

[w nagłówku każdej strony logo Instytutu Termomechaniki, Czeskiej Akademii Nauk w Pradze, w stopce dane teleadresowe]

Recenzja pracy doktorskiej

Autor pracy: Mgr inż. Sima Shabani, Politechnika Śląska, Gliwice, Polska

Promotor: dr hab. inż., prof. PŚ Mirosław Majkut, Politechnika Śląska, Gliwice, Polska

Tytuł pracy: "Analysis of the blade geometries for a highly efficient wet steam turbine stage"
[Analiza geometrii łopatek dla wysokowydajnego stopnia mokrego turbiny parowej]

Recenzent: prof. inż. Václav Uruba, CSc., Instytut Termomechaniki, Czeska Akademia Nauk, Praga, Czechy; Uniwersytet Zachodnioczeski w Pilźnie, Czechy

Praca doktorska „Analiza geometrii łopatek dla wysokowydajnego stopnia mokrego turbiny parowej” jest imponującym i dokładnie wykonanym opracowaniem badawczym, które moim zdaniem w pełni spełnia, a pod wieloma względami przewyższa standardy wymagane do uzyskania stopnia doktora.

Poniżej przedstawiam rozszerzoną, całościową ocenę jej zalet.

Znaczenie i ambicja problemu badawczego

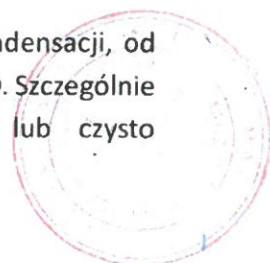
Zjawiska związane z parą moką w stopniach niskociśnieniowych (LP) dużych turbin w elektrowniach pozostają długotrwałym źródłem utraty wydajności, degradacji mechanicznej i niepewności projektowej. Skupiając się na (i) identyfikacji modeli kondensacji i wzrostu kropel, które dają wiarygodne prognozy CFD oraz (ii) wykorzystaniu tych modeli do optymalizacji geometrii stojana ostatniego stopnia, ta praca doktorska zajmuje się zarówno fundamentalną luką w wiedzy, jak i wyzwaniem o bezpośrednim znaczeniu dla przemysłu. Decyzja autorki o połączeniu wewnętrznych eksperymentów z rozbudowanym trójwymiarowym CFD nadaje tej pracy natychmiastowy charakter praktyczny i umożliwia szybkie wykorzystanie wyników przez producentów i operatorów turbin.

Jasność celów i zakresu

W pracy wyraźnie sformułowano cztery cele — wybór modelu, walidację eksperymentalną, pełną symulację 3D oraz optymalizację kształtu łopatek — a następnie realizowano je z godnym podziwu zachowaniem dyscypliny. Logiczny przebieg od podstaw (rozdział 1) poprzez konfigurację eksperymentalną (rozdział 2), benchmarking modelu (rozdział 3), symulację w pełnej skali (rozdział 4) i badania optymalizacyjne (rozdział 5) sprawia, że dokument jest łatwy w nawigacji i zapewnia, że każdy postęp techniczny jest odpowiednio umieszczony w kontekście.

Głębia i aktualność przeglądu literatury

Rozdział 1 zawiera autorytatywny przegląd literatury dotyczącej modelowania kondensacji, od wariantów klasycznej teorii nukleacji po współczesne komercyjne implementacje CFD. Szczególnie cenna jest krytyka wcześniejszych badań prowadzonych na małą skalę lub czysto



dwuwymiarowych, która motywuje przejście do realistycznych trójwymiarowych kanałów łopatek i podkreśla nowatorski charakter niniejszego opracowania. Przegląd jest wyważony — docenia przełomowe prace, jednocześnie szczerze wskazując wciąż istniejące niedociągnięcia — i jest w pełni oparta na międzynarodowym stanie wiedzy.

Rygor eksperymentalny i oryginalność

Znaczącą zaletą rozprawy jest specjalnie zaprojektowany tunel parowy i jego zaawansowana metoda wygaszania światła LEM (ang. Light-Extinction Method). Autorka nie tylko stosuje metodę LEM, ale także przeprowadza wyczerpującą kampanię kalibracyjną, w tym kontrole krzyżowe z pomiarami dyfrakcji laserowej (Spraytec), osiągając dokładność 6% w przypadku wielkości kropeł i 12% w przypadku ich gęstości. Niewiele opublikowanych badań oferuje tak skrupulatną walidację użytych narzędzi diagnostycznych, a wysiłek ten znacznie zwiększa zaufanie do późniejszych porównań numerycznych.

