerycznego wykorzystano komercyjne oprogramowanie ANSYS CFX. Siatka do analiz składała się z ok. 10,5 mln elementów prostokątnych, rozmieszczonych równomiernie z zagęszczeniem w pobliżu ostrza łopatki, gdzie spodziewano się intensyfikacji wielu zjawisk. Weryfikację poprawności opracowanego modelu numerycznego wykonano dla wymiany ciepła pomiędzy dwoma współosiowymi cylindrami, z których wewnętrzny jest ogrzewany i nieruchomy, zewnętrzny zaś ruchomy i chłodzony. Obliczenia przeprowadzono dla $Pr=0,7$ i $Ra=5000$. Przeanalizowano cztery przypadki dla liczb Re równych 20, 50, 100, 200 po czym wyniki obliczeń porównano z wynikami prac opublikowanymi w 1998 przez jednego z badaczy. Porównanie to pokazało, że zastosowany sposób modelowania daje bardzo podobne wyniki, co jak oceniono świadczy o poprawności tego modelu numerycznego. Analizując wnioski Autor zauważa, że dla małych wartości względnych szczelin od $0,005D$ do $0,025D$ widoczne jest silne zaburzenie warstwy przyściennej wywołane obecnością skrobaka. Pojawia się także strefa recyrkulacji, silnie widoczna dla najmniejszej rozpatrywanej szczeliny równej $0,005D$. Zauważalne jest, że strefa stagnacji rośnie wraz ze wzrostem grubości szczeliny. Autor obrazuje tu zjawiska prezentując liczne wykresy rozkładu prędkości w okolicy łopatki, mapy barwne ciśnienia i temperatury, wykresy liczby Nu w zależności od wielkości szczeliny. Obserwując te zależności Autor rozważa zastosowanie wykładniczego równania kryterialnego $Nu(Re, Pr, \delta/D)$ w analogii do równania znanego z prac Penney i Bella. Wyznacza wartość wykładnika dla elementu δ/D za pomocą metody najmniejszych kwadratów. Rozdział dotyczący modelowania 2D kończy się 11 syntetycznymi wnioskami opartymi na wynikach wykonanych obliczeń numerycznych.

Analizy w modelu 3D Autor postanawia oprzeć na wymienniku skrobakowym, w postaci stacjonarnego cylindra i obrotowego wału z dwoma łopatkami zamocowanymi co 180° . Ciepło w tym układzie dostarczane jest z wnętrza zbiornika a odbierane jest na pobocznicę walca (przy czym opisane parametry geometryczne odpowiadają parametrom późniejszego stanowiska doświadczalnego, zbudowanego przez Autora). Do modelu matematycznego dodano człon uwzględniający siły grawitacji, co było niezbędne z powodu składowej oddziaływania sił grawitacji ułożonej podłużnie do osi rozpatrywanego walca. Zastosowano ok. 1 mln elementów siatki tetragonalnej, w której elementy zagęszczono w pobliżu łopatek skrobaka oraz grzałki. Autor szczegółowo opisuje metody, które wykorzystano do modelowania ruchu łopatek: MRF oraz Sliding Mesh, do których sformułowano informacje uzupełniające. Obliczenia wykonano w komercyjnym programie ANSYS CFX dla wartości względnych szczelin od $0,005D$ do $0,1D$. Wyniki przedstawiono graficznie w postaci rozkładu prędkości centralnie w płaszczyźnie połowy wysokości cylindra i zarazem w płaszczyźnie uchwytu mocowania łopatek. Autor zauważa, że dla szczeliny równej $0,1D$ występuje nietypowa sytuacja, kiedy to największe wartości współczynnika wnikania ciepła mają miejsce w dużej odległości za krawędzią łopatki. Strefa recyrkulacji, podobnie jak w modelu 2D jest silnie widoczna dla najmniejszej rozpatrywanej szczeliny równej $0,005D$. Najwyższe wartości temperatury i współczynników wnikania ciepła występują za łopatką. Dwudziestokrotne zmniejszenie wielkości szczeliny przyniosło w obliczeniach ponad dwukrotną intensyfikację wymiany ciepła. Rozdział dotyczący modelowania 3D kończy się 6 syntetycznymi wnioskami bazującymi na wynikach obliczeń numerycznych.

