

OPTIMALIZACJA KONSTRUKCJI I OSIĄGÓW TURBINY WODNEJ PRZY WYKORZYSTANIU METOD OBLICZENIOWEJ MECHANIKI PŁYNÓW CFD

Wiesław Zalewski
Instytut Lotnictwa

Streszczenie

W artykule przedstawiono przebieg procesu analizy numerycznej zjawiska przepływu czynnika roboczego przez turbinę wodną. W wirniku turbiny i kanale wylotowym występuje złożony przepływ dwufazowy woda-powietrze. W omawianym przypadku jako obiekt obliczeń wykorzystano turbinę wodną typu Michell-Banki z pionowym doprowadzeniem wody skonstruowaną w Instytucie Lotnictwa w Zakładzie Samolotów BP1. Przedstawiono przegląd dostępnych metod i narzędzi obliczeniowych dla tego typu przepływów wielofazowych oraz wyniki obliczeń i ich wykorzystanie w procesie projektowania i optymalizacji konstrukcji turbiny. Wyniki obliczeń numerycznych odniesiono do uzyskanych później wyników badań doświadczalnych przeprowadzonych na modelu turbiny.

1. WSTĘP

W większości turbin wodnych ze względu na charakter ich pracy występuje konieczność modelowania złożonych przepływów czynnika roboczego. Trudności modelowania wynikają z obecności szybkoobrotowych elementów (wirnik turbiny) oraz przepływu w którym czynnik roboczy wypełnia jedynie część objętości kanałów turbiny. Najczęściej kanał dolotowy turbiny wypełniony jest całkowicie wodą. Woda wpływająca do przestrzeni roboczej wirnika wypełnia ją jedynie częściowo. Pozostała część jest stale wypełniona powietrzem. Podobnie jest w kanale wylotowym turbiny. Między wodą i powietrzem tworzy się swobodna powierzchnia kontaktu stanowiąca granice między tymi dwoma różnymi płynami (fazami). W celu analizowania przepływu konieczne jest wyznaczenie położenia tej granicy. Dodatkowym utrudnieniem jest, że dynamika i złożoność przepływu najczęściej wymuszają traktowanie go w obliczeniach jako nieustalony, nawet jeśli wydaje się mieć wszystkie cechy przepływu ustalonego w czasie.

2. NARZĘDZIA I METODOLOGIA

W przypadku analizy przepływu w turbinach wodnych tego typu podstawowym wymaganiem stawianymi narzędziom obliczeniowym obok możliwości liczenia dynamiki płynów jest umiejętność modelowania przepływów dwufazowych z powierzchnią swobodną. Powszechnie stosowane podejście do zagadnienia wyznaczania powierzchni swobodnej w obliczeniowej mechanice płynów to model VOF (Volume of Fluid). Model jest stosowany przy założeniu, że dwie (lub więcej) fazy nie reagują ze sobą chemicznie i nie penetrują się nawzajem. Po dyskretyzacji

obszaru obliczeniowego, każdej komórce obliczeniowej przyporządkowuje się funkcję udziału fazy w komórce. Jeśli wartość tej funkcji dla danej komórki obliczeniowej wynosi 1 komórka jest całkowicie wypełniona pierwszą fazą. Jeśli wartość funkcji wynosi 0 komórkę wypełnia całkowicie druga faza. Komórki w których wartość funkcji należy do przedziału (0,1) są wypełnione częściowo pierwszą i drugą fazą i wyznaczają obszar kontaktu faz (interfejs). Większość kodów komercyjnych oferuje uproszczony model VOF w którym ruch obu faz jest opisany wspólnymi równaniami. Jedynie Flow-3D zawiera model True VOF w którym stosuje się oddzielne równania dla obu faz i uwzględnia warunki brzegowe na powierzchni kontaktu faz w danej chwili. Model uproszczony jest na ogół wystarczająco dokładny do analizy przepływów w których faza gazowa ma niewielki wpływ na przepływ fazy ciekłej. Najczęściej wykorzystywane oprogramowanie umożliwiające modelowanie przepływów wielofazowych to:

Tab. 1. Oprogramowanie wykorzystywane do symulacji numerycznej przepływów wielofazowych

L.p.	Program	Model
1.	Fluent	VOF
2.	CFX	VOF
3.	Flow-3D	VOF, True VOF
4.	Open FOAM	VOF
5.	PHOENICS	VOF

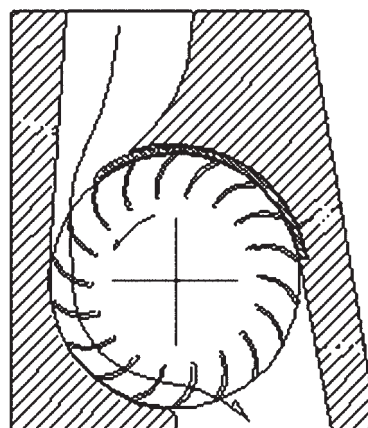
W omawianym przypadku do analizy przepływu użyto oprogramowania Fluent.

3. BIEKT OBLICZEŃ I ZAKRES PRAC

Turbina wodna Michell-Banki (rys. 1) jest akcyjną turbiną przepływową stosowaną w małych elektrowniach wodnych. Celem analizy była symulacja przepływu wody przez model turbiny Michell-Banki z pionowym doprowadzeniem wody oraz wyznaczenie jej osiągow. Obliczenia wykonano na modelu turbiny o średnicy wirnika 162 mm i długości łopatek 200 mm, pracującym dla spadków wody o wysokości 1000, 1500 i 2145 mm licząc od poziomu osi wału turbiny. Natężenie przepływu wody w pierwszej wersji turbiny było sterowane przez przepustnicę. Taki sam model został wykonany później do badań doświadczalnych.

Zakres prac obliczeniowych obejmował:

- wyznaczenie charakterystyk turbiny dla różnych warunków pracy: obciążenia, wysokości spadku wody, położenia przepustnicy sterującej przepływem,
- wizualizacja przepływu wody, określenie rozkładu ciśnień i prędkości przepływu,
- optymalizacja geometrii łopatek wirnika turbiny,
- optymalizacja i uproszczenie technologiczne kształtu kanału dolotowego i wylotowego turbiny.



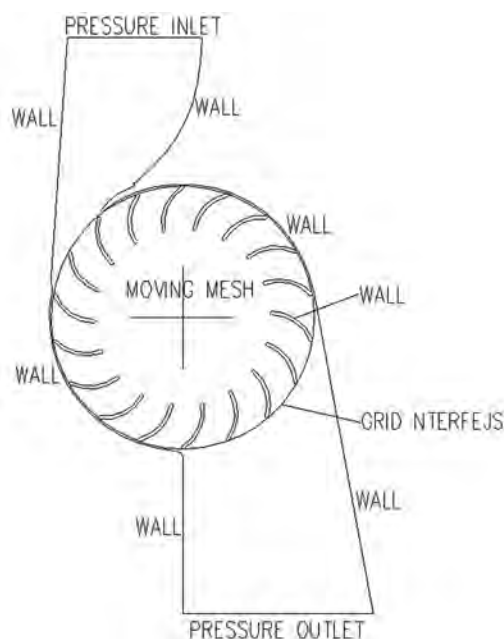
Rys. 1. Badany model turbiny wodnej typu Michell-Banki

4. MODEL OBLICZENIOWY

Na potrzeby obliczeń wykonano dwuwymiarowy model turbiny z obracającą się siatką obliczeniową symulującą ruch obrotowy turbiny (moving mesh). W obliczeniach przyjęto następujące założenia i modele:

- zagadnienie policzono jako stan nieustalony,
- zastosowano dwufazowy model przepływu typu: Volume of Fluid,
- model turbulencji: k-epsilon,
- grawitacja.

