

prof. dr hab. inż. Tadeusz Bohdal
Politechnika Koszalińska
Wydział Mechaniczny
Katedra Energetyki
ul. Raclawicka 15-17
75-620 Koszalin

Koszalin, 20.05.2021 r.

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Mielcarka nt.:

„Konwekcyjna wymiana ciepła w zbiorniku statku poddanego wymuszeniom okresowym”

Opinia została opracowana na zamówienie zastępcy dyrektora ds. naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych w Gdańsku dr hab. Marcina Lackowskiego – Umowa o dzieło nr 14.04/D/1 z 14 kwietnia 2021 r.

Promotorem recenzowanej pracy jest prof. dr hab. inż. Jarosław Mikieliewicz z Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku.

1. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa obejmuje 198 stron ponumerowanych oraz 14 bez numeracji. Rozprawa została podzielona na osiem rozdziałów. Dodatkowo podano: wykaz najważniejszych symboli, bibliografię, trzy załączniki oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. W treści rozprawy zawarto:

1. **Wstęp i motywację do podjętej tematyki**, gdzie zwrócono uwagę na znaczenie systemu ogrzewania zbiorników w procesie projektowania i operacji jednostek pływających oraz znaczenie konwekcji w bilansie cieplnym zbiorników okrętowych.
2. **Metodę wyznaczania pola prędkości cieczy w zbiorniku statku**. Podano matematyczny opis warunków falowania akwenu, opisano ruch statku na fali, przedstawiono metodę wyznaczania funkcji potencjału prędkości cieczy w zbiorniku oraz wartości prędkości przy poszczególnych ściankach zbiornika.
3. **Opis badań modelowych wymiany ciepła w zbiorniku okrętowym**. Przedstawiono cel badań, opis stanowiska badawczego, jego parametry oraz program i metodykę badań.
4. **Zasady opracowania wyników pomiarów**, w tym sposoby obliczania wielkości charakterystycznych z zarejestrowanych danych pomiarowych, zasady wyznaczania liczb kryterialnych dla badanego zjawiska, sposoby obliczeniowe i wyznaczanie korelacji metodą regresji liniowej, określenie strat ciepła w zbiorniku w ujęciu globalnym, opis wymiany

ciepła pomiędzy źródłem ciepła a ściankami zbiornika w ujęciu globalnym oraz ocenę niepewności wyników badań.

5. **Teoretyczne rozważania konwekcji mieszanej w zbiorniku okrętowym w oparciu o zjawiska proste.** Dokonano przeglądu literatury, opisano semi-empiryczną metodę modelowania złożonych procesów konwekcyjnej wymiany ciepła. Podano warunki zastosowania tej metody do analizy konwekcji mieszanej w zbiorniku okrętowym poddanym oscylacjom.
6. **Wyniki własnych badań eksperymentalnych.** Przedstawiono wyniki badań wymiany ciepła: a) pomiędzy źródłem ciepła a ścianami zbiornika w ujęciu globalnym, b) przez poszczególne ściany zbiornika pozostającego w spoczynku, c) przez poszczególne ściany zbiornika poddanego wymuszeniom, d) z zastosowaniem metody semi-empirycznej.
7. **Dyskusję wyników badań,** dotyczącą bilansu cieplnego zbiornika, wymiany ciepła pomiędzy systemem grzewczym a zbiornikiem w ujęciu globalnym oraz wymiany ciepła pomiędzy cieczą a ściankami zbiornika w spoczynku i poddanego wymuszeniom.
8. **Podsumowanie pracy, gdzie określono** uzyskane rezultaty realizowanej rozprawy.
9. **Bibliografię,** która zawiera 61 pozycji literaturowych krajowych i zagranicznych.
10. **Załączniki** (od A do C w liczbie 3 sztuki), które zawierają: A - zestawienie własności cieplnych materiałów i płynów wykorzystywanych w badaniach, B – przykładowe wykresy charakterystyki odpowiedzi statku na warunki falowania morza, C – tabele, wykresy i rysunki uzupełniające.

