

Gdańsk, 6.09.2018 r.

prof. dr hab. inż. Jacek Pozorski
Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Fiszerka 14, 80-231 Gdańsk
Tel.: 58 5225145, Fax: 58 3416144
e-mail: jp@imp.gda.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Tomasza Zawistowskiego
**pt. Symulacja zjawisk dynamicznych w wysokociśnieniowej pompie hydraulicznej
o zmiennej wydajności**

Recenzję opracowano na podstawie pisma Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie, dr. hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego, z dnia 6.07.2018 r. Praca doktorska została przygotowana pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Michała Kleibera.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozwój technik komputerowych zrewolucjonizował działalność inżynierską w zakresie budowy maszyn. Stało się to zarówno na etapie projektowania urządzeń, gdzie tradycyjne narzędzia takie jak rysunek techniczny zostały wsparte (wyparte?) przez oprogramowanie typu CAD, CAE, CAM, a także dzięki analizom numerycznym różnorodnych aspektów działania tych urządzeń. Długotrwałe badania prototypów mogą być ograniczone do niezbędnego minimum dzięki analizom wytrzymałościowym, termicznym, hydro- lub aerodynamicznym, oraz ich złożeniom w postaci wzajemnego oddziaływania płynu i ciała stałego (FSI), sprzężonej wymiany ciepła (CHT), aeroakustyki (CAA) i innych. Pan mgr inż. Tomasz Zawistowski jest w pewnym sensie aktywnym aktorem tej rewolucji, gdyż kończył studia jako mechanik-technolog jeszcze w czasie, gdy złożone analizy z użyciem technik komputerowych nie były w naszym kraju dostępne, natomiast niniejsza, złożona przez niego rozprawa doktorska istotnie wykorzystuje te właśnie techniki i obszernie dokumentuje wyniki uzyskane za ich pomocą.

Przedmiotem zainteresowania Doktoranta jest nowatorska koncepcja pompy hydraulicznej typu tłoczkowego, której zadaniem jest uzyskiwanie wysokich ciśnień (typowo 20-30 MPa) oleju roboczego, będącego zarazem czynnikiem smarowym. Innowacyjność rozwiązania polega na możliwości uzyskania zmiennej wydajności przy zastosowaniu prostego sterowania bez rozbudowy układu hydrauliki siłowej. Przy prędkościach obrotowych na poziomie 1500 obr./min. podczas cyklu pracy pompy występują intensywne zjawiska dynamiczne, w tym szybkozmiennie i silne impulsy ciśnienia. Podobnie, wymagania konstrukcyjne ze spasowaniem elementów na poziomie setnych części milimetra sprawiają trudności w zakresie analizy przepływów przez uszczelnienia oraz uwzględnienia ograniczeń termicznych podczas rozruchu takich pomp.

Aktualności tematyki pracy należy upatrywać w złożeniu poruszanych zagadnień, podejmowanych z zastosowaniem modeli fizykalnych odpowiadających współczesnemu stanowi wiedzy; przy tym symulacje numeryczne są niekiedy prowadzone na granicy dostępnych zasobów, co wymusza różnego rodzaju założenia upraszczające (zaniedbanie szczegółów geometrii, przyjęcie płaszczyzny symetrii w 3D, obliczenia 2D). Ponadto symulacje komputerowe umożliwiają uzyskanie informacji o pozanominalnym reżimie pracy pompy, na granicy sytuacji awaryjnych, ze swej natury trudno dostępnych w eksperymencie.

Od strony klasyfikacji formalnej rozprawa sytuuje się w dziedzinie nauk technicznych. Przewód doktorski wszczęty został przez radę Naukową IPPT PAN w dyscyplinie mechanika. W mojej opinii temat rozprawy lokuje się lepiej w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn, jako że praca dotyczy badań dobrze określonego urządzenia technicznego z wykorzystaniem metod zasadniczo znanych. Argumentem na rzecz dyscypliny mechanika może być kompleksowy charakter przeprowadzonych badań obejmujących zjawiska fizyczne różnej natury (zagadnienia kontaktu, przepływ turbulentny, kawitacja, analizy termiczne). Ponadto, w świetle wchodzących w życie nowych regulacji prawnych w nauce, w niedługim czasie obie te dyscypliny będą wspólnie tworzyć inżynierię mechaniczną – nową dyscyplinę, w której rozprawa sytuuje się bardzo dobrze. Ponadto uważam, że zakres badań podjętych przez Doktoranta oraz stopień ich trudności spełniają wymagania stawiane pracom doktorskim.