Szeroki zakres metodologiczny w benchmarkingu CFD

Siedem alternatywnych kombinacji modeli — łączących prawa wzrostu Gyarmathy'ego, Fuchsa-Sutugina i Younga z równaniami stanu: wirialnym, NIST i IAPWS — jest analizowanych w odniesieniu do eksperymentów z dyszami i kaskadą wirników. Analiza wykazuje, że przypadki oparte na modelach Gyarmathy'ego lub Fuchsa-Sutugina (3, 4, 6) najwierniej odtwarzają rozkłady ciśnienia statycznego, podczas gdy przypadki oparte na prawie Younga dają nierealistyczne dane wydajności i są słusznie odrzucane. Ta systematyczna analiza stanowi samo w sobie ważne, warte opublikowania odkrycie i będzie miało bezpośrednie zastosowanie dla praktyków CFD.

Wnikliwe symulacje pełnego stopnia

Kolejne badania turbiny niskiego ciśnienia wykorzystują sprawdzone modele do ilościowego określenia, w jaki sposób kondensacja zmienia fizykę przepływu: migrację fali uderzeniowej, ograniczanie liczby Macha i generowanie entropii. Autorka pokazuje, że kondensacja zmniejsza wydajność stopnia o $\approx 1,3\%$ i mocy o $\approx 15\%$ w reprezentatywnych warunkach pracy oraz że straty koncentrują się głównie na stojanie ($\approx 10\%$ całości), a nie na wirniku ($\approx 1\%$). Te dobrze uzasadnione spostrzeżenia poszerzają naszą wiedzę na temat tego, na czym należy skoncentrować wysiłki projektowe i są poparte przejrzystymi wizualizacjami i tabelami ilościowymi.

Przekonująca optymalizacja geometrii łopatek

Być może najbardziej namacalne korzyści inżynierskie pojawiają się w rozdziale 5, w którym przedstawiono szereg dwu- i trójwymiarowych modyfikacji stojana — w tym skreślenia, nachylenia, zastąpienia profilu i połączone przesunięcia osiowego/pochylenia obwodowego — i poddano je ocenie. Zalecany profil Bakhtara z pochyleniem obwodowym w kierunku obrotu wirnika (Bakhtar-CL1) podnosi wydajność stopnia o 3,2% bez niedopuszczalnych strat związanych z wilgotnością. W badaniu wyjaśniono również, dlaczego pozornie niewielkie zmiany geometryczne mogą znacząco wpływać na wydajność stopnia, zwłaszcza w pobliżu piasty, i zawiera uporządkowaną matrycę kompromisów projektowych, która będzie stanowić wskazówki dla przyszłych modernizacji przemysłowych.

Wkład naukowy i oryginalność

Podsumowując, praca dostarcza:

- Sprawdzony protokół wyboru modeli kondensacji mający zastosowanie w komercyjnych solverach CFD.
- Pierwsze w swoim rodzaju trójwymiarowe budżety entropii i strat dla stopnia LP turbiny parowej o mocy 200 MW pracującej w warunkach wilgotnych.
- Określone ilościowo, specyficzne dla geometrii zalecenia projektowe, które w sposób wyraźny poprawiają wydajność.
- Metodologię pomiarową sprawdzoną eksperymentalnie, którą można przenieść do innych laboratoriów zajmujących się przepływem dwufazowym.

W mojej opinii, te osiągnięcia stanowią znaczący postęp w dziedzinie badań nad turbinami parowymi.

Jakość ekspozycji

Praca doktorska została napisana jasnym, płynnym językiem angielskim, z niewielkimi błędami typograficznymi, które nie utrudniają zrozumienia treści. Ilustracje są liczne, opatrzone trafnymi podpisami i reprodukowane w rozdzielczości odpowiedniej dla szczegółowej analizy. Obszerne tabele – na przykład bezpośrednie porównanie przypadków modelowania oraz podsumowanie budżetów generowania entropii – umożliwiają czytelnikowi weryfikację wszystkich głównych tez. Załączniki i wykazy terminów są wyczerpujące, ułatwiają szybkie odnalezienie potrzebnych informacji.