2. Cel, zakres i teza pracy

Doktorant podał, że prezentowana rozprawa poświęcona jest tematyce wpływu ruchu statku w warunkach nakładania się przepływu wymuszonego (wywołanego ruchami statku) na konwekcję naturalną cieczy zawartej w zbiorniku. Prowadzone badania dotyczyły zjawiska konwekcji przy ściankach: dolnej, pionowej i górnej zbiornika prostopadłościennego, wypełnionego cieczą do poziomu pełnej wysokości zbiornika bez usztywnień wewnętrznych. W streszczeniu Autor podał hipotezę swojej pracy w postaci: *„Złożony proces wymiany ciepła na drodze konwekcji mieszanej w zbiorniku okrętowym można opisywać poprzez odpowiednie złożenie zjawisk elementarnych. W badanym przypadku poprzez złożenie zjawiska konwekcji swobodnej, wywołanej różnicą temperatury ścianki i cieczy oraz konwekcji wymuszonej, wywołanej oscylacjami przepływu wymuszonego w zbiorniku”*.

Mając na uwadze konieczność udowodnienia powyższej tezy Doktorant przeprowadził analizę literatury dotyczącej modelowania zjawiska konwekcji swobodnej i wymuszonej, modelowania pól prędkości i temperatury, teorii podobieństwa fizycznego zjawisk itp. Przeprowadził badania modelowe wymiany ciepła w zbiorniku okrętowym, przedstawił opracowane wyniki badań, wyznaczył zależności empiryczne opisujące konwekcyjną wymianę ciepła w zbiorniku znajdującym się w spoczynku i poddanym wymuszeniom okresowym. Skutecznie wykorzystał metodę semi-empiryczną do rozważań złożonego zjawiska konwekcyjnej wymiany ciepła w oscylującym zbiorniku z zastosowaniem prostych, znanych zależności dla konwekcji swobodnej i wymuszonej. W ramach tego zakresu działań i uzyskanych rezultatów Doktorant w pełni uzasadnił postawioną tezę swojej pracy.

3. Rozwinięcie tezy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy poszukiwania nowych narzędzi obliczeniowych dotyczących złożonych procesów konwekcji mieszanej, gdzie efekty cieplne wywołane wymuszeniem okresowym nakładają się na efekty związane ze swobodnym ruchem cieczy w zbiorniku. Zjawiska takie występują w warunkach morskich na statkach, które posiadają zbiorniki wypełnione całkowicie lub częściowo cieczą. Zachodzące tam procesy są bardzo skomplikowane i wymagają stosowania odpowiednich procedur obliczeniowych. Istniejące modele obliczeniowe nie zawsze pozwalają w miarę precyzyjnie modelować wymianę ciepła, pędu i masy w warunkach zaburzeń okresowych. Istnieje szereg rozbieżności w uzyskiwanych wynikach z obliczeń według istniejących zależności obliczeniowych. Dotyczy to w szczególności wyznaczania wartości współczynników przejmowania ciepła na powierzchniach wewnętrznych zbiorników. Ich wartości mają istotne znaczenie w projektowaniu i eksploatacji zbiorników okrętowych w zakresie ogrzewania lub chłodzenia, sporządzania bilansów energetycznych i szacowania strat ciepła w warunkach eksploatacyjnych.

