

Gdańsk, 12.11.18

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Doroty Homy pt.
„Eksperymentalne i numeryczne badanie zjawiska kawitacji
Dla różnych warunków przepływu”.**

1. Motywacje

Kawitacja jest spontaniczną przemianą fazową indukowaną „naprężeniowo”. Spontaniczność przemiany rozumiana jest też w literaturze jako stan głębokiej nierównowagi termodynamicznej, czy też jako zjawisko „nagłego” przejście ze stanu metastabilnego w stan dwufazowy. Podczas tego przejścia wydziela się ukryte ciepło przemiany fazowej i ukryta praca przemiany fazowej. Zjawisko kawitacji, zwłaszcza ciepłej wody ma swój symetryczny odpowiednik w spontanicznej kondensacji pary wodnej, stąd, często, badacze zajmujący się spontaniczną kondensacją pary, przerzucają swe doświadczenie i swoje narzędzia badawcze na grunt kawitacji wody. Jest to, z termodynamicznego punktu widzenia operacja dozwolona, pod warunkiem, że będziemy pamiętać, że przenosząc modele matematyczne z jednej fizyki na inną, musimy dokonywać symetrycznej zamiany. Do grona tych badaczy zalicza się również prof. Wróblewski znany w środowisku z racji swoich osiągnięć w modelowaniu spontanicznej kondensacji.

Stojąc na gruncie ogólnej teorii przejść fazowych, opracowanych przez Volmera, Hertza, Knudsen, Beckera, Döring, Stodolę, Tolmana, Deicha, Gyarmathy'ego, Oswatischa i innych jeszcze w latach 30-dziestych ubiegłego stulecia, zgadzamy się, że rozwój nowej fazy kosztem fazy macierzystej, w przejściach fazowych indukowanych naprężeniowo, niezależnie od tego czy są to przejścia fazowe tylko w obrębie ciała stałego, ciała płynnego, czy też inne przejścia fazowe ze zmianą stanu skupienia, opisywany jest skomplikowanym układem **nieliniowych równań różniczkowo-całkowych** wewnątrz obszaru i analogicznymi równaniami na powierzchni styku płynu i materiału kanału. Pamiętam wysiłki profesora G. Schnerra, aby jedno nielokalne w przestrzeni równanie ewolucji fazy gazowej w kawitacji przedstawić w formie czterech lokalnych hierarchicznych równań różniczkowych. Posiłkował się tu analogią do czterech równań Hilla opisujących nielokalność homogenicznej spontanicznej kondensacji. Po szeregu nieudanych prób, zrezygnował z trzech równań w koncepcji Hilla i pozostał ostatecznie przy jednym – stąd jako wyraz rezygnacji powstał ułomny model – dziś nazywany dumnie modelem Schnerra-Sauera.

Trzeba przyznać, że w okresie naszej współpracy z prof. Schnerrem, w latach 90-tych, gdy wielokrotnie spotykaliśmy się w Karlsruhe i Gdańsku powstało jeszcze wiele innych, kompletnych i termodynamicznie spójnych modeli kawitacji. Były one spójne również z teorią fal uderzeniowych jak też z koncepcją indukowanej turbulencji. Co więcej, ważniejszą wtedy była dla nas turbulencja indukowana przejściem fazowym niż przejścia fazowe indukowane istniejącą turbulencją. Wszystkie te modele, miały tą cechę [wadę], że nie podpadały pod schemat paradygmatu narzuconego nam przez ówczesne komercyjne kody „CFD” – wtedy budowaliśmy od początku własne programy obliczeniowe do własnych modeli, co było przeszkodą w ich dołączeniu do kodów komercyjnych i wykonywania symulacji w jednym dużym urządzeniu – np. kompletnej pompy jaką symuluje w przedostatnim rozdziale rozprawy Doktorantka.

Stąd główną przeszkodą aplikacyjną stała się implementowalność autorskich modeli do kodów komercyjnych – dziesiątki zasadnych modeli opisujących ważne szczegóły zjawisk musiały pójść do lamusa metod analitycznych, bowiem w kodach CFD można było implementować tylko proste, jeśli nie prostackie, algebraiczne domknięcia – szczęśliwie, model Schnerra-Sauera był na tyle uproszczony, że nadawał się do implementacji w kodzie komercyjnym opartym na dyskretyzacji metodą objętości skończonych pierwszego rzędu [w której nie można realizować pochodnych przestrzennych wyższego rzędu]. Z radością dowiaduję się, że tematyka niestacjonarnej kawitacji nie całkiem szczyła (nasza z Gdańska przeszła do Olsztyna) i jest przedmiotem zainteresowania promotora prof. Włodzimierza Wróblewskiego oraz rozprawy doktorskiej Pani Doroty Homy.

We współczesnych urządzeniach energetycznych kawitacja już nie występuje. Chociaż, producenci poszczególnych urządzeń dawno temu opanowali zarówno kondensację jak i kawitację, to nie zawsze czynili to w pełni świadomie. Stąd temat badań eksperymentalnych i numerycznych jest wciąż aktualny, zwłaszcza w kontekście całkowicie nowych, jeszcze nierozpoznanych urządzeń.

2. Ogólne wrażenie po przeczytaniu Rozprawy

Praca doktorska Pani Homy dotyczy klasycznej lecz ważnej tematyki, która, co jakiś czas, powraca i jest rozwijana intensywnie na świecie. Należy wyrazić uznanie, że to Politechnika Śląska, Katedra Maszyn Energetycznych, jest prekursorem badań *stricte* naukowych na tak wysokim poziomie. Daje to, badaczom Śląskim, szerokie możliwości współpracy naukowej jak i zdobywania środków na tą tematykę.

