



**Politechnika  
Śląska**



**Instytut Maszyn i Urządzeń  
Energetycznych**

# **Eksperymentalne i numeryczne badanie zjawiska kawitacji dla różnych warunków przepływu**

**Dorota Homa**

Rozprawa doktorska

Promotor: dr hab. inż. Włodzimierz Wróblewski, prof. PŚ

Promotor pomocniczy: dr inż. Grzegorz Peczkis

Gliwice, 2018

## Streszczenie

Tematem rozprawy doktorskiej jest numeryczne i eksperymentalne badanie zjawiska kawitacji przepływowej. Zjawisko kawitacji jest złożonym procesem polegającym na naprzemiennym powstawaniu i zapadaniu się w przepływie fazy ciekłej pęcherzy fazy gazowej. Pęcherze fazy gazowej mogą tworzyć złożone struktury o skomplikowanym kształtach charakteryzujące się dużą dynamiką zmian. Wystąpienie kawitacji w przepływie ma negatywny efekt na pracę maszyn i urządzeń energetycznych. Wynika to z towarzyszących kawitacji zjawisk takich jak: rozchodzenie się w przepływie fal uderzeniowych, generowanie drgań, hałasu, uszkodzenie materiału (łopatek, kadłuba, kanału itp.) na skutek erozji kawitacyjnej. Przepływ z kawitacją w wirnikach pomp czy turbin wodnych może prowadzić do załamania się charakterystyk pracy, a w przypadku rozwiniętej kawitacji – do zerwania ciągłości przepływu i zatrzymania pracy maszyny.

W pracy analizowano proces tworzenia się, rozwijania i zapadania się struktur kawitacyjnych traktując je jako całość. Skupiono się na analizie zjawiska kawitacji zachodzącej na profilu łopatki, jako że jest to przepływ najbliższy rzeczywistym przepływom występującym w wirnikach maszyn i urządzeń energetycznych. Analizie poddano także przepływ przez dyszę zbieżno – rozbieżną (dyszę Venturiego).

Przedstawiono przebieg i wyniki badań eksperymentalnych przepływu z kawitacją w przypadku opływu profilu ClarkY 11.7%. Przedstawiono obrazy struktur otrzymane podczas wizualizacji przepływu. Zaobserwowano charakterystyczne dla okresowo zmiennych struktur kawitacyjnych zjawiska: tworzenie się strugi powrotnej, oderwanie się części struktury od profilu, zanik struktur przy krawędzi spływu łopatki. Stwierdzono, że im niższa liczba kawitacji, tym większe rozmiary otrzymywanych struktur kawitacyjnych oraz niższa częstotliwość ich zmian. Zakres częstotliwości zmian w obserwowanych przypadkach wynosił od 37.5 Hz–15 Hz. Zaobserwowano różne typy kawitacji w badanym zakresie liczb kawitacji: niewielkie struktury kawitacji początkowej, struktury kawitacyjne częściowe oraz rozwinięte struktury kawitacji chmurowej.

W rozprawie przedstawiono wyniki symulacji numerycznych przepływu z kawitacją przeprowadzonych przy użyciu różnych narzędzi obliczeniowych oraz dla różnych konfiguracji geometrycznych. W przypadku opływu profilu przeprowadzono obliczenia 2D w środowisku OpenFOAM oraz FLUENT.

W środowisku OpenFOAM porównano wyniki obliczeń dla wybranego przypadku uzyskanych przy użyciu modelu Schnerra-Sauera oraz modelu Kunza. Biorąc pod uwagę jakość rozwiązania dla przypadku rozwiniętej kawitacji oraz koszt obliczeniowy, wybrano model Kunza z odpowiednio dobranymi stałymi modelu. Uzyskanie stabilnego rozwiązania było silnie powiązane z kolejnością prowadzonym obliczeń, a zastosowany schemat numeryczny wykazywał wysoką wrażliwość na zadawaną wartość kroku czasowego. Na obrazach struktur

---

otrzymanych w ramach prowadzonych symulacji numerycznych zauważono charakterystyczne dla tego typu przepływu zjawiska, co świadczy o poprawnym doborze modelu obliczeniowego. Otrzymano częstotliwości zmian tego samego rzędu jak podczas badania eksperymentalnego. Rozbieżności w wartościach częstotliwości wynikały zarówno z uproszczeń przyjętych w obliczeniach, jak i w metodzie szacowania częstotliwości na podstawie obrazów z szybkiej kamery. Obszary zajmowane przez struktury kawitacyjne były większe w przypadku badań eksperymentalnych. Ze względu na ograniczenia pomiarowe ocena struktur otrzymanych eksperymentalnie przeprowadzona była w sposób jakościowy.

W środowisku FLUENT przeprowadzono symulacje opływu profilu z uwzględnieniem obecności powietrza w cieczy przy użyciu modelu kawitacji Singhala. Przebadano kilka różnych wartości udziału gazów niekondensujących  $f_g$ . Wpływ na częstotliwości zmian był nieznaczny. Wraz ze wzrostem  $f_g$  rosła amplituda zmian udziału fazy gazowej, ale dla pewnej granicznej wartości udziału  $f_g$  nastąpiło wytlumienie oscylacji i struktura stała się stabilna. Średnie wartości współczynników siły nośnej i oporu były zbliżone dla wszystkich badanych wartości  $f_g$ . Obrazy otrzymanych struktur różniły się od siebie. Wraz ze wzrostem udziału gazów niekondensujących obłok gazowy stawał się krótszy i wyższy oraz jego granice rozmywały się – nie zauważono wyraźnej granicy między fazą gazową a ciekłą. Wyniki obliczeń potwierdzają opisywane w literaturze rozmycie granicy faz w związku z podwyższonym udziałem powietrza w cieczy.

Badaniu poddano przepływ z kawitacją w dyszy Venturiego. Przeprowadzono test modeli turbulencji. Zastosowano model kawitacji Schnerr-Sauera. Porównano otrzymane w wyniku obliczeń obrazy obłoków kawitacyjnych z wynikami eksperymentalnymi. Stwierdzono, że dodanie do przepływu niewielkich strumieni powietrza poprawia zgodność uzyskiwanych parametrów przepływu z wynikami eksperymentalnymi.

W pracy przedstawiono wyniki symulacji przepływu z kawitacją w pompie o złożonej geometrii. Wykreślono charakterystykę wysokości podnoszenia pompy  $H$  w funkcji nadwyżki antykawitacyjnej  $NPSH$ . Zidentyfikowano krytyczną wartość  $NPSH$  przy której następuje 3% spadek wysokości podnoszenia pompy. Badanie wykazało przydatność narzędzia numerycznego do określania własności antykawitacyjnych układu przepływowego pompy.

Przeprowadzone badania numeryczne wykazały, że modelowanie przepływu z kawitacją z uwzględnieniem złożoności i dynamiki tego zjawiska wymaga starannego dobrania stałych modelu kawitacji, schematu numerycznego oraz parametrów procesu obliczeniowego. Wskazane jest dalsze rozbudowywanie modelu w kierunku modyfikacji modelu turbulencji oraz uwzględnienia ściśłości płynu. Jednak należy mieć na uwadze, że przy bardziej rozbudowanych i szczegółowych modelach otrzymanie stabilnego rozwiązania będzie zadaniem trudniejszym.

---