Przyjęte warunki brzegowe przedstawiono na rysunku 2.



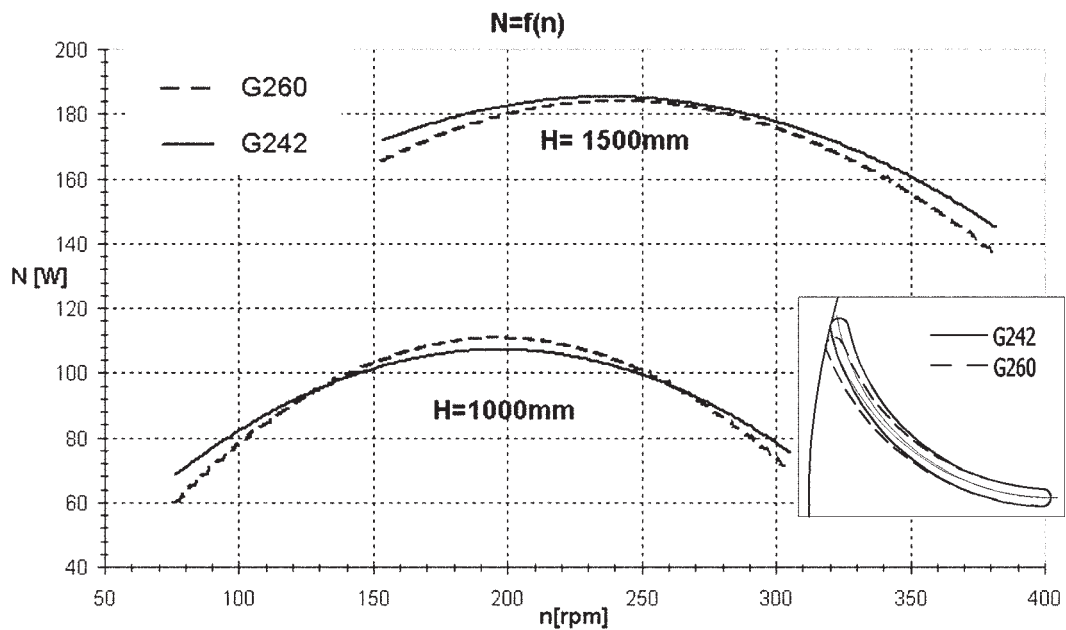
Rys. 2. Warunki brzegowe przyjęte w modelu obliczeniowym

5. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ PRZEPŁYWU

Program badań numerycznych objął w sumie obliczenia dla około 80 wariantów obciążenia i geometrii turbiny. Poniżej przedstawiono jedynie przykładowe wyniki. Ze względu na szeroki zakres prac dużą uwagę poświęcono na optymalizację modelu numerycznego pod kątem szybkości obliczeń. Dotyczyło to zwłaszcza doboru kroku czasowego obliczeń w stanie nieustalonym oraz konstrukcji siatki obliczeniowej.