Szczególnie duże wrażenie wywarło o na mnie wdrożenie optycznej metody pomiarowej, oraz implementacje modelu Schnerra-Sauera. Uruchomienie metody szybkiej kamery stwarza nowe zakresy prac badawczych w zespole prof. Wróblewskiego, które będą prowadzone jeszcze przez wiele lat. Już sam ten fakt daje podstawy do dobrego doktoratu. Należy podkreślić, że jest to jedyny ośrodek w kraju mogący wykonywać tego typu pomiary.

W pracy przedstawiono niebagatelne i nietrywialne wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych aż trzech, zupełnie odrębnych, zagadnień, których jedyną wspólną cechą jest

występowanie kawitacji. Wrażenie robi również kompletność potraktowania zagadnienia nie mająca swego odpowiednika w literaturze.

3. Sformułowanie zagadnienia

Sformułowanie zagadnienia i wyznaczenie celu badań zwykle proponuje promotor – czyni to mając na uwadze pewien horyzont czasowy, dotychczasowe doświadczenie zespołu, narzędzia pomiarowe i obliczeniowe swojej placówki. Cel rozprawy jest, w intuicji promotora, związany z zakresem prac – zwykle cel składa się z kroków i etapów tak dobranych aby uwzględniać możliwości twórcze i zapał doktoranta.

Zdarzają się prace wyjątkowe, gdy w toku współpracy i opieki nad doktorantem zakwita jego talent, w wyniku czego doktorant otrzymuje wciąż nowe i coraz bardziej interesujące wyniki. Cóż ma robić promotor gdy doktorant posiada materiał na trzy rozprawy, a wciąż nie osiąga swego własnego celu jakim jest: „poczucie się dobrym specjalistą” i stan wewnętrznej kompletności.

Mam wrażenie, że podobnie jest z rozprawą Doktorantki – można w niej wyróżnić trzy tematy, opracowane w rozłącznych rozdziałach – każdy z nich z powodzeniem stanowi osobny doktorat. Tak więc rozdziały 5 i 6-ty dotyczą kawitacji nad profilem, rozdział 7 dotyczy sterowania kawitacją za pomocą wtrysku powietrza, rozdział 8-my dotyczy badań kawitacji wody w rzeczywistej pompie promieniowo-osiowej. Trzeba również pamiętać, że w dawnych czasach, badania eksperymentalne, wykonane w rozdziale 5-tym, też byłyby osobnym doktoratem. Można więc w rozprawie widzieć wyniki nawet czterech doktoratów. Współczesne łączenie eksperymentów z numeryką bierze się z faktu, iż narzędzia badawcze, zarówno eksperymentalne jak i obliczeniowe są dziś w dużym stopniu gotowe i skalibrowane.

Odtwarzając motywację i cel rozprawy - pracę możemy usytuować następująco: **Rozprawa podejmuje klasyczny temat pewnego niekontrolowanego (spontanicznego) zjawiska towarzyszącego przepływowi w urządzeniach i maszynach przepływowych i bada te zjawisko w tradycyjnie zaprojektowanych stanowiskach laboratoryjnych ale przy pomocy współczesnych narzędzi badawczych.** Mamy tu więc milczące założenie, że nowe, skomplikowane i drogie narzędzia pozwolą, dokładniej niż narzędzia używane dwadzieścia lat temu zbadać naturę zjawiska kawitacji. Ale można też motywację ująć inaczej, że „nie powtarzamy badań z przed dwudziestu lat tylko dlatego, że nie potrafimy dziś posługiwać się, tamtymi specjalnie opracowanymi i dedykowanymi narzędziami badawczymi”. W moim przekonaniu – szkoda - bo były to narzędzia o dużo większym potencjale badawczym.

Jest w Rozprawie pewnego rodzaju aspekt badań, który może się podobać. Chodzi o numeryczne uchwycenie pulsacyjnego przemieszczenia się w do przodu i tyłu narastającego i zapadającego się obłoku pęcherzy parowych. Analogiczne zjawisko, ale nie do końca symetryczne, mamy w kondensacji pary przechłodzonej. Przykładowo, na odbywającej się w 1967 roku Konferencji „Turbiny Wielkich Mocy” w Gdańsku tym zagadnieniem dedykowano aż 16-cie referatów [dostępne są one na stronie *Transactions IFFM*]. Badania teoretyczne nad wspólnymi podstawami tej „niestacjonarności przejścia fazowego” jeszcze dziś są poważnym wyzwaniem badawczym [o wadze habilitacji a nawet profesury].

Reasumując, w Rozprawie Doktorantki, która obejmuje tematykę czterech doktoratów, naturalna jest rzucająca się w oczy kompletność – Doktorantka ma ambicje zastania badaczem kompletnym – najlepszym aktualnie w kraju specjalistą badań eksperymentalnych i numerycznych w dziedzinie szerokokorozumianej kavitacji. Taki też zwykle jest cel społeczny doktoratu – musimy odmładzać kadrę specjalistów, którzy nie tylko odtwarzają ale i dodają nowe aktualne zadania. Słowa uznania należą się również promotorowi prof. Włodzimierzowi Wróblewskiemu i dr. Grzegorzowi Peczkisowi – promotorowi pomocniczemu. Doktorantka, napędzana ambicjami ale i otoczona opieką promotorów, wykonała olbrzymią, jeśli nie tytaniczną, pracę a następnie znalazła jeszcze dość sił aby w niezwykle przejrzysty i kompetentny sposób przedstawić ją w formie pisanej w Rozprawie.

