

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Mielcarka
zatytułowanej:

Konwekcyjna wymiana ciepła w zbiorniku statku poddanego wymuszeniom okresowym

Podstawą sporządzenia recenzji jest pismo z 24. marca 2021 roku, sygnowane przez Pana dr. hab. Marcina Lackowskiego, zastępcę dyrektora ds. naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych w Gdańsku, wynikające z decyzji Rady Naukowej Instytutu.

Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa, której tematem jest ocena wpływu okresowych przemieszczeń płynu na konwekcyjną wymianę ciepła w zbiornikach statków, liczy łącznie 198 stron i strukturalnie składa się z *części zasadniczej* (s. 1-184) uzupełnionej zbiorem *załączników* (s. 185-191) i *bibliografią* (s. 193-198), poprzedzonych *streszczeniami* w j. polskim i j. angielskim, *spisem treści* i *spisem symboli*. Zasadniczą jej część tworzy 8 *rozdziałów*, w których Doktorant w kolejności:

- uzasadnił podjęcie tematyki badań (*rozdział 1*, s. 1-6) omawiając znaczenie systemów ogrzewania zbiorników okrętowych zarówno w procesie eksploatacji statków, jak też ich projektowania, a także rolę konwekcji w bilansie cieplnym zbiornika;

- scharakteryzował metody wyznaczania pola prędkości przemieszczeń cieczy w zbiorniku (*rozdział 2*, s. 7-34), przybliżając matematyczny opis falowania akwenu i ruchu statku na fali oraz wyznaczania funkcji potencjału prędkości cieczy i wartości jej prędkości przy poszczególnych ścianach zbiornika;

- omówił eksperymentalne modelowe badania wymiany ciepła w zbiorniku okrętowym (*rozdział 3*, s. 35-63), podając ich cel, opis stanowiska badawczego, a także program i metody realizacji pomiarów;

- zawarł opracowanie wyników pomiarów (*rozdział 4*, s. 64-88), obejmujące: obliczenia wielkości charakterystycznych na podstawie wielkości zmierzonych, wyznaczanie liczb kryterialnych badanego zjawiska, metody obliczeniowe i wyznaczanie korelacji metodą regresji liniowej, określenie straty ciepła ze zbiornika oraz wymianę ciepła pomiędzy źródłem ciepła a ścianami zbiornika w ujęciu całościowym, a także ocenę niepewności wyników badań;

- przybliżył teoretyczne rozważania na temat konwekcji mieszanej w zbiorniku okrętowym w oparciu o zjawiska proste (*rozdział 5*, s. 89-96), poparte przeglądem literatury dotyczącej analitycznego opisu konwekcji w warunkach oscylacji i zawierające omówienie semi-empirycznej metody modelowania złożonych procesów konwekcyjnej wymiany ciepła i jej zastosowania do analizy konwekcji mieszanej w zbiorniku poddanym oscylacjom, a także warunków jej zastosowania;

- podał wyniki prowadzonych badań (*rozdział 6*, s. 97-167), obejmujące: wymianę ciepła pomiędzy źródłem ciepła a ścianami zbiornika w ujęciu całościowym oraz przejmowania ciepła przez poszczególne ściany zbiornika pozostającego w spoczynku

i zbiornika poddanego wymuszeniom, a także przejmowania ciepła z zastosowaniem metody semi-empirycznej;

- przeprowadził dyskusję wyników badań (*rozdział 7*, s. 168-180), definiując bilans cieplny zbiornika, wymianę ciepła pomiędzy systemem grzewczym a zbiornikiem w ujęciu całościowym oraz wymianę ciepła pomiędzy: cieczą a ścianami zbiornika w spoczynku (badania eksperymentalne); cieczą a ścianami zbiornika poddanego wymuszeniom (metoda semi-empiryczna), cieczą a ścianami zbiornika poddanego wymuszeniom (badania eksperymentalne);

- zawarł podsumowanie prowadzonych badań i wnioski (*rozdział 8*, s. 181-184).

Integralną część pracy stanowi zbiór załączników, w których zamieszczono: własności cieplne materiałów i płynów użytych w badaniach, przykładowe charakterystyki odpowiedzi statku na falowanie morza, oraz tabele, wykresy i rysunki uzupełniające.