Rozdział 5. Stanowisko badawcze

W rozdziale tym Autor opisał stanowisko badawcze, na którym prowadził będzie następnie badania doświadczalne. Celem badań była m.in. walidacja wykonanych wcześniej obliczeń numerycznych opisanych w dziale modelowania opartego na siatce 3D. Przedstawiono rysunek złożeniowy stanowiska oraz liczne zdjęcia samych podzespołów jak i całego stanowiska. Autor założył, że stanowisko badawcze powinno uwzględniać możliwość zadawania odpowiedniej prędkości obrotowej łopatek, liczby Prandtla, wielkości szczeliny, kształtu ostrza i ciśnienia w cylindrze, stosowania różnego czynnika roboczego. Przestrzeń badawczą utworzył pusty cylinder o średnicy wewnętrznej 140 i wysokości 80 mm. W górnej części cylindra zamocowana była rurkowa grzałka elektryczna służąca do podgrzewania gazu, natomiast pobocznica cylindra była chłodzona płaszczem wodnym. Wewnątrz cylindra obracał się wał, do którego zamocowano dwie łopatki zgarniające ustawione względem siebie co 180° . Możliwy zakres regulacji szczelin wynosił od 0 do $0,1D$. W celu zachowania szczelności zbiornika, moment obrotowy przekazywany był na wał poprzez sprzęgło magnetyczne. Pomiar współczynnika wnikania ciepła autor wykonywał pośrednio poprzez wyliczenia go z gęstości strumienia ciepła na pobocznicy walca oraz różnicy temperatur gazu i powierzchni wewnętrznej ścianki. Do pomiaru temperatur zastosowano trzy termopary typu K zamocowane w otworach nawierconych od zewnątrz pobocznicy płaszcza. W celu polepszenia wymiany ciepła oraz zachowania szczelności względem wody chłodzącej wklejono je w te otwory masą zawierającą pył miedziany. Pomiar gęstości strumienia ciepła wykonywano jednym czujnikiem cienkowarstwowym firmy Omega typu HFS-4 zaklejonym masą silikonową z celu zachowania szczelności wobec wody. Całość płaszcza stanowiska pomiarowego zaizolowano cieplnie wełną mineralną, aby zminimalizować wpływ otoczenia.

Badanie prowadzono odrębnie dla $Re > 10000$ (warunki turbulენტne) i dla $Re = 1100$ (warunki laminarne). Dla pierwszego przypadku badań, eksperymenty dotyczyły zestawu szczelin: 0,7-3,5-7-14 mm przy stałej mocy grzałki 100 W i przepływie wody chłodzącej ok. 98 l/h. Dla drugiego przypadku badań, eksperymenty dotyczyły zestawu szczelin: 0,7-3,5-7-14 mm przy stałej mocy grzałki 10 W i przepływie wody chłodzącej ok. 216 l/h.

W ostatni podrozdziale Autor opisał sposób wykonania analizy błędów pomiarowych, dotyczących pomiaru współczynnika wnikania ciepła, prędkości obrotowej, liczby Nusselta oraz liczby Reynoldsa.

Rozdział 6. Wyniki badań doświadczalnych.

W rozdziale tym Autor zestawia otrzymane wyniki obliczeń i badań doświadczalnych odrębnie dla zakresu turbulენტnego i laminarnego.

Zakres turbulენტny

- Dla zakresu warunków turbulენტnych otrzymywane gęstości strumienia ciepła mieściły się w przedziale $500-1700 \text{ W/m}^2$. Zaobserwowano 3-krotną intensyfikację wymiany ciepła, choć jak zauważono literatura branżowa podaje tu wyższe wartości. Autor poddaje tu analizie potencjalne przyczyny tego zjawiska (rodzaj przepływu, kształt łopatek) i wyciąga stosowne wnioski.
- Autor zauważa, że na gęstość strumienia ciepła jest największa dla szczeliny mniejszej niż $0,025D$. Z przedstawionych wykresów wynika, że gęstość wymiany ciepła wzrasta liniowo wraz ze wzrostem prędkości obrotowej skrobaka, przy stosunkowo niedużej zależności od szczeliny. Największe gęstości uzyskiwane są dla szczeliny 0,75 i 3,5 mm,

niezależnie od rodzaju badanego gazu (powietrza, CO₂, argonu), przy czym wartości uzyskiwane dla powietrza okazały się być największe, dla argonu zaś najmniejsze.