4. Zawartość Rozprawy

Zachęcam do lektury rozprawy doktorskiej Pani Doroty Homy. Jest napisana dojrzałym językiem, jej treść przedstawiona jest w sposób zwięzły ale i wyczerpujący. Sercem przekazu są rysunki, wykresy i tabele, staranie dobrane, pokazujące od razu sedno sprawy. Rysunki są tak czytelne nie potrzeba odnosić się do tekstu, można czytać rozprawę „po profesorsku” czyli tylko same wykresy i rysunki. Może tylko tabele 5.4-5.6 zmuszają czytelnika do gmerania w tekście aby dowiedzieć się co to jest „częstość falownika” – lepiej gdyby było: „objętościowy strumień wody”.

Zawartość rozprawy jest wzorcowa – jej napięcie i trudność wzrasta w miarę czytania. „Wprowadzenie” jest doskonale skomponowane – zawiera główne pojęcia i definicje używane przez Doktorantkę. Udaje się jej przekazać swe motywacje, tradycję tej branży oraz otwarte problemy. Estetyka wzorów rysunków i tekstu sprawia, iż nawet obojętnie nastawiany badacz ma silne wrażenie piękna tej branży wiedzy.

Pierwsze dwa właściwe rozdziały to przeglądy – **rozdział 3 dotyczy metod eksperymentalnych** i benczmarkowych stanowisk zbudowanych w europejskich i amerykańskich laboratoriach. Przyjęto konwencję „od najtańszych do najdroższych” przyrządów pomiarowych. Osobiście wolałbym taki przegląd w którym klasyfikuje się problemy i odkrycia zjawisk. Przegląd Doktorantki nie jest przeglądem krytycznym bo często eksperymentatorzy odkrywają zjawiska za pomocą mało do tego nadających się przyrządów. Krótko mówiąc, przed przystąpieniem do eksperymentowania trzeba mieć wiedzę o tym co chcemy odkryć – jeśli to są, przykładowo struktury oderwaniowe przepływu indukowane przejściem fazowym to w ruchomej łopatkę trzeba umieścić np. układ pomiarowy pól temperatury i ciśnienia.

Należy pamiętać, że badania eksperymentalne są „ciemną stroną nauki”. Każdy eksperyment, jeden mniej a drugi więcej, jest zarówno uproszczeniem jak i wypaczeniem rzeczywistości. Jest on również emanacją tego „jak eksperymentator wyobraża sobie rzeczywistość”. Liczby, które on mierzy bez fizycznej interpretacji są „pustą algebrą” – sztuką liczenia baranów. Należy więc *ex definitione* krytycznie interpretować wykresy eksperymentatorów – najczęściej pod kątem, czy mierzą one „wielkość fizyczną”, która, w swej naturze, nie jest wcale mierzalna.

Rozdział 4 dotyczy metod numerycznych - wąsko ograniczonych do komercyjnego CFD. Czytelnik nie może wyrobić sobie poglądu, dlaczego mamy aż tyle modeli obliczeniowych – ta lawina modeli nie wiadomo czemu służy, niepotrzebnie budzi wątpliwości co do ich fizycznego sensu i zakresu ważności. Nie znajdujemy komentarzy Doktorantki, które z modeli są eksperymentalnie potwierdzone, a które mają szerszy potencjał aplikacyjny. Przegląd modelowania turbulencji w przepływach podlegających przejściu fazowemu jest wykonany ze specyficznego punktu widzenia – jest to punkt widzenia zakładający, że turbulencja rozwija się w swój własny autonomiczny sposób i w ogóle nie odczuwa zachodzącej w płynie przemiany fazowej. Przykładowo, równanie ruchu kropli, chociażby równanie Hadamara-von Rybczyńskiego [do którego w IMP mamy duży sentyment] w przypadku gdy w jednym centymetrze sześciennym mamy około 10^6 pęcherzy, determinuje zarówno turbulentny transport masy, jak i pędu oraz entropii – a nie odwrotnie.

Doktorantka koncentruje się na turbulentnym transporcie pędu pomijając milczeniem turbulentny transport energii [entropii], który akurat w przypadku kawitacji ma niebagatelne znaczenie.

Opinia doktorantki dotycząca DNS może niektórych doprowadzić do „szewskiej pasji”. Otóż jest to *explicite* wyrażona myśl, że przyrodę możemy modelować dokładniej gdy tylko weźmiemy gęściejsze siatki dyskretyzujące. Nie wszyscy się z tym godzą – niektórzy uważają że nowe zjawiska można modelować tylko za pomocą nowych dedykowanych modeli a nie za pomocą starych modeli tyle, że o „gęściejszej siatce dyskretyzacyjnej”. Jak się ma wymiar siatki do wymiaru pęcherza? – to pytanie rozбивa koncepcję DNS w „drobny puch”.

Podobnie, klęcząc na kolanach, pisze Doktorantka o LES. Zapomina, że są jeszcze na świecie badacze turbulencji, którzy zarówno DNS jak i LES uważają za numeryczne „wytrychy” pozbawione porządnym fizycznych podstaw. Całe szczęście są również badacze, którzy zachowują krytycyzm do tego rodzaju numerycznych zabaw jakie proponują komercyjne kody CFD.

Rozdział 5 dedykowany jest przedstawieniu eksperymentu kawitacji nad profilem. Stanowisko badawcze zbudowano w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych P. Śląskiej w Gliwicach – jest to niewątpliwy akt twórczy bez którego krajowa nauka nie może być autonomiczna i stanie się li tylko odtwórcza.