Mając powyższe na uwadze Doktorant podjął próbę szczegółowej analizy procesów konwekcji mieszanej wewnątrz zbiorników na statkach poddanych wymuszeniom okresowym. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury dotyczącej tematu rozprawy stwierdził, że nie odnalazł analitycznego rozwiązania, które umożliwiłoby modelowanie w pełnym zakresie zagadnienia konwekcji swobodnej mieszanej w zbiorniku okrętowym, w warunkach periodycznych oscylacji. Prezentowane w literaturze prace obejmują analityczne rozwiązania zagadnień wymiany ciepła przy dolnej i pionowej płycie w warunkach stacjonarnych, konwekcji swobodnej z laminarną warstwą przyścienną z nałożonymi zewnętrznymi wymuszeniami przepływu w wyniku harmonicznym oscylacji zbiornika. Brak jest natomiast rozwiązań dla płyty górnej zbiornika wypełnionego cieczą do poziomu całej jego wysokości. Powyższe stwierdzenie zadecydowało, że Doktorant postanowił przeprowadzić badania nad zjawiskiem konwekcji przy ścianach: dolnej, pionowej i górnej zbiornika prostopadłościennego. W ramach prowadzonych prac dokonał oceny intensywności i charakteru ruchu statku podczas kołysania, zakresów wartości amplitud i okresów kołysania występujących w praktyce. Uzyskane wyniki przeprowadzonej analizy były podstawą określenia parametrów zbiornika modelowego, stanowiska badawczego oraz zakresu temperatury i lepkości cieczy w skali modelowania zjawiska. W celu potwierdzenia przyjętych założeń Doktorant zaprojektował i zbudował oryginalne stanowisko badawcze, które umożliwiło prowadzenie pomiarów wielkości opisujących konwekcyjną wymianę ciepła wewnątrz zbiornika modelowego, znajdującego się w spoczynku, jak i poddanego wymuszeniom okresowym. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem dwóch cieczy roboczych: wody destylowanej i oleju wrzecionowego. Prowadząc badania wyznaczano wartości pola temperatury wewnątrz zbiornika, moc grzałki, parametry geometryczne itp. Na podstawie obliczeń wyznaczono lokalne i średnie wartości współczynnika przejmowania ciepła, gęstości strumienia ciepła, wartości liczb kryterialnych itp. Dla każdej serii pomiarów sporządzano bilans ciepła zbiornika pomiarowego, który potwierdzał dużą dokładność prowadzonych pomiarów. W celu potwierdzenia przyjętej tezy rozprawy sprawdzono możliwość wykorzystania semi-empirycznej metody wyznaczania wartości współczynnika przejmowania ciepła zaproponowanej przez promotora rozprawy prof. Jarosława Mikieliewicza dla wrzenia i kondensacji. Metoda ta obejmuje zagadnienia wymiany ciepła podczas wrzenia lub kondensacji w przepływie z generacją pęcherzyków lub kropeł cieczy. Jej podstawowym założeniem jest stwierdzenie, że wymiana ciepła może być modelowana jako suma nakładających się dwóch czynników całkowitej dyssypacji energii. W odniesieniu do modelowanego zjawiska Doktorant przyjął, że dla konwekcji mieszanej w ogólnym opisie można ująć dwa wzajemnie występujące zjawiska: konwekcja swobodna

w zbiorniku znajdującym się w spoczynku i konwekcja wymuszona w zbiorniku poddanym oscylacjom. Rozwinięcie tego założenia pozwoliło na opracowanie zależności pozwalającej wyznaczać wartość współczynnika przejmowania ciepła przy konwekcji mieszanej dla danej przegrody zbiornika poddanego oscylacjom. Porównanie wyników obliczeń według zaprezentowanych zależności, z wynikami przeprowadzonych badań eksperymentalnych wykazuje dużą zgodność, co dedykuje je do praktycznego wykorzystania w praktyce inżynierskiej.

4. Oryginalność i wartości poznawcze pracy

Zaproponowany przez Doktoranta temat rozprawy doktorskiej wynika z potrzeby prowadzenia prac badawczych w zakresie określenia wpływu ruchu statku na konwekcyjną wymianę ciepła w zbiornikach z ładunkiem ciekłym. Pomimo licznych publikacji w tym zakresie problematyka ta nie została jeszcze w pełni zbadana i opisana. Istnieje dalsza potrzeba prowadzenia prac w tym zakresie. Wynika to z konieczności bardziej precyzyjnego wyznaczania pól prędkości i temperatury wewnątrz zbiorników okrętowych, bardziej precyzyjnego określania strat ciepła i rzeczywistych wartości współczynników przejmowania ciepła, sporządzania dokładniejszych bilansów cieplnych i optymalizacji projektowanych systemów. Mając powyższe na uwadze Doktorant zaproponował, aby wymianę ciepła w zbiornikach okrętowych traktować jako konwekcję mieszaną w warunkach nakładania się przepływu wymuszonego wywołanego ruchami statku na konwekcję naturalną. Przyjęcie takiej hipotezy pozwoliło uzyskać wymierne osiągnięcia, do których należy zaliczyć:

- a) określenie parametrów zbiornika modelowego oraz zakresu temperatury i lepkości cieczy w skali modelowania zjawiska konwekcji mieszanej;
- b) przeprowadzenie analizy wymiany ciepła w zbiorniku prostopadłościennym zamkniętym, wypełnionym cieczą, bez wolnej powierzchni cieczy. Wyznaczenie korelacji kryterialnych w ujęciu globalnym oraz dla każdej ze ścian indywidualnie, szczególnie w obszarze dominacji konwekcji wymuszonej. Szczególne znaczenie ma wyznaczenie charakterystyki konwekcyjnej wymiany ciepła cieczy przy ścianie górnej. Ma to duże znaczenie w zastosowaniach inżynierskich, w obliczeniach bilansów cieplnych zbiorników, w tym zbiorników balastowych na statkach, które bardzo często są całkowicie wypełnione wodą. W literaturze brak jest takich zależności;
- c) określenie globalnego współczynnika intensyfikacji wymiany ciepła, który może znaleźć zastosowanie w szacunkowej ocenie wpływu ruchów kadłuba na utratę ciepła ze statku poprzez zbiorniki;
- d) skuteczne wykorzystanie semi-empirycznej metody do rozważań złożonego zjawiska konwekcyjnej wymiany ciepła w oscylującym zbiorniku za pomocą prostych, znanych zależności dla konwekcji naturalnej i wymuszonej. Uzyskanie dobrej zbieżności wyników badań eksperymentalnych współczynnika przejmowania ciepła dla konwekcji mieszanej, ze współczynnikiem obliczonym z geometrycznego złożenia zagadnień prostych dla ściany pionowej i górnej;
- e) rozszerzenie stanu wiedzy o intensywności konwekcji w prostopadłościennych zbiornikach okrętowych poddanych wymuszeniom i dostarczenie nowych narzędzi obliczeniowych. Uzyskane wyniki mogą być aproksymowane na inne kształty zbiorników, a poprzez zastosowanie różnych cieczy modelowych są uniwersalne w przebadanym zakresie liczby Prandtla.

Reasumując należy stwierdzić, że Doktorant opracował oryginalne i wartościowe narzędzia do prowadzenia obliczeń w zakresie mieszanej konwekcyjnej wymiany ciepła. Wyniki przeprowadzonych analiz i przedstawione wnioski przyczyniają się znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie realizowanego tematu.

5. Wartości użytkowe pracy

Prezentowana rozprawa doktorska ma duże znaczenie aplikacyjne. Dotyczy ona bardzo istotnego problemu poszukiwania nowych narzędzi obliczeniowych w zakresie mieszanej konwekcyjnej wymiany ciepła. Biura projektowe poszukują nowych metod projektowania z użyciem narzędzi numerycznych, gwarantujących dokładne odwzorowanie projektowanej jednostki. Nowe narzędzia projektowe poprawiają dynamikę warunków projektowych, zapewniają wcześniejsze szacowanie parametrów wejściowych, niedostępnych na danym etapie projektowania, przyspieszają i zwiększają dokładność prowadzonych obliczeń. Ma to szczególne znaczenie w zakresie gospodarki morskiej, gdzie istnieją podwyższone wymagania dotyczące dokładności i poprawności prowadzenia obliczeń projektowych, a w konsekwencji zmniejszenia ryzyka popełnienia błędów obliczeniowych. Wynika to często z uniwersalności stosowanych rozwiązań wynikających z nieograniczonego rejonu pływania i operacji statków w różnych warunkach geograficznych, w tym polarnych i subpolarnych. Powoduje to potrzebę ogrzewania zbiorników ładunkowych i ogólnookrętowych, aby temperatura przewożonych płynów nie była za niska, co mogłoby doprowadzić do ich zamarzania lub do powstawania osadów w przestrzeniach pomiędzy usztywnieniami. Zaproponowane przez Doktoranta zastosowanie metody semi-empirycznego do prowadzenia obliczeń w zakresie mieszanej konwekcyjnej wymiany ciepła pozwala wykorzystać zależności dla konwekcji naturalnej i wymuszonej, co znacznie je upraszcza i skraca czas obliczeń cieplnych i projektowania obiektów z tym związanych.