Struktura i zawartość pracy doktorskiej

Rozprawa liczy 172 strony, składa się z 11 rozdziałów, spisu literatury liczącego 55 pozycji (w tym 10 prac współautorstwa Doktoranta) oraz streszczeń w języku polskim i angielskim. Pierwszych pięć rozdziałów pracy (liczących łącznie 16 stron) stanowi *de facto* wprowadzenie do tematu pracy wraz z przeglądem stanu wiedzy oraz informacjami o badanym urządzeniu, czyli pompie hydraulicznej o nowatorskiej konstrukcji. Jawnie sformułowano tezę pracy: obliczenia numeryczne zjawisk nieustalonych zachodzących w wysokociśnieniowej pompie wielotłoczkowej mogą stanowić skuteczne narzędzie projektowania i ulepszeń jej konstrukcji. W rozdziale 6 przedstawiono statyczne analizy wytrzymałościowe elementów pompy. W rozdziale 7 podano krótkie informacje o przeprowadzonych obliczeniach kinematycznych układu rozrządu pompy. Bardzo ważny dla rozprawy – i rozbudowany – jest rozdział 8: zajmuje on blisko połowę właściwej treści pracy i dotyczy analiz CFD. Logicznie łączy się on z rozdziałem 9, w którym opisano wyniki testów obliczeniowych dotyczących skoków ciśnienia w układzie pompy powstających podczas jej pracy i sposobów ich zmniejszenia. Wreszcie, dosyć krótki rozdział 10 zawiera wyniki obliczeń cieplnych w zestawieniu z dostępnymi danymi eksperymentalnymi. W rozdziale 11 zamieszczono podsumowanie rozprawy.

2. Szczegółowa ocena pracy oraz uwagi i pytania do Doktoranta

Rozprawę czyta się dosyć dobrze, chociaż wiele fragmentów napisanych jest w formie raczej surowej, bardziej typowej dla raportu badawczego, niekiedy językiem inżyniera-praktyka. Jest to poniekąd zrozumiałe, gdyż w centrum zainteresowania Doktoranta leży innowacyjna konstrukcja „w metalu”, która na potrzeby badań została przekonwertowana do postaci komputerowego „modelu pompy” (str. 12). Bibliografia rozprawy jest umiarkowanie obszerna, obejmuje także podstawowe podręczniki i kompendia wiedzy z zakresu budowy maszyn oraz mechaniki, w tym CFD, przy czym nie wszystkie pozycje literatury zostały zacytowane w tekście pracy. Odczuwa się brak odwołań do specjalistycznych publikacji w czasopiśmie dotyczących podjętych zagadnień. Z drugiej strony badania typu *competitive research* są mniej chętnie publikowane, gdyż często powstają we współpracy jednostek naukowych i firm przemysłowych, albo wręcz w działach badań i rozwoju tychże firm. Lektura w wielu miejscach wzbogaca wiedzę techniczną czytelnika, docenia się przy tym erudycję Autora z zakresu projektowania, konstrukcji i technologii budowy maszyn oraz jego duże doświadczenie inżynierskie. Przy tym przekład na język analizy problemów właściwych dynamice płynów jest zasadniczo poprawny (zob. jednak uwagi w dalszej części recenzji).

W pierwszej części pracy (rozdziały 1-5) omówiono podstawowe cechy badanej pompy tłoczkowej i zamieszczono rysunki techniczne oraz poglądowe ilustracje; zrozumienie szczegółów działania pompy może jednak być wyzwaniem dla czytelnika o słabszej wyobraźni

przestrzennej i nieobebranego z zasadami rysunku technicznego. Uwaga 1: ta część pracy zdecydowanie zyskałaby na „opowiedzeniu interesującej historii” innowacyjnego rozwiązania, podaniu nazwisk jego twórców, ram czasowych oraz ewentualnej roli Doktoranta. Z tekstu można się domyślić, że oryginalny wkład wnieśli uczeni i inżynierowie z Zakładu Hydrauliki i Pneumatyki Politechniki Gdańskiej. Niezależnie od tego, kto był autorem nowatorskich koncepcji, najważniejsze w moim przekonaniu osiągnięcie Autora zawierające elementy nowości naukowej uzyskane w ramach przedstawianej rozprawy to stworzenie wirtualnego prototypu pompy oraz przeprowadzenie szeregu symulacji zachodzących w niej złożonych zjawisk fizycznych z wykorzystaniem zaawansowanych analiz numerycznych.