Niezwykle wysoko trzeba ocenić prawdziwość badawczą jaką przedstawia rys 5.3 pokazujący szczegóły konstrukcyjne dołączenia [poprzez kolanka] do okrągłych kanałów przepływowych komory pomiarowej o przekroju prostokątnym. Eksperymentatorzy zwykle milczeniem okrywają tę część stanowiska badawczego – i milczą na temat pomiaru temperatury, ciśnienia, strumienia masowego, wykonywanych w określonym punkcie kanału. Czy koncepcja zastąpienia kanału kołowego kanałem prostokątnym o tym samym polu powierzchni jest naprawdę zasadna?

Kąt natarcia łopatki o profilu Clark Y 11.7 [istnieją w literaturze dane eksperymentalne] zmienia się od 0 do 20° co pozwala osiągać prędkość przepływu wody na wlocie do kanału od 8 do 18 m/s. Badania przeprowadzono dla kątów nachylenia 0, 2,4,6,8,10°. Stosowano niskie ciśnienia wlotowe od 65 do 50 kPa i temperaturę rzędu 17.5°C .

Najpierw struktury kawitacyjne fotografowano z prędkością 50 klatek na sekundę ale ta rozdzielczość nie zadowoliła eksperymentatorów i zmieniono urządzenie na kamerę rejestrującą z prędkością 52,5 tys klatek na sekundę z „potężną rozdzielczością” zezwalającą na zobaczenie każdego pęcherzyka. Można było oglądać widoki z boku kanału jak i z góry. Dzięki tak wrażliwym instrumentom odkryto oscylacje struktury obłoku kawitacyjnego – okres pulsacji wynosił kilkanaście milisekund. Widoki z góry pokazały, że jedna ze ścianek jest „bardziej preferowana” przez pęcherze – mimo geometrycznie symetrycznego kanału [nie był jednak symetryczny materiał kanału bo część w której umieszczona jest łopatką jest wydrukowana razem z łopatką].

Kluczowy rezultat – odkrycie trzech nowych struktur kawitacyjnych Doktorantka przedstawiła na wykresie na rys 5.18. Pokazuje on jak owe trzy struktury (kawitacja częściowa, kawitacja chmurowa, kawitacja superchmurowa tworzą mapę obszarów na diagramie: „liczba kawitacji – kąt natarcia łopatką”. To wartościowy rezultat – jeden z najważniejszych w rozprawie. Szkoda, jednak, że Doktorantka nie pokazała pierwotnego diagramu, na którym nanoszone są „surowe” wymiarowe wielkości pomierzone, jakim jest „strumień objętościowy – kąt natarcia”. Użycie ciśnień w liczbie kawitacyjnej zaciemnia obraz ponieważ, jak wskazuje tabela 5.2, ciśnienia wcale nie rosną w miarę jak wzrasta objętościowy strumień przepływu.

Co więcej, jak na dłoni widać, że **liczba kawitacyjna** jest dość marną miarą wystawioną do reprezentowania tego zjawiska. Może lepszy byłby „**sumaryczny stopień suchości**”- taki parametr Doktorantka, nieśmiało acz wyraziście, wprowadza w innych rozdziałach.

Rozdział 6 dedykowany jest modelowaniu numerycznemu powyższego eksperymentu. Nadzieję budzi fakt, iż Doktorantka dystansuje się od „komercyjnego CFD” [które nie jest nauką a komercyjną sztuką] i rozwija własne podejście w środowisku „Open-FOAM”. Implementuje trzy modele kawitacji: Kunza, Schnerra-Sauera i Merkle. Układ równań opisujących, po dyskretyzacji MOS-em, jest rozwiązywany, w myśl własnego pomysłu, w dwóch pętlach iteracyjnych: w dużej pętli ciśnieniowej (PISO) i w mniejszej pętli źródłowej – ta ostatnie jest silnie nieliniowa sama w sobie - pętla źródłowa z kolei słabo jest sprzęgnięta z głównym równaniem masy, pędu i energii.

Doktorantka prowadziła obliczenia zarówno w przepływie płaskim (2D) i przepływie trójwymiarowym (3D) uwzględniającym tarcie o rzeczywiste powierzchnie boczne kanału i niekulisty kształt obłoku. Nie mogła zweryfikować na głębszym poziomie dokładności dyskretyzacji, bowiem w eksperymencie nie prowadzono pomiarów ciśnienia i temperatury na powierzchni łopatką. Stąd konieczność odniesienia się do „cudzych” - mało wiarygodnych danych (rys. 6.2). My wszyscy, którzy uczestniczymy w publikowaniu danych eksperymentalnych, wiemy z jaką ostrożnością należy podchodzić do „cudzych” wyników – ile jest w nich najróżniejszych „wyciszeń”, „dowolnych danych referencyjnych”, „ukrytych wymiarów”, etc.

Już testując siatki dyskretyzacyjne i kalibrując model, Doktorantka, odrzuca „Liczbe kawitacyjną” jako nie nadającą się do Jej celów – w to miejsce wprowadza „objętościowy udział pary wodnej” – bowiem liczba kawitacyjna jest wyliczana na stacjonarnym wlocie i nie

oddaje niestacjonarnego charakteru przemiany fazowej. Rys 6.4 pokazuje natomiast jak zmienia się w czasie proponowany przez Doktorantkę integralny parametr jakim jest objętościowy udział pary. Podkreślmy, nie jest to stopień suchości w jakimś jednym punkcie nad łopatką, jest to parametr integralny na całą powierzchnię przekroju. Porównanie 3D i 2D pokazuje, że jest to parametr brany w którymś z 10-ciu możliwych przekrojów siatki 3D. Szkoda, że nie starczyło Doktorantce odwagi na określenie tego parametru konkretną liczbą np. „duże Ho ” - w swojej mozolnej pracy nad rozwojem badawczym doktorantów, często ich zmuszam do wprowadzenia nowego oznaczenia czy też do obmyślenia nowego pojęcia – bez tego nie ma namacalnego postępu w naukach przyrodniczych.

