

## **Modelowanie CFD hydrodynamicznego smarowania poprzecznego łożyska ślizgowego przy uwzględnieniu wpływu ciśnienia na lepkość oleju smarującego**

W pracy przedstawiono proces tworzenia modelu CFD hydrodynamicznego smarowania poprzecznego łożyska ślizgowego oraz wyniki symulacji, przeprowadzonej w celu zbadania, jak duży wpływ na wyniki symulacji będzie miało uwzględnienie wpływu ciśnienia na lepkość oleju smarującego. W celu stworzenia modelu CFD wykonano szereg badań doświadczalnych, do których wyników zostały następnie dopasowane modele matematyczne, które zostały wykorzystane podczas tworzenia modelu lepkościowego. Dopasowania dokonano za pomocą programu Matlab, natomiast do stworzenia modelu CFD wykorzystano program Ansys Fluent. Jednakże wspomniany program nie uwzględnia wpływu ciśnienia w modelu lepkościowym, z tego względu, aby zaimplementować funkcję odpowiedzialną za określenie wpływu ciśnienia na lepkość oleju smarującego skorzystano z mechanizmu udf (z ang. User Defined Function), która umożliwia implementację do programu dowolnej funkcji stworzonej przez użytkownika.

**Głównym celem niniejszej pracy inżynierskiej jest stworzenie modelu oraz przeprowadzenie symulacji CFD hydrodynamicznego smarowania poprzecznego łożyska ślizgowego przy uwzględnieniu wpływu ciśnienia na lepkość oleju smarującego.**

CFD (z ang. *Computational Fluid Dynamics*) jest to obliczeniowa dynamika płynów, wykorzystująca obliczenia numeryczne do rozwiązywania i analizowania problemów związanych z przepływami płynów. Początkowo symulacje CFD były wykorzystywane tylko na potrzeby wojska oraz programów kosmicznych, jednakże wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów oraz ich rozpowszechnieniem, coraz więcej gałęzi przemysłu zaczęło wykorzystywać je na swoje potrzeby. Obecnie symulacje CFD są nieodłącznym elementem takich dziedzin inżynierii jak: aerodynamika, inżynieria samochodowa, inżynieria lotnicza, czy inżynieria lądowa. Symulacje CFD są między innymi wykorzystywane do modelowania przepływów w instalacjach wentylacyjnych, modelowania procesów odprowadzania ciepła (np. w silnikach spalinowych) lub modelowania przepływów wokół kadłuba statku. Wykorzystanie do tego celu symulacji CFD pozwala na zmniejszenie kosztów oraz weryfikacji wydajności projektu jeszcze przed wykonaniem właściwej instalacji.

W rozdziałach pierwszym oraz drugim zostały zawarte podstawowe informacje na temat tarcia oraz smarowania. Zaprezentowano w nich również informacje na temat klasyfikacji olejów silnikowych wraz z wyszczególnieniem ich podstawowych parametrów eksploatacyjnych. W pracy autor przedstawił również podstawowe informacje na temat łożysk

ślizgowych oraz toczyń, wraz z teoretycznym modelem hydrodynamicznego smarowania łożyska ślizgowego. Podstawowym równaniem opisującym rozkład ciśnienia w klinie smarnym jest klasyczne równanie Reynoldsa, jednakże oprogramowanie CFD wykorzystane na potrzeby pracy, ze względu na to że służy do modelowania ogółu zjawisk cieplno-przepływowych, wykorzystuje ogólne równania mechaniki płynów: równanie zachowania energii, równanie zasady zachowania pędu oraz równanie ciągłości strugi.

W rozdziale trzecim zaprezentowano wyniki badań doświadczalnych, przeprowadzonych w celu wyznaczenia wpływu ciśnienia, temperatury oraz szybkości ścinania na lepkość oleju smarującego. Badania zostały przeprowadzone na przepracowanym oleju LOTOS MARINOIL RG 1240 z silnika H. Cegielski-Sulzer Typu: 8AL20/24, będącym drugim silnikiem głównym żaglowca szkolnego „Dar Młodzieży”. Zostały one wykonane za pomocą reometru HAAKE MARS III w laboratorium reologii na wydziale mechanicznym Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Następnie za pomocą programu Matlab dokonano regresji nieliniowej, tzn. dopasowania modeli matematycznych określających wpływ danego parametru na lepkość do otrzymanych wyników badań. Dopasowania dokonano na zasadzie porównania współczynników determinacji „ $R^2$ ” oraz wyboru modeli, dla których wspomniany współczynnik osiągnął wartość najbliższą jedności. W przedstawiony sposób wybrane zostały następujące modele: model Carreau (opisujący wpływ szybkości ścinania na lepkość oleju), model Chu i Camerona (opisujący wpływ ciśnienia na lepkość oleju smarującego) oraz model eksponencjalny (opisujący wpływ temperatury na lepkość oleju smarującego). Wymienione funkcje zostały następnie wykorzystane podczas tworzenia modelu lepkościowego w programie CFD. Program wykorzystany do przeprowadzenia symulacji (tj. Ansys Fluent) domyślnie wykorzystuje model Arrheniusa do określenia wpływu temperatury na lepkość oleju smarującego, jednakże ze względu na trudności z jego implementacją do programu za pomocą funkcji użytkownika (z ang. udf – user defined function), autor zdecydował się na wykorzystanie modelu eksponencjalnego, w związku z tym autor przeprowadził symulację porównującą oba modele.