W rozdziale 6.2 omówiono podstawy metody elementów skończonych (MES); tego typu wprowadzenie jest z konieczności skrótowe – choć rozumiem intencje Doktoranta – a przy tym zawiera powtórzenia, zob. r-nia (6.2-1) i (6.2-6). W kolejnym punkcie (rozdział 6.3) do obliczeń wytrzymałościowych wykorzystany został pakiet obliczeniowy metody MES w zastosowaniu do sprzężonego zagadnienia termomechanicznego z uwzględnieniem zjawisk kontaktowych. Określono między innymi poziom naprężeń zredukowanych oraz zakres deformacji elementów układu (otwory tulei). Przeprowadzono także nieliniowe obliczenia deformacji cienkościennej membrany, pomyślanej jako element komory kompensacyjnej mającej zredukować nadmierne, chwilowe skoki ciśnienia w układzie. Uwaga 2: nie podano wprost, jakiego pakietu obliczeniowego użyto; podobne uwagi dotyczą dalszych symulacji przytaczanych w pracy: jakiego pakietu użyto do obliczeń CFD? jakiego do obliczeń termicznych? Wskazane byłoby zamieszczenie w spisie literatury odniesienia do dokumentacji odpowiednich pakietów. Co więcej, nie zawsze podano wystarczające informacje o użytych modelach obliczeniowych, a jest to jeszcze istotniejsze niż nazwa komercyjna oprogramowania. Nieściśle jest też (dlaczego?) użycie zbitki pojęć MES/CFD (str.11).

Rozdział 7 zawiera obliczenia kinematyczne wielociałowego (wieloczołowego) układu brył sztywnych stanowiących elementy pompy. Uzyskano interesujące wyniki, między innymi dla przebiegów czasowych przyspieszenia i prędkości okna tulei (*nota bene:* nie „tuleji”); przytoczono także (rys. 58 i 60) wyniki badań na stanowisku. Uwaga 3: nie podano jednak, w jaki sposób przeprowadzono badania eksperymentalne i jaka była ich dokładność: odczytane z rysunków maksymalne wartości przyspieszenia znacznie się różnią – czy brak tłumienia w modelu jest wystarczającym wyjaśnieniem?

Rozdział 8 rozpoczynają bardzo podstawowe informacje z zakresu mechaniki płynów, łącznie z pojęciem pochodnej materialnej („materialowej”), wyprowadzeniem równań zachowania z ich formy całkowej, a także wyprowadzeniem równania Bernoulliego. Uwaga 4: uważam, że tak przytoczone informacje nie mają racji bytu w rozprawie doktorskiej, tym bardziej, że występują w nich błędy rzeczowe. Przykłady: dlaczego sformułowanie Eulera jest „modelem zachowawczym”, a sformułowanie Lagrange’a – nie?; w r-niu (8.2.1-13) powinna wystąpić objętość płynna, a nie kontrolna („kontrolowana”); notacja e vs. E oraz λ vs. k_{eff} ; r-nie (8.2.1-22) i równanie w linii poniżej są niepoprawne; w r-niu (8.2.3-1) występuje wektor (?) prędkości; równanie (8.3.2-1) modelu S-A nie opisuje lepkości molekularnej lecz turbulentną itd. Informacje o równaniach dynamiki przepływu zostały przyjęte z różnych źródeł w sposób niestety nie dość przemyślany, tak w zakresie pojęć, jak i notacji; w konsekwencji na przykład mowa o „rozpraszaniu wiskotycznym” oraz „tłumieniu lepkim”, a tensor naprężenia oznaczany jest różnie w różnych równaniach (τ , σ). Owszem, można na wstępie do analiz CFD z zastosowaniem metody objętości skończonych (MOS) podać – pamiętając o stosownym cytowaniu – rozwiązywany układ równań różniczkowych w postaci zachowawczej, natomiast przytaczanie szczegółów co do sposobu dyskretyzacji strumieni w MOS (str. 79) uważam za niepotrzebne w pracy, w której *solver* CFD jest narzędziem, a nie obiektem badań.