Podkreślić trzeba wysiłki Doktorantki w obrazowym przedstawieniu struktur obłoku kawitacyjnego przybliżających się do obrazowania otrzymanego z kamery. Rys 6.5 i 6.7 są przykładem dbałości Doktorantki o zwizualizowanie możliwości modelowania, które wychwytuje niestacjonarność przemiany kawitacyjnej – natomiast wykres 6.8 jest jądrem badań numerycznych Doktorantki godnym najlepszych światowych journali.

Krytyczne słowa należą się rozdziałowi **6.3 wybór modelu kawitacji**. Jest to osobne zagadnienie – mało tu pasujące do pięknego celu doktoratu. Sama doktorantka również tak uważa bo pisze: „Osobnym zagadnieniem w prowadzonych badaniach był wybór do obliczeń modelu kawitacji”. W jakim celu taki wybór jest prowadzony – sam fakt, iż chcemy wybierać może sugerować czytelnikowi, że „coś jest z modelami nie w porządku” albo „nie mamy do nich zaufania”. Pamiętam swoją krytykę jednego z doktoratów w IMP, polegającego na tym, że doktorant wykonał obliczenia przepływu wody nad łopatką za pomocą 17 modeli turbulencji i, co gorsza, porównywał je między sobą, o zgrozo, na jednym wykresie. Uważam, że opracowanie nowego modelu kawitacji dla adekwatnego nowego zjawiska ma sens ale porównywanie trzech modeli opisujących trzy różne zjawiska, na przepływie w którym występuje czwarte nowe zjawisko, już sensu badawczego nie ma.

Odwrotnie, to co robi Doktorantka w **rozdziale 6.5 przebiegi zmian podstawowych parametrów**, domaga się niezwykle pozytywnej oceny. Otóż moja najwyższa ocena bierze się stąd, iż Doktorantka intuicyjnie trafia na *terra incognita* – obszar rozumowań między teorią a eksperymentem do którego nie dochodzą ani pracujący nad modelami ani eksperymentatorzy. Teoretycy wyprowadzają swe modele na bazie „pojęć pierwotnych” – *ens rationis* – ale prawie nigdy nie podają sposobów na pośrednie pomierzenie wprowadzanych przez siebie pojęć. Standardowym przykładem są dwa pojęcia pierwotne mechaniki Newtona: masa i siła. Gdyby nie koncepcja Wallisa pośredniego określania eksperymentalnego „siły” [poprzez pomiar przyspieszenia] model Mechaniki Newtona byłby dalej tylko swoistą hipotezą a w nauce obowiązywała by dalej grecka Termodynamika Arystotelesa.

Innymi słowy, Doktorantka wymyśla i pokazuje numeryczne przebiegi, nowych parametrów modelowych, jako propozycja dla eksperymentatorów aby je później pomierzyli. Być może Doktorantka zgadza się nawet z poglądem, że eksperymentatorzy nigdy nie wiedzą co mierzą, a dopiero teoria wskazuje im co tak naprawdę robią. Stąd niezwykle ważne jest aby w przygotowaniu eksperymentu brał udział teoretyk - wtedy jest szansa, że jakieś modele zostaną potwierdzone a jakieś pogrzebane na cmentarzu historii. Dobitym przykładem jest budowa laboratorium LHC w CERN-ie od razu nakierowana na odkrycie bozonu Higgsa, który

jest wyjątkową wielkością teoretyczną. Dlatego teoretyczne przebiegi pokazane na rys 6.18 i 6.19 oceniam tak wysoko.

Rozdział 6.7 Porównanie eksperymentalnych i numerycznych obrazów struktur [kawitacyjnych] mógłby z powodzeniem być ostatnim rozdziałem rozprawy – zawiera podsumowanie tego co mogą dać nam z jednej strony eksperymenty a z drugiej symulacje modelowe. Ważne jest Doktorantka chce doszukiwać się rzeczy wspólnych – które uznaje za prawdę przyrodniczą – ma świadomość tego, że istnieją dziesiątki szczegółów eksperymentalnych jeszcze nie potwierdzonych przez modele i odwrotnie, istnieją takie wymyślne (sophisticated) szczególne modele, które jeszcze nie były obserwowane w żadnym zjawisku. Dopiero wspólne, obukierunkowe, krok po kroku, dochodzenie do prawdy, daje obraz rzeczywistości, który można zaakceptować.

Rozdział 7. Poświęcony jest badaniom wpływu powietrza na kawitację wody. Rozdział ten słusznie rozpoczyna się **wprowadzeniem** - w sposób historyczny przedstawionym. O ile w poprzednich rozdziałach Doktorantka miała „cierpki” stosunek do swych historycznych poprzedników to w tym rozdziale, pełniej i sympatyczniej wyraża się o dokonaniach badaczy idących w kierunku eliminacji hałasu kawitacyjnego poprzez przypowierzchniowy wtrysk powietrza [używa nawet nazwisk]. Doktorantka sama przeprowadziła eksperymenty na słynnym stanowisku badawczym zbudowanym w laboratorium Uniwersytetu Technicznego w Ostrawie. Tutaj miejscem gdzie następuje obniżenie ciśnienia poniżej ciśnienia nasycenia, jest dysza zbieżno-rozbieżna zezwalająca na wysokie ciśnienia na wlocie (od 3 do 1 bara). Ilość wtryskiwanego tlenu wynosiła 7.04 mg O₂ na litr wody. W tak zorganizowanym eksperymencie, mierzyło się objętość zajęta przez obłok parowy.