Optymalizacja obliczeniowa geometrii łopatek

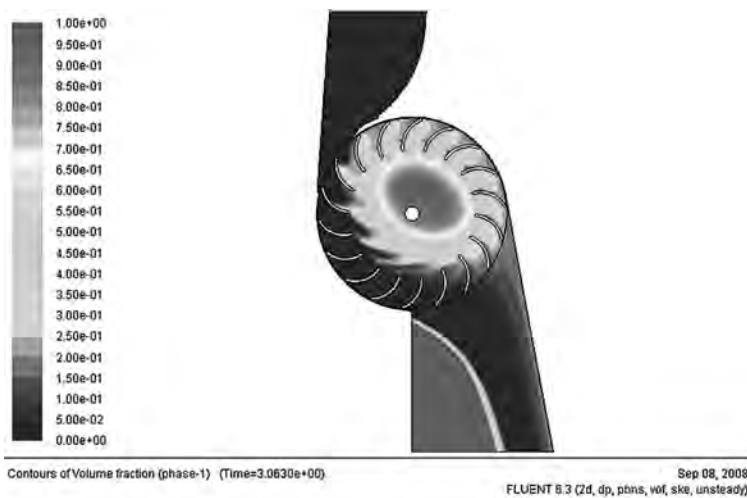
Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe dwa warianty geometrii łopatek turbiny, różniące się promieniem zakrzywienia. Turbina miała zostać zoptymalizowana do pracy przy spadkach wody 1000 i 1500mm. Najlepsze wyniki osiągnięto dla łopatki o promieniu krzywizny 26 mm oznaczonej jako G260 (wykorzystana potem w modelu do badań doświadczalnych) oraz dla wariantu łopatki o promieniu krzywizny 24,2 mm oznaczonej jako G242. Łopaska G242 pracowała lepiej przy spadku wody 1500 mm ale ustępowała modelowej przy spadku wody 1000 mm. Ostatecznie jako wariant produkcyjny wybrano G260. Na przytoczonym przykładzie widać jak stosunkowo niewielka zmiana w geometrii łopatki istotnie zmienia przebieg charakterystyki obciążeniowej turbiny.



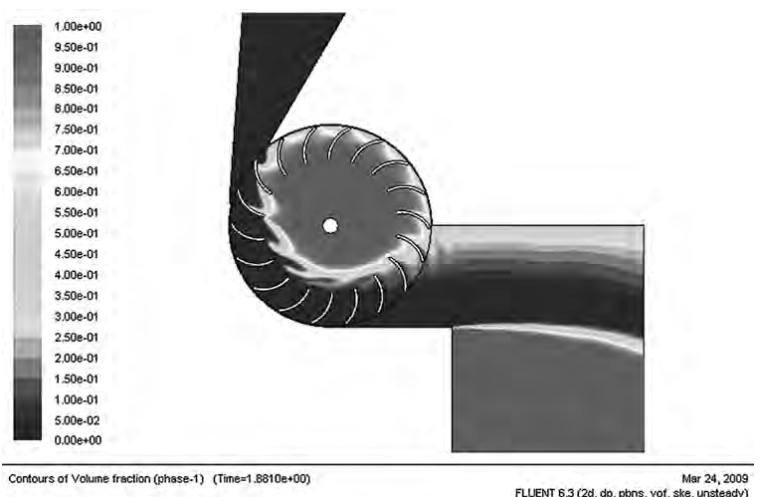
Rys. 3. Charakterystyka mocy turbiny w funkcji prędkości obrotowej dla spadku wody 1500 i 1000 mm dla dwóch różnych geometrii łopatek wirnika

Wizualizacja przepływu wody przez turbinę

Poniżej przedstawiono dwa przykłady wizualizacji przepływu przy spadku wody 1500 mm, przy tym samym ustawieniu przepustnicy sterującej przepływem i różnych obciążeniach turbiny.