Bardzo interesujące są analizy CFD przebiegów ciśnienia w układzie i ich zestawienie z wynikami eksperymentu ([31], [34]), obcego, jeśli dobrze rozumiem – Doktorant podaje „wykonano serię pomiarów” (? , str. 82). Uwaga 5: w tym miejscu pracy (zob. np. rys. 92) przydałaby się dyskusja o możliwym poziomie błędu, tak pomiarowego, jak i obliczeniowego, a nawet próba jego oszacowania poprzez obliczenia z innym krokiem czasowym lub w innej rozdzielczości przestrzennej.

Bardzo ciekawe są także analizy wpływu komory kompensacyjnej oraz kanałów/otworów kompensacyjnych, w tym uwzględnienie możliwości wystąpienia lokalnej kawitacji i przepływu wielofazowego. Nawet jeśli modele kawitacji nie są doskonałe, to uzyskane wyniki ilustrują możliwości współczesnej CFD w zakresie analizy zjawisk trudno dostępnych w eksperymencie. Analizy przecieków w szczelinach smarnych dokonano w rozdziale 8.5; zastosowano przy tym uproszczony model przepływu lepkiego oparty na znanych rozwiązaniach analitycznych oraz rozwiązanie metodą różnic skończonych równania Reynoldsa z hydrodynamicznej teorii smarowania, preferowane w stosunku do użycia 3D modelu CFD („modelu globalnego”) z uwagi na niewspółmierność rozmiarów występujących szczelin. Takie pomysłowe podejście pozwoliło na skuteczne wyznaczenie przepływu w szczelinie między zukosowanym tłoczkiem a tuleją.

W rozdziale 9 zaprezentowano wyniki obliczeń FSI z jednostronnym sprzężeniem (od płynu do ciała stałego), które wykazały stosunkowo niewielki wpływ zaproponowanego rozwiązania z membraną i komorą kompensacyjną. Uzyskano natomiast znaczący efekt obniżenia maksymalnych skoków ciśnienia w układzie poprzez zmiany w konfiguracji otworów kompensacyjnych (liczba, powierzchnia przekroju). Wyniki te są przekonujące.

W rozdziale 10, na tle dostępnych wyników eksperymentalnych dla procesu zimnego rozruchu pompy z mogącą wystąpić w tej fazie niebezpieczną redukcją luzów, przeprowadzono symulacje CFD z uwzględnieniem sprzężenia termicznego (CHT). Po pewnym dostrojeniu modelu (potrzebna z zewnątrz informacja o gęstości strumienia ciepła powstającego wskutek tarcia elementów układu), uzyskano dość dobrą zgodność przebiegów czasowych temperatury w wybranych punktach układu. Przyjęty model okazał się jednak nie dość rozbudowany, by wiarygodnie oszacować poziom luzów.

Podsumowując, znaczącym i dobrze udokumentowanym osiągnięciem Doktoranta jest przeprowadzenie wieloaspektowych analiz numerycznych w zakresie zagadnień mechaniki o różnym stopniu trudności: od współcześnie dobrze opanowanych badań wytrzymałościowych z użyciem metody elementów skończonych w obszarze liniowej sprężystości, poprzez analizy termiczne, uproszczone modele ruchu filmu cieczowego właściwe teorii smarowania, aż po złożone analizy przepływu turbulentnego z użyciem narzędzi obliczeniowej mechaniki płynów (CFD) zawierających modele turbulencji i kawitacji w zadaniach inżynierskich o dużej złożoności geometrycznej. Na podstawie uzyskanych wyników szczegółowych, w rozdziale 11 podsumowano zalety i możliwości wirtualnego modelu pompy wysokociśnieniowej, podając przy tym propozycje w kierunku ulepszenia jej konstrukcji.

Proszę Doktoranta o odpowiedź pisemną na sformułowane w recenzji uwagi rzeczowe i pytania, a zapewne także o odpowiedź ustną na wybrane kwestie podczas obrony.