W rozdziale czwartym zaprezentowano model CFD, wraz z wynikami symulacji. Badaniu zostało poddane łożysko główne silnika H. Cegielski-Sulzer Typu: 8AL20/24. Symulacje przeprowadzono dla następujących mimośrodowości względnych łożyska: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9. W celu przeprowadzenia symulacji przyjęto następujące założenia:

- przepływ cieczy jest laminarny oraz ustalony,
- ciecz jest nienewtonowska,

- ciecz jest nieściśliwa,
- powierzchnie czopa wału oraz panewki są idealnie gładkie oraz nieodkształcalne
- temperatura oleju doprowadzonego do szczeliny smarnej wynosi 50 °C,
- wał obraca się ze stałą prędkością wynoszącą  $750 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$  ( $78,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ ),
- ciśnienie oleju na brzegach rozpatrywanej szczeliny smarnej jest równe ciśnieniu otoczenia, wynoszącemu  $p_0 = 1 \text{ atm}$ .

Na podstawie wyników symulacji, gdzie wpływ ciśnienia na lepkość oleju został uwzględniony, można zaobserwować, że uwzględnienie wpływu ciśnienia na lepkość oleju smarującego przełożyło się na wzrost wartości ciśnienia panującego w filmie olejowym oraz zwiększenie siły nośnej filmu olejowego. Można również zaobserwować, że przyrost ten był tym większy im większą wartość miała mimośrodowość względna łożyska,

Tak jak zostało to wspomniane, wykorzystany program domyślnie wykorzystuje model Arrheniusa do określenia wpływu temperatury na lepkość oleju smarującego, jednakże w pracy został wykorzystany model eksponencjalny, z tego względu autor przeprowadził symulację porównującą oba modele. Wyniki wspomnianej symulacji wykazały, że różnica między wspomnianymi modelami jest niewielka, nie przekracza 1,5%, z tego względu autor wysunął wniosek, że w badanym przypadku, oba modele można stosować zamiennie.

### **Podsumowanie**

Celem niniejszej pracy było wykonanie modelu oraz symulacji CFD hydrodynamicznego smarowania poprzecznego łożyska ślizgowego przy uwzględnieniu wpływu ciśnienia na lepkość oleju smarującego. Do wykonania wspomnianej symulacji wybrano program Ansys Fluent, który umożliwia wykonanie modelu oraz symulacji przepływu płynów dla ogółu zjawisk cieplno-przepływowych. Dzięki zaimplementowanym w programie modelom matematycznym można, poprzez podanie wartości odpowiednich parametrów modelu, uwzględnić właściwości wybranego płynu podczas przeprowadzania symulacji. Oprogramowanie Ansys Fluent umożliwia również implementacje funkcji stworzonych przez użytkownika, co pozwala na wykorzystanie modeli, które nie są domyślnie wykorzystywane przez wspomniany program. Autor wykorzystał tę możliwość do implementacji funkcji opisującej wpływ ciśnienia na lepkość płynu oraz wykorzystanie innego modelu matematycznego (tj. modelu eksponencjalnego, zamiast modelu Arrheniusa, który jest domyślnie wykorzystywany w przypadku modelowania przepływów nieizotermicznych, gdzie rozwiązywane jest równanie energii). Umożliwiło to dokonanie porównania wybranych modeli określających wpływ temperatury na lepkość oleju smarującego. Na podstawie wyników

symulacji porównującej oba modele, można wysunąć wniosek, że w rozpatrywanych przypadkach, ze względu na niewielką różnicę uzyskiwanych wartości lepkości (nieprzekraczającą 1,5%) można model Arrheniusa oraz model eksponencjalny wykorzystywać zamiennie.

Wykorzystanie wyżej wspomnianej funkcji (oraz funkcji wbudowanych w program wykorzystany do przeprowadzenia symulacji) umożliwiło również wykonanie modelu lepkościowego oleju z którym, w rzeczywistości, współpracuje modelowane łożysko. W celu uzyskania odpowiednich danych wykonano szereg badań mających na celu określenie wpływu ciśnienia, szybkości ścinania oraz temperatury na lepkość oleju smarującego. Następnie, przy wykorzystaniu programu Matlab, dokonano regresji nieliniowej, tzn. dopasowania wybranych funkcji matematycznych do wyników badań, co pozwoliło na wykorzystanie wyników pomiarów podczas symulacji. W przedstawiony sposób można modelować właściwości różnego rodzaju płynów oraz sprawdzić, w jaki sposób różne środowisko pracy wpłynęłoby na ich parametry.

Tak jak zostało to wcześniej przytoczone, głównym celem pracy było wykonanie modelu oraz symulacji CFD hydrodynamicznego smarowania poprzecznego łożyska ślizgowego przy uwzględnieniu wpływu ciśnienia na lepkość oleju smarującego. Na podstawie wyników przytoczonej symulacji można wysunąć wniosek, że **wpływ uwzględnia ciśnienia w modelu lepkościowym oleju smarującego może być znaczący, zwłaszcza przy większych wartościach mimośrodowości względnych. W związku z tym, uwzględnienie wpływu ciśnienia na lepkość oleju, może mieć duże znaczenie podczas projektowania łożysk ślizgowych.**

W wykorzystanym oprogramowaniu CFD rozwiązywane są ogólne równania mechaniki płynów, ponieważ służy ono do modelowania ogółu zjawisk cieplno-przepływowych, jednak jak wykazano w pracy, oprogramowanie to może również posłużyć do modelowania hydrodynamicznego smarowania łożysk ślizgowych.