Doktorantka, w zasadzie, powtarza wszystkie elementy związane z eksperymentem Śląskim oraz, dodatkowo, je stasuje dla przepływu wody z tlenem.: tj. wykonuje serie eksperymentów, buduje model geometrii i dokonuje symulacji numerycznych. Dokonuje porównania oscylacji eksperymentalnych i numerycznych – tu okres oscylacji, z jakiś nieznanymi powodów, jest o rząd większy niż w badaniach Śląskich. A następnie w rozdziale 7.2 powtarza swe badania z użyciem tlenu rozpuszczonego w wodzie. Wyniki jakie Doktorantka otrzymała były na tyle zachęcające, że w **rozdziale 7.3** powróciła Ona do eksperymentu Śląskiego i dla jednego z przypadków przeliczyła wpływ udziału hipotetycznego powietrza.

Tu już pojawiły się pewno wątpliwości co do wrażliwości kroku czasowego całkowania na dokładność wyznaczania amplitud i częstości oscylacji, pojawiła się nawet nowa „moda częstości”, która nie była obecna w przepływie czystej wody. Być może ten fakt dalej sprowokował Doktorantkę do porównywania wyników kodu naukowego i kodu komercyjnego – Doktorantka odkryła liczne „fuszerki” w kodzie komercyjnym, stąd w tekście zauważyć można Jej stopniowy wzrost krytycyzmu. **Rozdział 7.4 dotyczący schematu drugiego rzędu** dokładności jest już „gwoździem do trumny” kodu komercyjnego – lata menagerskich działań właścicieli kodu sprowadziły nas użytkowników do całkowitej dezaprobaty wartości naukowych uzyskiwanych symulacji.

Rozdział 8 dotyczy powstawania rzeczywistej kawitacji w przepływach przez pompę wirową. Nie przypadkowo Doktorantka zostawiła ten rozdział na koniec pracy - wie bowiem,

że rozważane przez nią eksperymenty to zaledwie wycinek, szczególnie okrojonej rzeczywistości jaka występuje w maszynach przepływowych. Pełna atencji i badawczych obaw przystępuje do zamodelowania przepływu przez rzeczywiste urządzenie. Jej pomysł jest taki, że chce do normowego procesu projektowania pomp wprowadzić, jeszcze przed przejściem do obliczeń wytrzymałościowych, dodatkowy etap obliczeniowego sprawdzenia charakterystyk pomp, występowania zjawiska pompażu i kawitacji na podstawie zaaprobowanego modelu kawitacji. Pojawia się tu milczące założenie, wielce dyskusyjne, że model kawitacji Zawart-Gerber-Belamri, sprawdzony przez innych, na innych eksperymentach, będzie poprawnie opisywał kawitację wirnika pompy. Dlaczego Doktorantka „porzuca” swoje własne modele - tego nie wiadomo?

Niemniej, podziw budzi całościowe ujęcie problemu i moc symulacji numerycznych. Doktorantka, bez jakiegoś większego wysiłku wylicza charakterystyki pompy (rys 8.6) - co producentowi zabiera zwykle około pół roku badań. A następnie, pokazuje obszary wirnika gdzie występuje kawitacja (co eksperymentatorom zabiera kolejne pół roku). Tak więc producent dowiaduje się [szybko, relatywnie tanio ale przed wszystkim pewnie], że źle [albo dobrze] zaprojektował urządzenie. Zwłaszcza interesuje nas pewność informacji, której nie otrzymujemy przy badaniach eksperymentalnych. Niepewność eksperymentalna bierze się z konieczności przeskalowania urządzenia do rozsądnych wymiarów laboratoryjnych – niestety intuicja podpowiada nam, że kawitacja jako zjawisko nie daje się przeskalowywać.

Najwartościowszym elementem tego rozdziału jest krótki **podrozdział 8.4 dotyczący niestacjonarnej kawitacji** – Doktorantka wyznacza obliczeniowo charakterystyki akustyczne pompy których się należy spodziewać przy pomiarach rzeczywistych. Jest to otwarcie nowego, pięknego obszaru badań i nowych perspektyw budowania pomp nowych generacji.

5. Komentarze

Każdy z nas badając przyrodę, niezależnie od powinności statutowych, ma prawo do własnej opinii. Przykładowo, Doktorantka wyraża swoją niezachwianą wiarę w prawdziwość wykonanych przez siebie pomiarów, podczas gdy recenzent nie jest już taki niezłomny. Doktorantka wyraża swój podziw dla równania Rayleigha-Plesseta podczas gdy recenzent uważa, że są to równania całkowicie nieprawdziwe. Doktorantka z emfazą mówi o modelach turbulencji typu RANS czy LES, podczas gdy recenzent widzi w nich mało wartościowe i ubogie modele rzeczywistości. Dlatego przedstawiam kilka komentarzy, które pokazują pewną powierzchowność naszych rozumowań i ogrom naszej niewiedzy.