Krytyczna refleksja i przyszłe prace

Autorka nie unika pozostałych ograniczeń pracy — w szczególności konieczności udoskonalenia prognoz dotyczących średnicy kropel oraz potwierdzenia wyników za pomocą alternatywnych platform CFD — i przedstawia rozsądny plan dalszych badań. Taka samokrytyka podkreśla naukową dojrzałość kandydatki.

Ogólna ocena

Podsumowując, praca jest rygorystyczna pod względem technicznym, nowatorska pod względem metodologicznym i ma znaczenie dla przemysłu. Wyróżnia się rzadko spotykanym połączeniem starannie skalibrowanych eksperymentów, wyczerpującego benchmarkingu modeli i pragmatycznej optymalizacji łopatek turbin. Aparat naukowy – przegląd literatury, struktura argumentacji, prezentacja danych – jest wysokiej jakości, a wnioski są zarówno uzasadnione, jak i wnikliwe.

Dlatego zdecydowanie zalecam przyjęcie pracy w obecnej formie i przyznanie kandydatce bez zastrzeżeń tytułu doktora. Praca ta stanowiłaby również doskonałą podstawę do publikacji w czasopiśmie i wytycznych dotyczących projektowania przemysłowego i przewiduję, że będzie szeroko cytowana w środowisku zajmującym się turbomaszynami.

Praga, 11 sierpnia 2025 r.

Prof. inż. Václav Uruba, CSc.

Uwagi i pytania do dyskusji

1. Wybór modelu kondensacji a błąd średnicy kropli

W pracy wykazano, że przypadki oparte na modelach Gyarmathy'ego i Fuchsa-Sutugina (3, 4, 6) ściśle odzwierciedlają dane dotyczące ciśnienia statycznego, ale niedoszacowują średnic Sautera, podczas gdy przypadki oparte na modelu Younga zachowują się odwrotnie.

Pytanie: Czy może Pani określić ilościowo, w jaki sposób sprzeczne wskaźniki dokładności (ciśnienie vs. średnica) przenoszą się na prognozy wydajności stopnia i dlaczego zdecydowała się Pani przenieść wariant Gyarmathy do badania turbiny 3D bez ponownej kalibracji?

2. Ekstrapolacja równania stanu (EOS) do strefy metastabilnej

W manuskrypcie przyznano, że wszystkie komercyjne opcje EOS zostały opracowane dla pary w stanie równowagi i muszą być ekstrapolowane na obszary przechłodzone, co „wymaga dalszych badań”.

Pytanie: Czy przeprowadziła Pani analizę wrażliwości pokazującą, jak silnie zmieniają się przewidywane przez Wilsona punkty i frakcje wilgotności, gdy równania wirialne w porównaniu z wzorami IAPWS-IF97 mieszczą się w ramach prawdopodobnych przedziałów niepewności?

3. Niepewność eksperymentalna w metodzie wygaszania światła (LEM)

Skalibrowany system LEM osiąga $\pm 6\%$ w rozmiarze kropli w idealnych warunkach, jednak w pracy doktorskiej przyjęto wartość $\pm 10\%$ podczas pracy w rzeczywistym przepływie i uwzględniono zakłócenia wywołane przez sondę.

Pytanie: Biorąc pod uwagę, że wybór modelu zależy od danych dotyczących kropli, jaka jest łączna niepewność pomiaru oraz odwrotności algorytmu oraz w jaki sposób może to wpłynąć na ranking modeli?

4. Brak udokumentowanego badania niezależności od siatki

Chociaż opisano kolejność solverów i schematy dyskretyzacji, nie przedstawiono krzywej udoskonalenia siatki.

Pytanie: Jak gruba może być siatka, zanim lokalizacja fali uderzeniowej kondensacji lub obliczony bilans entropii zmieni się o, powiedzmy, 1%? Innymi słowy, jaki jest wskaźnik zbieżności siatki?

5. Intensywność turbulencji na wlocie ustalona na 5%

Jednolita wartość 5% jest narzucona zarówno dla przypadków dysz, jak i kaskad.

Pytanie: Na jakich dowodach eksperymentalnych opiera się ta wartość i jak wrażliwe są prognozy dotyczące szybkości nukleacji, na przykład na podwojenie lub zmniejszenie o połowę tej intensywności?

6. Skalowanie geometryczne kaskady wirnika o 2,5 x

Kaskada liniowa użyta do walidacji ciśnienia jest powiększona w stosunku do rzeczywistej końcówki wirnika.