Uzasadnienie podjęcia tematyki badań i ich zakres

W eksploatacji jednostek pływających, w szczególności operujących w rejonach o niskiej temperaturze (polarne i subpolarne), duże znaczenie ma ogrzewanie zbiorników ładunkowych i eksploatacyjnych. Problem jest ważny ponieważ nadmierne obniżenie temperatury przewożonych cieczy może być przyczyną różnorodnych problemów transportowych i eksploatacyjnych. W celu zapobieżenia tym procesom na statkach stosowane są systemy grzewcze, zużywające znaczne ilości energii. W celu ograniczenia jej zużycia, na etapie projektowania niezbędna jest znajomość mechanizmów i zależności opisujących wymianę ciepła, umożliwiającą sporządzenie realnych bilansów energii i optymalizację systemów, przy czym istotnym jest zdefiniowanie i powiązanie wpływu ruchu statku ze współczynnikami przejmowania i procesami wymiany ciepła.

W większości przypadków zbiorniki mają prostą formę geometryczną i zazwyczaj nie są izolowane termicznie. Tracone z nich do otoczenia ciepło jest wynikiem konwekcji wewnątrz i na zewnątrz zbiornika, przy pomijalnie małym oporze przewodzenia ściany. Intensywność i rodzaj konwekcji zależą od szeregu czynników, w tym temperatury i rodzaju cieczy, temperatury przegrody, stopnia napełnienia zbiornika, także jego konstrukcji.

Charakter konwekcji zależy od intensywności ruchu (przemieszczania) cieczy w zbiorniku, będącego efektem ruchów kadłuba statku, wynikających z falowania akwenu. Wywołany w ten sposób ruch cieczy sprawia, że na konwekcję swobodną wynikającą z różnicy temperatur ciecz - ściana nakładają się składowe zmienne konwekcji wymuszonej o różnej intensywności, w wyniku czego w procesie przejmowania ciepła można zidentyfikować konwekcję naturalną, wymuszoną lub mieszaną. Wielkość składowej konwekcji wynikającej z wymuszeń zależy od intensywności ruchu płynu względem rozpatrywanej ściany (pole prędkości), przy czym najbardziej intensywny ruch cieczy w zbiorniku wywołuje ruch rotacyjny kołysania. Z kolei intensywność ruchu statku na fali zależy od charakterystyki hydrodynamicznej jednostki i od działającego na nią falowania akwenu. Wszystkie te czynniki znacząco wpływają na konwekcyjną wymianę ciepła w układzie ciecz – ściany zbiornika.

Mając powyższe na względzie, Doktorant podjął temat badań i analizy konwekcji w zbiorniku z cieczą, z uwzględnieniem wpływu ruchu statku, formułując szczegółowy zakres pracy, obejmujący modelowe badania wymiany ciepła pomiędzy cieczą a ściankami prostopadłościennego zbiornika (bez usztywnień wewnętrznych), całkowicie wypełnionego cieczą i poddanego okresowym wymuszeniom, mając na celu określenie i opisanie:

- wpływu oscylacji zbiornika na przejmowanie ciepła przez jego ściany;
- identyfikację różnic w stosunku do wyników badań zbiornika z tzw. powierzchnią otwartą;
- całościowego bilansu cieplnego zjawiska wymiany ciepła w zbiorniku;

oraz weryfikację postawionej hipotezy, która brzmi:

złożony proces wymiany ciepła na drodze konwekcji mieszanej w zbiorniku okrętowym można opisać poprzez odpowiednie złożenie zjawisk elementarnych - w badanym przypadku, poprzez złożenie zjawiska konwekcji swobodnej, wywołanej różnicą temperatury ściany i cieczy oraz konwekcji wymuszonej, wywołanej oscylacjami przepływu wymuszonego w zbiorniku.

Dla zrealizowania powyższego celu Doktorant wykorzystał oryginalne stanowisko umożliwiające symulację stanów typowych dla rzeczywistego transportu morskiego cieczy, pozwalające prowadzić badania w różnych konfiguracjach wymiany ciepła, to jest:

- w zbiorniku bez wymuszeń ruchu (w spoczynku),
- w zbiorniku poddanym wymuszeniom o różnych amplitudach i okresach,

przy różnej jego wysokości, z użyciem dwóch różnych cieczy (woda, olej wrzecionowy), oraz dla różnych wartości temperatury.

Właściwe badania poprzedziła obszerna analiza, w której Doktorant zawarł ocenę intensywności i charakteru ruchu kadłuba w odpowiedzi na wymuszenia, skupiając się na ruchu kołysania, mającym największy potencjał generowania przemieszczenia się cieczy w zbiorniku. Analiza wybranych przypadków transportu ładunków ciekłych umożliwiła wyznaczenie zakresów wartości amplitud i okresów kołysania mających miejsce w praktyce, co z kolei posłużyło do wyznaczenia parametrów pracy i zakresu pomiarów stanowiska modelowego.