Każdy kto próbował wyprowadzić równanie Rayleigha-Plesseta wie, że nie jest to możliwe bez milczących podstawień i bezzasadnych uproszczeń fizyki zjawiska. Posłużę się tu osobistym przykładem polecenia, które 4 marca 1993 roku, wydał mi prof. Zbigniew Bilicki. Patrząc na kropki nad \dot{R} prof. Bilicki zapytał się jakiego rodzaju prędkość wchodzi w definicję pochodnej materialnej nad R . Polecił mi wyjaśnić tę sprawę. Gdy następnego dnia wyprowadzałem mu to równanie na żywo, widziałem jak topnieje nabożny Jego stosunek do Lorda Rayleigha. Gdy dowiedział się, że Lord, przy pomocy siedmiu swoich sekretarzy, pisał jedną filadelfijską pracę tygodniową niezwłocznie postanowił przejść do połowego modelowania przejść fazowych. Wtedy Jego uwaga obróciła się w stronę równania Hadamara-von Rybczyńskiego, które spełnia postulat nielokalności modelu. Pęcherze parowe

tworzą klastry – co oznacza że uwidaczniają się „sity” dalekiego oddziaływania tworzące regularne struktury. Jaka jest dynamika tych struktur np. pierścieni? Jakie są kryteria rozpadu tych struktur? Kiedy następuje koalescencja tych struktur? Jak pęcherz zachowuje się na ścianie – kiedy się odbija, kiedy imploduje a kiedy się przylepia i rządony jest mobilnością powierzchniową – Tego typu pytania zadawał mi profesor Bilicki trzydzieści lat temu.

Wiele dyskusji trzeba poświęcać: DNS – profesor Bilicki nieprzerwanie pytał o naturę turbulencji. Nie podobała mu się, że dyskretyzacja przestrzenna oraz czasowa w symulacjach DNS „musi być” dobrana w zgodzie ze skalami Kolmogorowa - tak aby „rozwiązywać najmniejsze struktury turbulencji”. Siatka obliczeniowa dla zagadnień DNS jest zazwyczaj jednorodna tak, aby najmniejsze struktury nie zniknęły ze względu na wymiar siatki. Siatka stosowana przez Doktorantkę odpowiada raczej typowym symulacjom przepływów z warstwami przyściennymi.

W moim pojmowaniu fizyki turbulencji, nazwa DNS jest zarezerwowana nie tylko dla symulacji o bardzo dużej gęstości siatki i małym kroku czasowym, ale przede wszystkim łączy się z zastosowaniem mało dyssypacyjnych schematów numerycznych, które pozwolą na powstawanie pierwszych włókien wirowych o najmniejszej skali i coraz to większych elementów struktury turbulencyjnej. Stąd obliczenia DNS są dużo bardziej czasochłonne niż metody LES nie mówiąc już o metodach RANS.

Zastosowana przez Doktorantkę siatka dyskretyzacja jest tak samo gęsta jak dla DNS. Jeżeli stosujemy model turbulencji i jeszcze do tego dyskretyzacja pozwala na rozwiązywanie wirów należących do turbulencji to wynikowa energia kinetyczna turbulencji będzie po prostu zbyt duża. Siatka odpowiednia do DNS jest na pewno zbyt gęsta dla obliczeń typu RANS. Całe szczęście, że Doktorantka nie zastosowała modnego ostatnio dodatkowo dynamiczne zagęszczanie siatki w obszarach dużego gradientu prędkości. Typowe schematy numeryczne stosowane w kodzie komercyjnych są wystarczające dla symulacji przepływów z typowymi modelami turbulencji, dla których pierwszy punkt siatki przy ścianie leży co najwyżej na $y^+=1$. Uzyskane w RANS duże zawyżenie wartości energii kinetycznej turbulencji może być właśnie związane ze zbyt gęstą siatką obliczeniową

6. Oryginalny wkład Autorki

Jeśli za oryginalny wynik traktować wykres, rysunek, czy porównanie, które po raz pierwszy pojawia się w światowej literaturze, to mając te kryterium, można powiedzieć, że wszystkie ilustracje i rysunki są oryginalnym dziełem Doktorantki. Nawet ilustracje dotyczące rozdziałów przeglądowych są we własny, twórczy, sposób przedstawione. Praca jest przedstawieniem dojrzałego stanowiska badawczego charakteryzującego się poglądem, że „prawdą przyrodniczą są te fakty, które stykają się na gruncie eksperymentu i teorii [modeli numerycznych]. Te holistyczne stanowisko autorki, mówi, iż zarówno fakty eksperymentalne nie potwierdzone modelem, jak i wyniki modelu nie potwierdzone danymi eksperymentalnymi nie są prawdą przyrodniczą a są tylko przesłanką badawczą. Mam mocne wrażenie, że autorka świadomie używa pojęcia „rzeczywistość”. Jest to rzadkość nawet wśród dojrzałych badaczy, którzy nie potrafią obronić się przed atakującym nas zewsząd platońskim światem idei.

Mamy więc dojrzały pogląd badawczy Doktorantki sprawiający, iż przyjmuje Ona taką a nie inną prezentację wyników – nacisk położono na „realność rzeczywistości”. Tak więc oryginalne wyniki to: odkrycie okresowo zmiennych (pulsacyjnych) ewoluujących struktur kawitacyjnych sprzęgniętych z takimi strukturami przepływu jak narastanie i zwijanie się strugi powrotnej, okresowe odrywanie się przepływu od profilu, czy okresowa niesymetria przepływu. Głównym wyróżnikiem porównywanym w eksperymencie i symulacjach jest okres pulsacyjnych zmian [zakres częstotliwości od 38 do 15 Hz]. To odkrycie wymagało dużej umiejętności i talentu w posługiwaniu się narzędziami badawczymi – zarówno eksperymentalnymi jak i numerycznymi. Zwłaszcza osiągnięcie pulsacyjnych struktur w symulacjach numerycznych było trudne i wymagało od Doktorantki pomysłowości. Autorka wspomina o tych zmaganiach w ostatnim, podsumowującym rozdziale.