Prezentowana rozprawa jest istotnym wkładem Autora w zakresie poszukiwania nowych rozwiązań i ich praktycznych zastosowań w projektowaniu i eksploatacji zbiorników zainstalowanych na statkach i poddanych wymuszeniom okresowym. Jest to szeroko pojęte działanie zmierzające do racjonalnego gospodarowania energią cieplną, zwiększeniem jej oszczędności i poprawą bezpieczeństwa transportu morskiego.

6. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi o charakterze merytorycznym

1. W rozdziale 3.1.2. Lepkość cieczy modelowej Doktorant prowadził rozważania dotyczące zgodności skali lepkości cieczy modelowej stwierdzając, że dla warunków modelowych lepkość cieczy modelowej powinna wynosić $\nu = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Jak rozwiązano ten problem stosując olej i wodę o lepkości rzędu $10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$?
2. Doktorant wyznaczył charakterystyki stosowanych termopar w postaci wielomianów szóstego stopnia. Tak wysoki stopień wielomianów uzasadnia potrzebą uzyskania wysokiej dokładności. Jednak tak nie jest. Wzrost stopnia wielomianu powoduje zwiększenie liczby ekstremów zastosowanej funkcji i jej przebieg bardziej dopasowany do punktów pomiarowych, co powoduje, że przypomina „wężyk” przechodzony przez wszystkie punkty. Ich rozrzut względem linii aproksymacji nie wynika przecież z przebiegu zależności tempera-

tury od mierzonego napięcia tylko z niedokładności pomiarów. W powyższym przypadku wystarczające jest zastosowanie wielomianów drugiego stopnia.

3. Z podanego opisu wynika, że Doktorant dokonywał pomiarów temperatury tylko dla cieczy wewnątrz zbiornika i temperatury ścianki zbiornika, aby uzyskać odpowiednią różnicę temperatury potrzebną do obliczeń współczynnika przejmowania ciepła. Czy rozważano pomiary rozkładu temperatury w warstwie przyściennej w zbiorniku, co umożliwiłoby wykorzystanie prawa Fouriera do wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła na ścianie zbiornika?
4. Na stronie 92, wzór (5.9) podano w postaci uogólnionej metodę semi-empiryczną dla konwekcyjnej wymiany ciepła. Zaprezentowana zależność zawiera bezwymiarowy wykładnik n , którego wartość, zdaniem Doktoranta, zależy od „rozpatrywanej geometrii”. Jednak podstawy zaproponowanej przez prof. J. Mikieliewicza tej metody nie uwzględniają geometrii powierzchni, tylko są oparte na zasadzie dyssypacji energii, której wielkość zależy od kwadratu naprężeń stycznych. Dlatego we wzorach zaproponowanych przez prof. J. Mikieliewicza współczynnik n ma wartość 2. Doktorant też tak go przyjmuje do swoich obliczeń. Dlatego wskazanym jest wytłumaczenie dlaczego napisano, że wartość współczynnika n zależy od „rozpatrywanej geometrii”.
5. Doktorant opracował zależności obliczeniowe dla konwekcji mieszanej, które zawierają liczbę Reynoldsa. Aby wyznaczyć liczbę Reynoldsa trzeba znać prędkość cieczy w zbiorniku. Doktorant nie mierzył tej wartości tylko wyznaczał metodami numerycznymi. Czy projektant prowadząc obliczenia projektowe też powinien rozwiązywać numerycznie model konwekcji wymuszonej w zbiorniku? Czy można mu zaproponować prostszą metodę wyznaczenia liczby Reynoldsa?
6. W zaprezentowanej rozprawie brakuje rozdziału pod nazwą: „Cel, zakres i hipoteza pracy”. W swojej rozprawie Doktorant w różnych rozdziałach w sposób cząstkowy podał cel, zakres i hipotezę pracy. W pełnym brzmieniu hipoteza pracy znajduje się tylko w streszczeniu pracy. W prawidłowo przygotowanej rozprawie doktorskiej należy te informacje podać w jednym miejscu w sposób czytelny i jasny dla czytelnika.