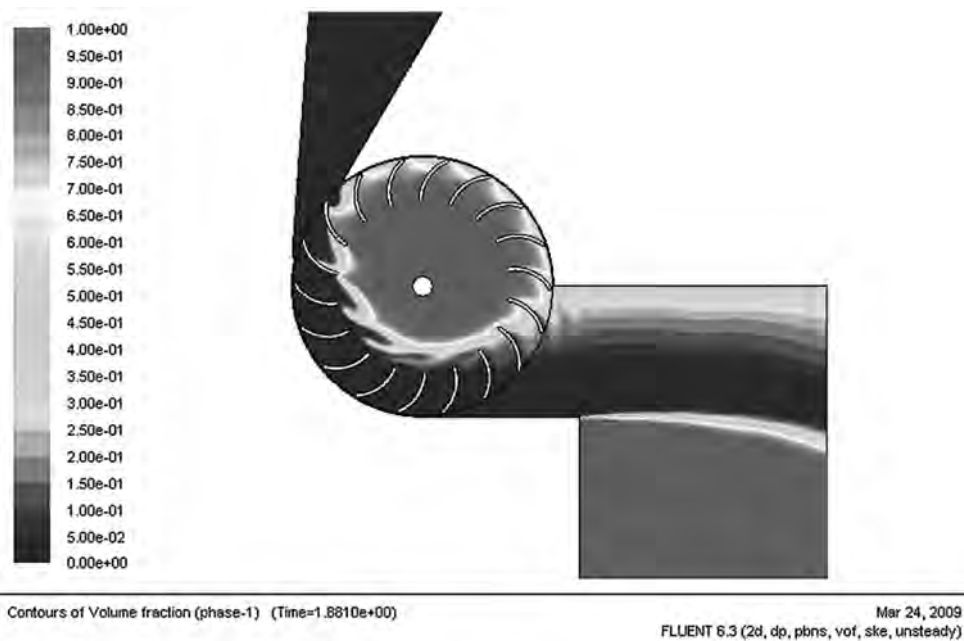
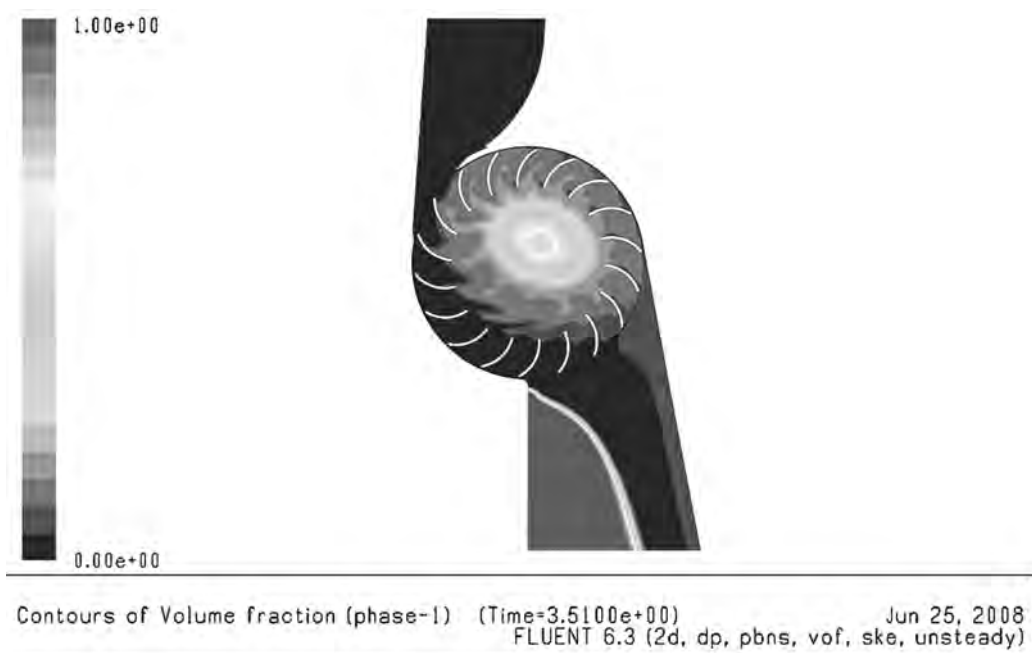


Rys. 4. Wizualizacja przepływu wody przez turbinę. Moment oporowy na wale turbiny: 5,6 Nm na lewym rysunku i 3,6 Nm na prawym rysunku