Uzyskane wyniki pomiarów bezpośrednich pozwoliły wyznaczyć wielkości charakterystyczne opisujące poszczególne badane przypadki konwekcyjnej wymiany ciepła, to jest:

- średnie wartości gęstości strumienia ciepła przejmowanego przez ściany zbiornika,
- średnie współczynniki przejmowania ciepła dla poszczególnych ścian zbiornika,
- liczby kryterialne dla poszczególnych ścian zbiornika i konfiguracji pomiarowych,
- całkowite strumienie ciepła traconego przez zbiornik do otoczenia.

Dane te posłużyły do przeprowadzenia szczegółowej analizy i oceny rozpatrywanej konwekcyjnej wymiany ciepła w zbiorniku zamkniętym, wypełnionym w całości cieczą.

Ocena merytoryczna pracy

Praca, jak to już podano wcześniej, dotyczy konwekcyjnej wymiany ciepła w warunkach nakładania się wymuszonego ruchu płynu, wywołanego ruchami statku, na konwekcję naturalną. Zasadniczym jej celem było zbadanie, analiza i opis matematyczny różnych wariantów tego zjawiska, wynikających z rodzaju i parametrów cieczy oraz charakterystyki oddziaływań (wymuszeń).

Efektom badań, zarówno analitycznych i jak i przede wszystkim doświadczalnych, zrealizowanych przez Doktoranta na unikatowym i oryginalnym modelowym stanowisku badawczym symulującym rzeczywiste warunki morskiego transportu cieczy, jest szereg istotnych i oryginalnych wniosków i zależności, z których najważniejsze, to;

- stwierdzenie, że przy jednakowych wartościach wymuszeń i jednakowych wymiarach zbiornika, pole prędkości płynu w zbiorniku zamkniętym wypełnionym całkowicie jest odmienne od pola w zbiorniku otwartym z wolną powierzchnią cieczy, i charakteryzuje się mniejszą intensywnością ruchu, co ma znaczenie ze względu na przebieg i intensywność konwekcji, znajdując odzwierciedlenie w korelacjach liczb kryterialnych, zwłaszcza w obszarze przewagi konwekcji wymuszonej;
- wyznaczenie szeregu korelacji liczb kryterialnych, zarówno dla każdej ze ścian, jak i całego zbiornika, umożliwiających obliczenia wartości współczynników przejmowania ciepła

w zależności od parametrów transportowanej cieczy, jak i ruchu zbiornika, przy czym korelacje wyznaczono na podstawie danych eksperymentalnych jak i obliczeń opartych na metodzie semi-empirycznej;

- opracowanie zależności opisującej wymianę ciepła w układzie ciecz-ściana górna zbiornika, mającej duże znaczenie inżynierskie ze względu na przydatność w bilansowych obliczeniach cieplnych zbiorników całkowicie napełnianych cieczą;
- określenie całościowego współczynnika intensyfikacji wymiany ciepła w układzie: źródło ciepła - ściany zbiornika, przydatnego do szacunkowej oceny i analizy wpływu wymuszonego ruchu zbiornika na intensywność konwekcyjnej wymiany ciepła pomiędzy płynem a ścianami;
- wykazanie, że przy jednakowych parametrach ruchu zbiornika, utrata ciepła ze zbiornika otwartego z wolną powierzchnią cieczy, jest bardziej intensywna niż w przypadku zbiornika całkowicie wypełnionego;
- wykazanie, że dla każdej ze ścian zbiornika poddanego wymuszeniom, istnieją obszary dominacji konwekcji swobodnej, wymuszonej lub ich równowagi, w zależności od intensywności wymuszeń oraz różnicy temperatur ciecz-ściana, przy czym zakresy dominacji definiuje parametr określony wzorem $Gr/(Re^2Pr^x)$, w którym wykładnik potęgi liczby Pr zależy od rozpatrywanej przegrody i natury konwekcji.
- i inne.

Ważnym osiągnięciem Doktoranta jest wykazanie przydatności metody semi-empirycznej do analizy złożonego zjawiska konwekcyjnej wymiany ciepła w oscylującym zbiorniku za pomocą znanych zależności opisujących konwekcję naturalną i wymuszoną, w wyniku czego uzyskano dobrą zgodność wyników badań eksperymentalnych współczynnika przejmowania ciepła dla konwekcji mieszanej, ze współczynnikiem obliczonym z geometrycznego złożenia zagadnień prostych dla ścian pionowej i górnej.