- Analizy wartości uzyskiwanych współczynników wnikania ciepła pokazały, że są one stosunkowo mało zależne od rodzaju badanego gazu. Wartości współczynnika zmieniały się w zakresie 12÷45 W/m²K, przy czym na wykresach widoczna jest ich liniowa zależność od prędkości obrotowej. Autor przedstawia tu wyniki jedynie dla prędkości obrotowych 600÷1600 obr/min. Dodatkowo opisuje, że zostały także wykonane pomiary dla prędkości obrotowej 300 obr/min, jednak nie zostały zaprezentowane, ponieważ silnie odstawały od zależności liniowej, co zdaniem Autora wynikało z niepoprawnego pomiaru temperatury gazu w warunkach słabego mieszania warstw o równych temperaturach w okolicy grzałki. Autor wspomina również o potencjalnym wpływie składowej radiacyjnej wymiany ciepła pomiędzy grzałką a pobocznicą walca stanowiska badawczego, jednak nie poddaje tego głębszej analizie. Analizy wartości uzyskiwanych współczynników wnikania ciepła pokazały, że największe wartości uzyskuje się dla najmniejszych wielkości szczeliny w tym przypadku było to 0,7 mm.
- Porównanie otrzymanych doświadczalnie współczynników wnikania ciepła z wynikami obliczeń modelowych za pomocą modeli Kerna-Karakasa, Koola-Latinena-Hariotta i Penny-Bella pokazało, że dla prędkości obrotowych powyżej 500 obr/min, najlepszą zgodność wykazuje model oparty na teorii penetracji autorów Koola-Latinena-Hariotta. Obliczenia wykonane za pomocą obu pozostałych modele dają wartości niezależne od prędkości obrotowej, przy czym są one w większości znacznie mniejsze od zmierzonych doświadczalnie (nawet kilkadziesiąt razy).
- Analizy otrzymywanych wielkości liczby Nusselta w zależności od liczby Reynoldsa dla mieszania pokazały, że dla wszystkich trzech przebadanych gazów układają się one w zależność liniową, różną dla każdego gazu. Autor wykonał tu aproksymacje i wyznaczył współczynniki dla równania kryterialnego $Nu(Re_m, Pr)$ w postaci wykładnikowej. Dodatkowo, wyznaczył też współczynniki równania dla wszystkich trzech badanych gazów jednocześnie zestawiając wcześniej otrzymane wyniki badań doświadczalnych. Na koniec Autor zestawił tak otrzymaną zależność liniową z wynikami sześciu innych prac badawczych pochodzących z lat 1930-1971.

Zakres laminarny

- Dla zakresu warunków laminarnych otrzymywane gęstości strumienia ciepła mieściły się w zakresie 70-100 W/m². Zgodnie z przewidywaniami, zaobserwowano odwrotną zależność gęstości strumienia ciepła od wielkości szczeliny. Podobną obserwację zauważono dla relacji liczby Nusselta w zależności od względnej wielkości szczeliny δ/D .
- Autor porównuje tu otrzymane wyniki z obliczeniami wykonanymi we własnych analizach numerycznych 3D oraz za pomocą modeli Koola-Latinena-Hariotta i Penny-Bella. Zauważa tu dużą zgodność wyników z własnymi analizami numerycznymi w modelu 3D. Zauważa także, że model autorów Penny-Bell osiąga dobrą zgodność dla szczelin większych od 0,025D.

Rozdział 7. Wnioski

W rozdziale tym Autor przedstawia najpierw w 8 podpunktach podsumowanie poprzednich etapów prac a następnie wyprowadzono 4 syntetyczne wnioski. W podsumowaniu opisuje:

- objaśnienie idei mechanicznego wspomaganie wymiany ciepła,
- wykonanie przeglądu publikacji dostępnych w literaturze branżowej,
- wykonanie analiz numerycznych wymiany ciepła w modelu opartym na siatce 2D,
- wykonanie analiz numerycznych wymiany ciepła w modelu opartym na siatce 3D,
- zbudowanie od podstaw stanowiska do badań eksperymentalnych,
- wykonanie badań doświadczalnych dla warunków turbulentnych i porównanie otrzymanych wyników ze znanymi modelami obliczeniowymi,
- wykonanie badań doświadczalnych dla warunków laminarnych i porównanie otrzymanych wyników ze znanymi modelami obliczeniowymi.