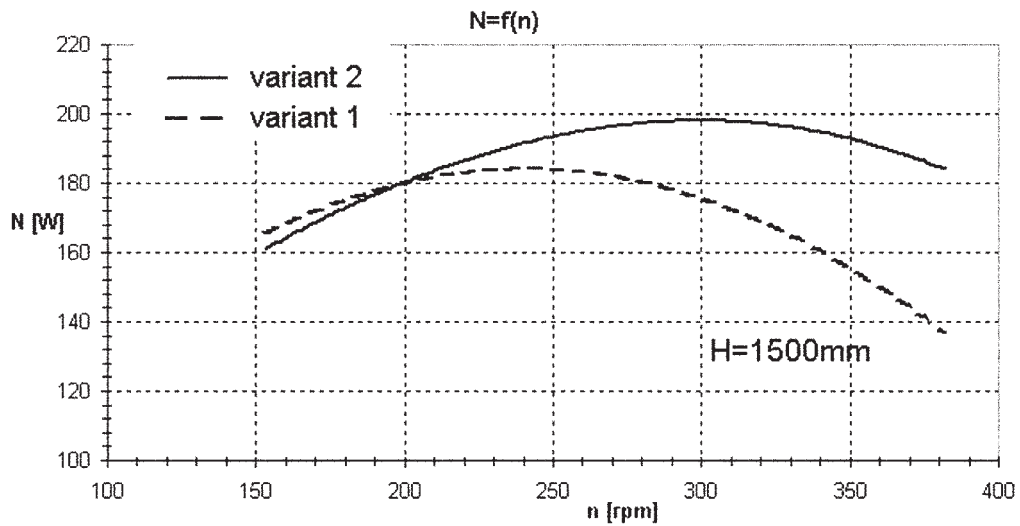


Optimalizacja kształtu kanału dolotowego i wylotowego turbiny

Poniżej przedstawiono kształt kanałów dolotowego i wylotowego przed i po optymalizacji oraz charakterystyki mocy turbin w obu układach. Zmiana kształtu kanałów została przeprowadzona ze względu na wymagania technologiczne wykonawcy.



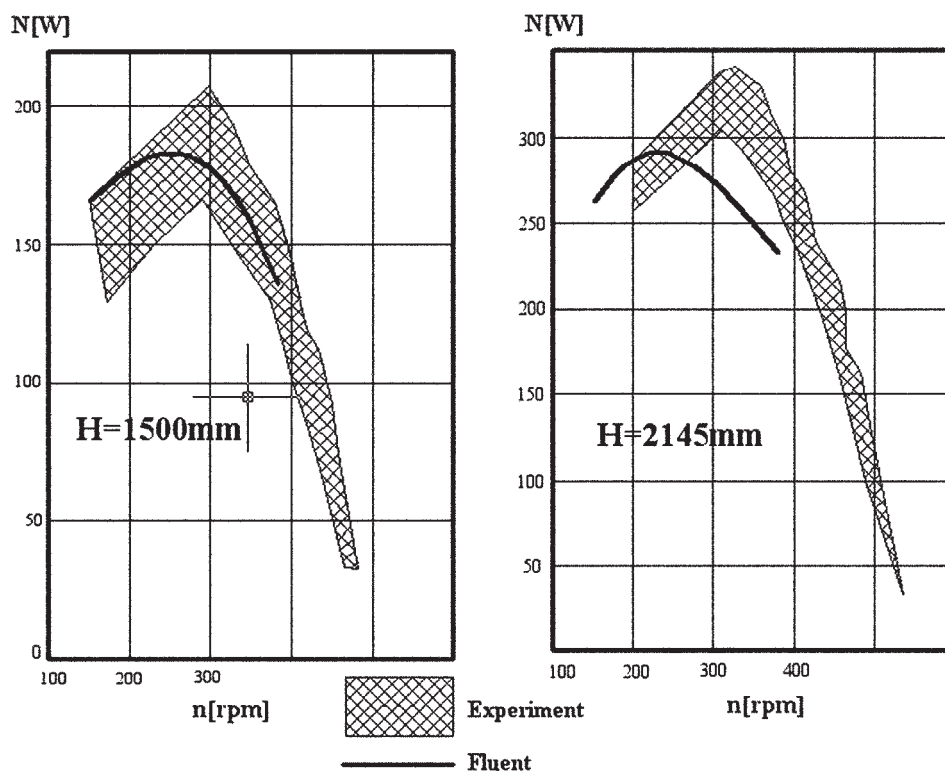
Rys. 5. Turbina przed i po optymalizacji. Po lewej turbina w układzie początkowym (wariant 1). Po prawej turbina zmodyfikowana (wariant 2)