Uwagi edytorskie

- ogólne

1. Należy podkreślić wysoki poziom przygotowania rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Praca została napisana w sposób zrozumiały. Zwraca uwagę wysoka jakość opracowania całego maszynopisu.
2. Praca zyskałaby jeszcze bardziej na jakości edytorskiej, gdyby Autor wprowadził opcję dzielenia wyrazów, co usunęłoby niekiedy zbyt długie odstępy pomiędzy wyrazami.
3. W pracy stosuje się angielski sposób podawania wartości liczbowych. W prezentowanej rozprawie część całkowitą liczby o części dziesiętnej oddziela się kropką, gdzie w języku polskim należy stosować przecinek.
4. Na wielu rysunkach zastosowano opis w języku angielskim, np. rys. 1.1 – str. 5, rys. 2.2 – str. 10, a powinien być w języku polskim.
5. Prezentowana rozprawa jest bardzo obszerna pod względem objętościowym. Aby ograniczyć jej wielkość można było część treści przenieść do załączników, np. w pracy przedstawić tylko część wyników pomiarów i obliczeń, zaś resztę zamieścić w załącznikach,

rozdział 4.6.1 dotyczący oceny niepewności strat mierzonych również można było podać w załączniku.

- szczegółowe

1. Na drugiej stronie streszczenia, 4 wiersz od góry jest „*korelacie*”, powinno być „*korelacje*”.
2. Str. 11, 5 wiersz od dołu jest „*współczynniki pełnotliwości*”, powinno być „*współczynniki pełnotliwości*”.
3. Str. 78, rys. 4.2, na osiach współrzędnych nie podano jednostek miary.
4. Str. 83, rys. 4.4, na osi pionowej brak jest jednostki miary.
5. Str. 156, 3 wiersz od dołu jest „*demi-empirycznej*”, powinno być „*semi-empirycznej*”.

7. Uwagi końcowe

Prezentowana rozprawa doktorska napisana jest zwięźle, rzeczowo i w sposób zrozumiały. W pracy brak jest praktycznie błędów językowych i edytorskich. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i powinny być inspiracją dla Doktoranta do dalszych analiz teoretycznych i badań eksperymentalnych dotyczących nowych rozwiązań w zakresie mieszanej konwekcyjnej wymiany ciepła. Uwagi te nie pomniejszają wartości opinowanej pracy, którą oceniam bardzo pozytywnie.

8. Wniosek do Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych w Gdańsku

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod naukowych. Wykazał także umiejętności wykorzystania istniejącej wiedzy z zakresu inżynierii mechanicznej w prowadzeniu analiz teoretycznych, obliczeń teoretycznych, badań eksperymentalnych i opracowaniu uzyskanych wyników. Obok odpowiedniego poziomu naukowego rozprawy, należy podkreślić duży stopień jej aplikacyjności. Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr inż. Mateusza Mielcarka, jako rozprawy doktorskiej spełniającej wymagania Ustawy o stopniach i tytule naukowym i o dopuszczeniu jej do publicznej obrony. Praca ta stanowi znaczące osiągnięcie Autora i jest istotnym wkładem do poszukiwania nowatorskich rozwiązań w zakresie mieszanej konwekcyjnej wymiany ciepła. Wyniki przeprowadzonych analiz i przedstawione wnioski przyczyniają się znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie realizowanego tematu