Autor przedstawia także 4 syntetyczne wnioski końcowe, w skrócie dotyczące:

- dobrej zgodności opracowanego modelu numerycznego 3D z wynikami pomiarów doświadczalnych,
- małej zgodności modelu penetracji z pomiarami doświadczalnymi dla warunków przepływu laminarnego,
- dobrej zgodności modelu numerycznego 3D dla warunków przepływu laminarnego,
- ważności dalszych potencjalnych badań uwzględniających kształt łopatki.

Na podstawie otrzymanych wniosków końcowych Autor ocenił, że postawiona przez niego teza została udowodniona.

IV. Oryginalność rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy wymiany ciepła na wewnętrznej poboczniczy walca w osi którego wykonywany jest ruch łopatek zgarniających. Ich zadaniem jest mechaniczne zrywanie warstwy przyściennej, przez co wymiana ciepła ulega intensyfikacji. Stopień tej intensyfikacji zależy od rodzaju przepływu: turbulentnego lub laminarnego. Dla wariantu przepływu turbulentnego intensyfikacja wymiany ciepła wynika przede wszystkim z prędkości obrotowej ruchu łopatek, w mniejszym zaś stopniu z wielkości szczeliny roboczej pomiędzy łopatką a wewnętrzną ścianką poboczniczy. Dla wariantu przepływu laminarnego intensyfikacja wymiany ciepła wynika przede wszystkim z wielkości szczeliny roboczej.

W przedmiotowej rozprawie proponuje się także uwzględnienie rodzaju gazu, którego wymiana ciepła ulega intensyfikacji (jedno-, dwu-, wieloatomowy). Zrozumienie zjawisk zaburzania warstwy przyściennej gazu zachodzących podczas ruchu obwodowego łopatek oraz umiejętność ich obliczania pozwoliłaby innym badaczom uwzględniać wymianę ciepła zachodzącą w wielu urządzeniach z ruchem obrotowym łopatek jak np. sprężarkach waporowych z wirującym tłokiem, rotacyjnych, spiralnych itp.

Zaprezentowany w rozprawie materiał badawczy wymagał inwencji oraz sporego nakładu pracy i stanowi on oryginalne osiągnięcia naukowe Doktoranta. Przesądza to w mojej ocenie o oryginalności pracy i istotnym wkładzie w rozwój techniki cieplnej. Uzyskany materiał badawczy pozwala na stwierdzenie, że cel oraz zakres recenzowanej rozprawy zostały w pełni zrealizowane.

V. Wartości poznawcze pracy

Jak wspomniano wcześniej, pogłębione zrozumienie zjawisk zaburzania warstwy przyściennej gazu zachodzących podczas ruchu obwodowego łopatek oraz umiejętność ich obliczania umożliwi rozwój nauki i technologii różnych urządzeń stosowanych we współczesnej technice. W szczególności poszerza tu wiedzę na temat zjawisk zachodzących w sprężarkach waporowych z wirującym tłokiem, rotacyjnych, spiralnych itp., w których

zjawiska wymiany ciepła zachodzące na styku pomiędzy sprężanym/rozprężanym gazem wewnętrzną pobocznicą urządzenia jest bardzo słabo opisana we współczesnej literaturze naukowej.

Dla potrzeb poznania specyfiki ruchu płynu i zachodzącej wymiany ciepła Autor zaproponował przeprowadzenie zarówno analiz numerycznych jak i badań doświadczalnych na zbudowanym przez siebie stanowisku badawczym. Umiejętność zintegrowania analiz numerycznych, badań doświadczalnych jak i prac analitycznych dotyczących sformułowania kryterialnych wzorów wymiany ciepła uważam za szczególnie cenne. Zaprezentowane w rozprawie rezultaty wnoszą istotny wkład poznawczy w dziedzinie techniki cieplnej – zwłaszcza w zakresie wymiany ciepła zachodzącej w urządzeniach o ruchu rotacyjnym łopatek.