Od strony redakcyjnej rozprawa zawiera szereg niedoskonałości. Jak wspomniano przy ocenie szczegółowej, wprowadzenia teoretyczne do wybranych zagadnień, np. MES czy równania przepływu, nie zawsze są istotne dla zrozumienia dalszej treści. Co gorsza, w tych wprowadzeniach zaczerpniętych z różnych źródeł literaturowych zdarzają się niespójności nazewnictwa, oznaczeń, a niekiedy wręcz błędy. O ile Komisja Doktorska uzna to za celowe, może zwrócić się do Doktoranta o usunięcie usterek redakcyjnych, a zwłaszcza błędów rzeczowych, mogących wpływać na zewnętrzny odbiór pracy. Zmiany te podniosłyby także

wartość rozprawy jako materiału źródłowego. Alternatywnie, celowe może być przygotowanie przez Doktoranta ulepszonej wersji rozprawy, uwzględniającej uwagi zawarte w recenzjach oraz podczas dyskusji na publicznej obronie i wydanie jej – z pewnymi skrótami – w postaci Zeszytu Naukowego. Natomiast z mojego punktu widzenia usterki redakcyjne ani błędy rzeczowe (występujące głównie w części teoretycznej, a nie w opisie własnych osiągnięć) nie utrudniały zasadniczo lektury, ani też nie wpływały na możliwość rzetelnej oceny oryginalnego wkładu Doktoranta i uzyskanych przezeń wyników.

W razie potrzeby chętnie przekażę do wykorzystania egzemplarz rozprawy z wszystkimi zaznaczonymi uwagami redakcyjnymi. Dla porządku zamieszczam poniżej jedynie listę ważniejszych, powtarzających się błędów tego typu:

- a) w wielu ważnych fragmentach tekstu brak odniesień do literatury, np. początek rozdz. 4.2, procedury Newmark-beta i Houbolta (str. 44), modele kawitacji Singhal i ZGB (str. 96-97);
- b) numery porządkowe rysunków i odwołania do nich różnią się niekiedy o 1; nie dostrzegłem odwołania w tekście pracy do niektórych rysunków (np. 23-29, 61-62, itd.);
- c) podpis pod rys. 5 (pompa PWK): czy obce cytowanie [34] jest tu poprawne? Ponadto (ostatnia linia na str. 19), warto zacytować odpowiednie patenty.
- d) zalecany sposób zapisu wielkości wymiarowych: „1_mm” raczej niż „1mm”, itd.
- e) poprawny sposób zapisu liczb rzeczywistych: $2.54 \cdot 10^{-3}$ zamiast 2.54e-3, itd.
- f) częste są w tekście niepotrzebne przejścia do nowego wiersza, np. str. 10, linia 12/13;
- g) $f(\varphi) = \varphi^{2.5}$ to funkcja potęgowa a nie wykładnicza (kilkukrotnie w tekście);
- h) występują w pracy rysunki z opisami angielskimi (np. rys. 4 i 121) – dobrze byłoby podać tłumaczenia przynajmniej w podpisie;
- i) niestaranności redakcyjne typu brak fragmentu tekstu (str. 58/59), zakryty podpis (rys. 17), treść rysunków czytelna słabo (67-68, 75-76) bądź wcale (111);
- j) r-nia (8.5.4-5) i (8.5.4-7) są niepoprawne (czynnik 2, zgodność wymiarowa);
- k) spis literatury: przy wielu pozycjach brakuje szczegółowych danych (rok wydania itd.); pozycji bibliografii jest naprawdę 55, gdyż 24 i 25, 28 i 37, 29 i 43 oraz 30 i 39 są tożsame.

3. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa rzetelnie dokumentuje szeroko zakrojone i przeprowadzone przez Doktoranta badania. Mają one w głównej części charakter analiz numerycznych. Praca dowodzi dogłębnego zrozumienia istoty działania analizowanego układu nowatorskiej pompy hydraulicznej i zachodzących w nim zjawisk dynamicznych. Doktorant wykazał się umiejętnością interpretacji wyników symulacji numerycznych w połączeniu z wiedzą inżynierską o badanym urządzeniu i jego pracy.

Tekst rozprawy opisuje rozwiązanie problemu badawczego, potwierdza wiedzę teoretyczną Doktoranta w zakresie analizowanych zagadnień oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań. Opiniowana praca spełnia zatem oczekiwania stawiane zwyczajowo rozprawom doktorskim, a także wymagania artykułu 13 ust. 1 obowiązującej Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym i może stanowić podstawę do ubiegania się mgra inż. Tomasza Zawistowskiego o nadanie mu stopnia doktora nauk technicznych.