Rys. 6. Charakterystyki turbiny przed i po modyfikacji

6. PORÓWNANIE WYNIKÓW OBLICZENIOWYCH I DOŚWIADCZALNYCH

Przeprowadzenie prób modelu turbiny i porównanie z wynikami obliczeń numerycznych wykazały akceptowalną zgodność modelu obliczeniowego z rzeczywistym obiektem. W większości przypadków błąd obliczeń nie przekraczał 14%. Największy wynosił 19%.



Rys. 7. Wyniki obliczeń numerycznych na tle wyników doświadczalnych dla turbiny pracującej przy spadku wody 1500 mm (po lewej) i 2145 mm (po prawej)



Rys. 8. Turbina wodna w czasie pracy na stanowisku badawczym

6. WNIOSKI

Obecnie dostępne narzędzia obliczeniowej mechaniki płynów dobrze nadają się do modelowania przepływów w turbinach wodnych tego typu. Dokładność obliczeń pozwala na efektywne wykorzystanie ich w procesie kształtowania konstrukcji już na poziomie projektu wstępnego. Dzięki temu możliwe jest znaczne obniżenie kosztów projektowania głównie poprzez skrócenie czasu i szybką optymalizację zastosowanych rozwiązań. Nadal jednak potrzebna jest walidacja doświadczalna wyników. Model obliczeniowy jest czuły na dobór takich parametrów jak wielkość kroku czasowego, konstrukcja siatki obliczeniowej, model turbulencji itp. Dużym utrudnieniem jest zupełny brak publikacji z wynikami badań doświadczalnych podobnych maszyn przepływowych. W bardziej złożonych przypadkach wymagających modelowania 3D ograniczeniem jest stosunkowo długi czas obliczeń. Większość zagadnień przepływowych tego rodzaju daje dobre wyniki obliczeń przy stosowaniu modelu przepływu nieustalonego.

LITERATURA

- [1] **Christopher Earls Brennen:** *Fundamentals of Multiphase Flow*. Published by Cambridge University Press 2005.
- [2] **Mikko Manninen, Veikko Taivassalo, Sierpa Kallio, Abo Akademi:** *On the mixture model for multiphase flow*. VTT PUBLICATIONS 288.
- [3] Fluent Users Guide.
- [4] Sprawozdanie nr 12/BA-A2/08/P. *Analiza przepływu przez model turbiny wodnej typu Mitchell-Banki*. Warszawa, 11.12.2008. Instytut Lotnictwa.
- [5] Sprawozdanie nr 174/BP1-SR/08. *Badania stoiskowe modelu turbiny Banki*. Warszawa. Instytut Lotnictwa.

W. Zalewski

**WATER TURBINE DESIGN AND PERFORMANCE OPTIMIZATION USING CFD
FLUID DYNAMICS CALCULATION METHOD**

Abstract

The article presents the process of numerical analysis of the working medium flow phenomenon through the water turbine. The two-phase water-air flow is made up through the turbine rotor and the outlet channel. In this case, a Banki-Mitchell water turbine with a vertical water supply designed at the Institute of Aviation at the Aircraft Department BP1 was used as the object of the calculations. An overview of available methods and computational tools for this type of multiphase flows and the results of calculations and their use in the design and optimization of the turbine structure. Results of numerical calculations were related to a subsequently obtained experimental results performed on a model turbine.