Pytanie: W jaki sposób zachowano podobieństwo Reynoldsa i Macha po skalowaniu i czy oczekuje Pani, że efekty bezwładności kropli (liczba Stokesa) będą identyczne przy pełnym rozmiarze?

λ Kompromis między wzrostem wydajności a wzrostem wilgotności

Warianty łopatek, takie jak „st-2 deg” i „Bakhtar-CL1”, zwiększają wydajność, ale także zwiększają wilgotność, czasami na wylocie stopnia.

Pytanie: Jaki margines operacyjny — np. granice erozji lub wydajność separatora — określa dopuszczalny pułap wilgotności dla stopnia LP, i czy zalecane przez Panią geometrie pozostają w jego granicach w całym zakresie obciążenia?

8. Walidacja budżetu strat

W rozdziale 4 wyprowadzono mapy generowania entropii i przypisano $\approx 10\%$ całkowitych strat do regionu stojana, ale nie podano żadnego eksperymentalnego rozkładu strat.

Pytanie: Czy porównała Pani symulowane współczynniki strat ciśnienia z pomiarami całkowitego ciśnienia na stanowisku kaskadowym lub - w przypadku braku takich pomiarów - z istniejącą literaturą, aby potwierdzić lokalizację i wielkość tych strat?

9. Ogólna przydatność poza komercyjnymi solverami ANSYS

Wszystkie prace związane z CFD opierają się na Fluent/CFX; w samej pracy zauważono, że akademickie solwery mogą zachowywać się inaczej.

Pytanie: Które elementy Pani schematu pracy (np. terminy źródłowe wzrostu kropel, interpolacja gazów rzeczywistych) są ściśle związane z konkretnym dostawcą i na ile metodologia ta jest przenośna na otwarte platformy, takie jak OpenFOAM?

10. Propagacja niepewności do podanej w nagłówku utraty wydajności wynoszącej 1,3%

Zgłoszona utrata wydajności etapu wynosząca 1,27% spowodowana kondensacją jest dokładna do dwóch miejsc po przecinku.

Pytanie: Kiedy propagowane są połączone niepewności numeryczne (siatka, model, EOS) i eksperymentalne, jaki jest przedział ufności dla wartości 1,27%? Czy rzeczywista wartość może wynosić, powiedzmy, od 0,5% do 2%?

Drobne uwagi i poprawki:

- Niekompletny przegląd literatury: Niektóre z kluczowych artykułów dotyczących walidacji CFD pary mokrej np. Zhang, Han, Tabata, Akbarnejad, Hu, ...)
- Błędy ortograficzne/gramatyczne: „Mesearement Techniques” → „Measurement Techniques”; „comparision” → „comparison”.
- Spójna terminologia: formy amerykańskie/brytyjskie (np. „modeling” kontra „modelling”).
- Spójność w stosowaniu łączników (np. „wet-steam” kontra „wet steam”, „low-pressure” kontra „low pressure” itp.).
- Wielkie litery: Nagłówki sekcji zawierają zarówno wielkie litery, jak i małe litery („3D Simulation of Wet Stream Flows...” kontra „Assessing stage performance sensitivity...”). Proszę wybrać jeden styl.
- Lista symboli: niektóre symbole greckie (np. θ) nie mają definicji; proszę sprawdzić kompletność tabeli indeksów dolnych/skrótów.
- Rysunki: Fotografie Schlierena wymagają podpisów wskazujących kierunek przepływu.
- Styl odniesień: zakresy powinny być podane jako „[5-8]”, a nie „[5,6,7,8]”; proszę upewnić się, że interpunkcja przed latami w bibliografii jest ujednolicona.
- Nomenklatura: Proszę sprawdzić kolejność alfabetyczną i unikać powtarzających się wpisów.
- Odniesienia między rozdziałami: kilka odniesień do dalszych fragmentów wskazuje nieprawidłowe numery sekcji po ostatecznej edycji — proszę uruchomić sprawdzanie etykiet LaTeX.

Ja, Małgorzata Sokołowska, tłumacz przysięgły języka angielskiego w Gliwicach, nr wpisu na listę tłumaczy przysięgłych TP/1509/05. Poświadczam zgodność niniejszego tłumaczenia z okazanym mi dokumentem sporządzonym w języku angielskim. Gliwice, dnia 4 września 2025 r. Repertorium nr 363/2025.

Podpisała Małgorzata Sokołowska