.....

Reasumując, przedstawiona przez Doktoranta praca jest ważna, prezentuje dobry poziom, a zawarte w niej wyniki poszerzają stan wiedzy w obszarze badanej tematyki, dostarczając nowych narzędzi obliczeniowych w postaci korelacji przydatnych do obliczeń i analiz. Wyniki te mają duże znaczenie dla zastosowań inżynierskich, w szczególności do obliczeń bilansów cieplnych zbiorników okrętowych na etapie projektowania instalacji grzewczych.

Podane metody, korelacje i wyniki mogą być rozszerzone / aproksymowane na inne przypadki zbiorników okrętowych bez usztywnień wewnętrznych, całkowicie napełnionych cieczą, a także na inne rodzaje cieczy (o przebadanym zakresie liczby Prandtla). Należy uznać je za istotne osiągnięcie Doktoranta, które w mojej ocenie stanowi zrealizowanie celu pracy, a także uzasadnienie postawionej w dysertacji hipotezy.

Uwagi dyskusyjne

Praca nie budzi zastrzeżeń co do sposobu jej realizacji, zarówno w odniesieniu do przyjętych modeli, przebiegu eksperymentów, jak też metodyki badań, użytej aparatury oraz opracowania i analizy uzyskanych wyników. Jednak analiza jej treści nasuwa pytania, m.in.:

- w poszczególnych wariantach pomiarów pod uwagę były brane cykliczne wymuszenia o stałej amplitudzie i częstotliwości: czy rozważana była możliwość analizy wymuszeń całkowicie przypadkowych, o zmiennej i nieregularnej amplitudzie i częstotliwości;
- badania prowadzono przy założeniu braku usztywnień wewnętrznych w zbiorniku: czy i jaki wpływ na opracowane modele i zależności mogą mieć usztywnienia / przegrody usytuowane w płaszczyźnie cyrkulacji (równoległe do niej);

- zbiornik ma 4 ściany pionowe: czy wystarczające jest badanie konwekcji tylko przy jednej z nich;
- czy nie należało zdefiniować większej ilości punktów pomiaru temperatury ściany, ponadto z czego wynika ich ilość i miejsce usytuowania;
- ściany boczne zbiornika na statku mogą mieć różne wartości temperatury, co zapewne będzie przekładać się na pola temperatury i prędkości (?) cieczy: czy rozważano wzięcie pod uwagę takiego przypadku?

Należy zaznaczyć, że pytania te mają charakter dyskusyjny i mogą być traktowane jako przyczynek do dalszych prac.

Ocena strony redakcyjnej

Rozprawa została napisana zwięźle, klarownie i logicznie. Należy podkreślić jej dobry poziom edytorski. Układ pracy i podział strukturalny są prawidłowe, a kolejność rozdziałów nie budzi zastrzeżeń. Doktorant, co prawda, nie ustrzegł się drobnych błędów językowych, stylistycznych i edytorskich, ale nie wpływają one na pozytywną ocenę pracy.

Wniosek końcowy

W mojej ocenie dysertacja stanowi wartościową pracę, o wysokim poziomie merytorycznym, w której Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod, prawidłowo zrealizował zamierzony w niej cel i udowodnił postawioną hipotezę. Wykazał się także umiejętnością wykorzystania posiadanej wiedzy w prowadzeniu analiz i obliczeń teoretycznych, badań eksperymentalnych, a także opracowaniu uzyskanych wyników. Sama praca stanowi udany eksperyment badawczy, także obliczeniowy, zrealizowany na dobrym poziomie, a omawiany w niej problem ma znaczenie poznawcze, jak i aplikacyjne.

Reasumując stwierdzam, że przedłożona do recenzji dysertacja spełnia stosowne wymagania stawiane pracom doktorskim. Zawiera bowiem oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i dowodzi odpowiedniej wiedzy teoretycznej i praktycznej Doktoranta. Podjęta w niej tematyka jest ważna przede wszystkim ze względu na rozwój i eksploatację transportu morskiego, stanowiąc istotny wkład w poszukiwanie rozwiązań mających na celu podnoszenie efektywności i sprawności tych procesów.

Na tej podstawie stawiam wniosek o przyjęcie przez Radę Naukową Instytutu Maszyn Przepływowych w Gdańsku rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Mielcarka zatytułowanej ***Konwekcyjna wymiana ciepła w zbiorniku statku poddanego okresowym wymuszeniom okresowym*** i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