VI. Wartości użytkowe pracy

Recenzowana rozprawa wnosi wkład poznawczy w zakresie podstawowych zjawisk techniki cieplnej, ma też istotny walor aplikacyjny dla wymiany ciepła zachodzącej w urządzeniach o ruchu rotacyjnym. Uzyskane przez Doktoranta wyniki mogą być w sposób bezpośredni zastosowane w praktyce inżynierskiej do obliczeń cząstkowych procesów cieplnych zachodzących podczas ruchu gazu wewnątrz sprężarek i rozprężarek.

W pracy zaprezentowano zarówno metodykę prowadzenia analiz numerycznych, metodykę prowadzenia badań doświadczalnych, co przyszłym badaczom pozwoli na porównywanie przeprowadzonych przez autora do swoich badań. Zarazem wartość pozytywnego skomentowania jest opublikowanie wyników swoich badań w renomowanym czasopiśmie *Heat and Mass Transfer*, dzięki czemu prace te zostały włączone w światowy obieg wiedzy. Jak na młody wiek badacza jest to spore osiągnięcie.

Zbudowane przez Doktoranta stanowisko badawcze jest dobrej jakości co należy podkreślić tym bardziej, że jest to jego pierwsze stanowisko badawcze. Stanowisko to umożliwi mu prowadzenie dalszych prac badawczych np. dla zapowiedzianych innych kształtów skrobaków lub innych substancji (np. cieczy). Połączenie umiejętności samodzielnej budowy stanowisk badawczych oraz umiejętności opracowywania publikacji naukowych na światowym poziomie bardzo dobrze rokuje przyszłej pracy badawczej Autora.

VII. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

VII.1. Uwagi o charakterze merytorycznym

W rozprawie zaprezentowano oryginalne oraz kompleksowe ujęcie zagadnienia. Zaprezentowany przez Doktoranta materiał dotyczący poznania specyfiki ruchu płynu i zachodzącej wymiany ciepła poprzez przeprowadzenie zarówno analiz numerycznych jak i badań doświadczalnych na zbudowanym przez siebie stanowisku badawczym jest główną osią dorobku naukowego Autora. Umiejętność zintegrowania analiz numerycznych, badań doświadczalnych jak i prac analitycznych w zakresie sformułowania kryterialnych wzorów wymiany ciepła jest jego szczególnym osiągnięciem. Pewne fragmenty pracy wykonanej doktoranta wymagają skomentowania. Poniższe uwagi, mające w dużej mierze charakter komentarzy bądź sugestii - nie umniejszają mojej pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej.

Uwagi ogólne:

1. W rozdziale 4 doktorant opisuje sposób wykonywania analiz numerycznych dla modelu 3D. Opisuje tam szereg rozważanych wielkości szczelin: 0,7-3,5-7,0-14,0 mm, co odpowiada 0,005D-0,025D-0,05D-0,1D średnicy walca pomiarowego. Analogiczne szczeliny stosuje też później w eksperymentach wykonywanych na stanowisku badawczym. Sam sposób doboru szeregu nie wzbudza tu moich zastrzeżeń, tworzą one bowiem szereg iloczynowy o mnożniku 2 czyli szereg 0,7-(1,6)-3,5-7-14 mm, co odpowiadałoby udziałowi 0,005-(0,012)-0,025-0,05-0,1D średnicy walca pomiarowego. Poprawność zastosowania do analiz szeregu iloczynowego potwierdzają wykresy z rozdziału 6 prezentujące gęstość strumienia ciepła w zależności od prędkości obrotowej i wielkości szczeliny. Na wykresach tych pęczki prostych zbliżają się do siebie wraz ze wzrostem wielkości szczeliny. Wyraźnie jednak widać, że na wykresach brakuje analiz dla wartości 1,6 mm (w praktyce mogłoby to być 1,4÷1,7 mm). Autor niestety nie komentuje w tekście pracy przyczyn pominięcia tej jednej wartości w iloczynowym szeregu wielkości szczelin.
2. Grupa poniższych kilku uwag dotyczy stanowiska badawczego. Recenzent jest świadomy tego, że idealne stanowisko badawcze, czyli stanowisko pozbawione jakichkolwiek wad nie istnieje, nie jest bowiem możliwe do zbudowania. Docenia więc dotychczasowy wysiłek Doktoranta, który zapewne posiadał silne ograniczenia czasowe, finansowe a także dopiero uczył się prowadzenia badań eksperymentalnych. Dlatego celem poniższych uwag jest nie tyle krytyka stworzonego stanowiska, co sugestia przyjrzenia się kilku zagadnieniom w dalszych pracach.
 - a) Zarówno w modelowaniu 3D jak i na stanowisku doświadczalnym rotor z mocowaniami skrobaków umieszczono w połowie wysokości walca pomiarowego a więc dokładnie na tej samej wysokości, na jakiej mierzona jest gęstość strumienia ciepła. O ile połowa wysokości wydaje się być najlepszym miejscem dla tego czujnika (najbardziej odległym od dennic) to należy zauważyć, że masywne mocowanie skrobaków może zaburzać ruch płynu a zarazem i przepływ ciepła. W takim razie ściśle rzecz biorąc wyniki badań autora dotyczą nie tyle ruchu samych łopatek, co ruchu łopatek wraz z ich masywnymi mocowaniami. Może to być przyczyną zjawisk obserwowanych przez Autora, kiedy to największe wartości współczynnika wnikania ciepła mają miejsce w dużej odległości za krawędzią łopatki (dla szczeliny równej 0,1D). W tekście pracy doktorant kilka razy opisuje, że zjawiska zaburzania warstwy przyściennej są wyraźnie widoczne dla szczelin mniejszych od 0,025D i wydaje się, że na taką również odległość wystają łopatki (rys. 5.8). Byłoby dobrze, aby Autor skomentował wpływ masywnych mocowań umieszczonych w połowie wysokości walca, ponieważ pozwoliłoby mu to wprowadzić modyfikację sposobu prowadzenia pomiarów i podnieść ich jakość (np. poprzez zmianę położenia mocowania na niższą, wyższą lub poprzez mocowanie dwustronne: dolne i górne).
 - b) W opisie stanowiska badawczego autor opisuje zastosowanie sprzęgła magnetycznego. Uzasadnieniem dla zastosowania tego rodzaju elementu jest jego całkowita szczelność. Mimo wielu zalet sprzęgieł magnetycznych nie można jednak mieć pewności, że prędkość obrotowa wirnika równa jest prędkości obrotowej silnika napędowego. Możliwy jest bowiem poślizg/przeskok sprzęgła, co może się zdarzyć przy jego przeciążeniu - Autor zakłada najwyraźniej, że zastosowane sprzęgło nie ulega poślizgowi. Nie wiadomo jednak czy jest to założenie słuszne, prędkość obrotowa wirnika nie była bowiem zmierzona niezależnym przyrządem. Zagadnienie

- to jest o tyle istotne, że właśnie prędkość obrotowa silnika jest podstawą opracowania głównej części badawczej w 6 rozdziale pracy.
- c) Sposób prowadzenia pomiaru gęstości strumienia ciepła może budzić pewne (choć nie krytycznie ważne) wątpliwości. Autor wspomina w treści pracy o szkodliwym udziale promieniowania padającego na wewnętrzną powierzchnię walca, które zaburza sposób wyznaczania współczynnika konwekcyjnej wymiany ciepła. Zamiast czystej konwekcji autor mierzy więc sumę konwekcyjnej wymiany ciepła wraz z promieniowaniem. Podobnie do udziału składowej radiacyjnej autor nie komentuje udziału składowej przewodzenia ciepła wzdłuż pobocznic walca. Ciepło z wnętrza komory badawczej przekazywane jest zarówno w kierunku pobocznic walca jak i dennic o zbliżonej powierzchni (odpowiednio ok. 0,035 i 0,03 m²). Po zaizolowaniu cieplnym stanowiska większość ciepła przekazywanego do dennic płynie w kierunku pobocznic chłodzonych płaszczem wodnym. W ten sposób temperatura pobocznic podnosi się i zjawisko to nie podlega kontroli za pomocą posiadanej aparatury pomiarowej. Byłoby dobrze, aby Autor skomentował udział przewodzenia, ponieważ pozwoliłoby mu to wprowadzić w przyszłości modyfikację sposobu prowadzenia pomiarów i podnieść ich jakość (poprzez minimalizację zjawiska, jego kompensację albo możliwość obliczenia udziału składowej przewodzenia). Byłoby dobrze, aby Autor skomentował udział promieniowania i przewodzenia, ponieważ pozwoliłoby mu to wprowadzić w przyszłości modyfikację sposobu prowadzenia pomiarów i podnieść ich jakość (poprzez minimalizację zjawiska, jego kompensację albo możliwość obliczenia udziału tej składowej szkodliwej). Warto tu także zastanowić się nad szkodliwym wpływem dodatkowych źródeł ciepła np. łożyska, w którym może wydzielać się ciepło tarcia.
- d) W rozdziale 5.5 Autor wykonuje analizę błędów pomiarowych, jednak nie prowadzi żadnych rozważań dotyczących przyjętej metody pomiarowej. Nie analizuje także, który ze składników aparatury pomiarowej ma największy udział w niedokładności pomiarów. Przykładowo, do pomiaru gęstości strumienia ciepła Autor wykorzystuje czujnik HFS-4, którego stała przetwarzania jest podawana przez producenta ze stosunkowo niewielką precyzją ok 5%. Wykonanie kalibrowania tego czujnika pozwoliłoby badaczowi podniesienie precyzji pomiarów. Podobnej kalibracji warto byłoby poddać także termopary użyte w pomiarach.
3. Na rysunkach 6.1 i 6.2 (lewy dolny dla szczeliny 7 mm) widać wyraźny rozrzut wartości zmierzonych doświadczalnie, które nie układają się w linii prostej, nawet gdyby uwzględnić słupki błędów. Sugeruje to występowanie zjawisk stochastycznych albo wpływ innych zjawisk nieuwzględnionych przez Autora. Niestety nie komentuje on tego zjawiska.

Uwagi drobniejsze:

1. Na wykresach w rozdziale 6 Autor opisuje rodzaj linii użytych dla różnych wielkości szczeliny roboczej. W opisie podaje wartości szczelin stosując zapis anglosaski z kropką zamiast przecinka. Te same wielkości szczelin w tekście opisywane są z przecinkiem w sposób powszechnie przyjęty w polskiej literaturze naukowej.
2. Niepewność pomiaru czasu podczas wyznaczania przepływu wody chłodzącej metodą objętościową jest zaskakująco precyzyjna. Autor deklaruje tu pomiar za pomocą stopera z błędem $\pm 0,01$ s, co jest możliwe przy pomiarach z czujnikami fotooptycznymi ale nie przy obserwacji wzrokowej. Czas reakcji człowieka to około $1/10 \div 1/20$ s, a więc prawie o rząd więcej niż wartość podana przez Autora. Jednak pomiar przepływu strumienia wody

chłodzącej ma dla niniejszej rozprawy doktorskiej znaczenie trzeciorzędne i nie wpływa na jej wartość naukową.

VIII. Uwagi końcowe

Praca napisana jest starannie i generalnie w sposób zrozumiały. Materiał pochodzący z modelowania numerycznego 2D i 3D, jak również materiał pochodzący z badań eksperymentalnych na zbudowanym stanowisku badawczym zawiera dużo szczegółowych informacji. Podane wcześniej uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i powinny być traktowane raczej, jako pomoc w zakresie wykorzystania uzyskanego materiału w dalszej pracy nad zagadnieniami intensyfikacji wymiany ciepła. Uwagi te nie pomniejszają jednak wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy.

IX. Wniosek do Rady Naukowej Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest ciekawą i wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością przedstawienia wybranych zagadnień techniki cieplnej, zdefiniowania problemu badawczego a następnie rozwiązywania go. Zastosowane przez Doktoranta podejście do pracy naukowo-badawczej uważam za właściwe. Praca stanowi w pełni oryginalny wkład do badań w zakresie intensyfikacji wymiany ciepła wywoływanej zrywaniem i odbudowywaniem warstwy przyściennej zachodzącego w wyniku jej mechanicznego zaburzenia. Zakres prac autora obejmuje zarówno modelowanie numeryczne jak i prace eksperymentalne, co pozwala na stwierdzenie, że opanował on dość szeroki zakres umiejętności badawczych. Zaprezentowana w rozprawie analiza stanowi rozwiązanie zadania naukowego i spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

1. Rozprawa doktorska mgr inż. Przemysława Błasiaka spełnia wymagania Art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej: Budowa i eksploatacja maszyn.

Jacek Kasperski
prof. nadzw. PWr