Drugim oryginalnym wynikiem, który wyróżnia się z pośród innych wyników, jest to symulacja przepływu wody w eksperymencie Śląskim z hipotetycznym powietrzem. Po upewnieniu się i kalibracji narzędzi dokonanej na przykładzie eksperymentu w Ostrawie, Doktorantka przeprowadziła eksperyment numeryczny, który pokazał wpływ domieszki powietrza na przebieg zmian powstawania i zanikania struktur kawitacyjnych – otrzymano znaczne złagodzenie dynamiki zmian obrotu kawitacyjnego. Ale co ciekawe, Doktorantka odkryła, że wpływ coraz większej ilości powietrza nie jest liniowy a istnieje pewnego rodzaju ilość powietrza przy której następuje wytlumienie oscylacji. Natomiast, coraz większa ilość powietrza przyczynia się do coraz większego rozmycia granic struktur i coraz większych asymetrii przepływu.

Osobnych słów uznania wymaga rozdział dotyczący przedstawienia charakterystyk mocy, sprawności, wydajności (wysokość podnoszenia) pompy wirnikowej. Nowością, którą wprowadza Doktorantka, jest charakterystyka kawitacyjna wyznaczona numerycznie na diagramie „wysokość podnoszenia pompy w funkcji nadwyżki kawitacyjnej”. Jest to nie tylko z naukowego ale i z praktycznego punktu widzenia olbrzymie osiągnięcie. Co więcej Doktorantka i jej promotorzy zdają się wskazywać nowy kierunek w projektowaniu bezkawitacyjnych pomp.

7. Uwagi rzeczowe, pytania do Doktorantki

Rozprawa przygotowana jest starannie i estetycznie. Na uznanie zasługuje przygotowanie licznych rysunków o przemyślanej zawartości i rzadko spotykanej czytelności. Doktorantka już to wie, że niechlujstwo rysunków jest odbiciem niechlujstwa naszych rozumowań. Tekst rozprawy, mimo, iż poszukiwania prowadził cały Zakład Konwersji Energii, nie zawiera błędów stylistycznych, literowych czy interpunkcyjnych.¹

Pytania są następujące:

1. Doktorantka w całej pracy używa liczby kawitacji σ [np. tab. 5.3] - bezkrytycznie. Używa jej bezkrytycznie - bowiem prawdopodobnie jest przekonana o poprawności jej definicji. Nie zadaje sobie pytania: dlaczego wprowadzono taką liczbę [Reynolds, 1873]? – Na jakie pytanie ona odpowiada? Oraz; czy w kontekście otrzymanych w

¹ Typu: strona 42⁵ wiąże – zamiast – wiąże; str. 40 wzór 4.50 – brak wytłuszczenia dla prędkości, etc.

tab. 5.3 rezultatów nie należałoby ją zastąpić „czymś” fizykalnie poprawniejszym. Ta liczba jest mało „termodynamiczna” - definicja (1.20) ma wprowadzić w siebie temperaturę ale jest to chyba temperatura wlotowa a nie najniższa temperatura w przepływie. Wielkość poprawniejsza, która mogłaby zastąpić liczbę kawitacyjną może też być „bezwymiarowa” – chociaż nie ma takiej potrzeby. Bezwymiarowość jest zazwyczaj błędnie interpretowana. Przykładowo, Reynolds czyniąc z wykresu wymiarowego: $\Delta p - \dot{m}$ wykres bezwymiarowy: $f - Re$ myślał o liczbie Re [w oryginale K] jako o bezwymiarowym strumieniu masy - natomiast współcześnie myśli się o Re tylko jako o bezwymiarowej lepkości objętościowej.

2. Podobnie jest z wartościami krytycznymi wielkości bezwymiarowej. Reynolds mierząc krytyczne $Re^* = 2400$ myślał o krytycznym strumieniu masy \dot{m} [używał oznaczenia Rankine’a z 1862 roku, którego uwielbiał] przy którym „krawędziaki ściennie” [sic] zbiegają się w środku kanału i powodują, że przepływ atramentu staje się sinusoidalny [turbulentny]. Dziś z tego badacze robią „wielkie halo” i mówią, że jest to warunek rozpoczęcia turbulencji – a są przecież w całkowitym błędzie. Podobnie trzeba interpretować krytyczną liczbę kawitacji (incipient cavitation numer - wynosiła ona $\sigma_i = 3$ w pracy Reynoldsa). Nie jest to jednak poprawna definicja punktu rozpoczęcia kawitacji (incipient point). Początek kawitacji, czy początek kondensacji, podlega bardziej skomplikowanym zależnościom – w IMP stosujemy tu jako parametr charakterystyczny „czas opóźnienia” mający nawet dla stojącej cieczy charakter głębokości stanu metastabilnego – chyba Doktorantka zgodzi się z faktem, że stan metastabilny znajduje się między spinodą a binodą. Co Doktorantka sądzi o współczynniku „metastabilności” k_p we wzorach 4.42, 4.43. Skąd wziąć tę wartość w konkretnych obliczeniach.
3. Rys 7.5 pokazuje cztery wyznaczone numerycznie kształty obłoku kawitacyjnego dyszy Ostrawskiej i jeden kształt eksperymentalny [dlaczego nie ma ona swojej nazwy własnej? – nasza dysza ma nazwę: *Coma Berenices*, bowiem warkocze parowe przypominają warkocze Weroniki]. Długość obłoku może być pierwszym parametrem porównawczym – każda długość numeryczna jest zasadniczo inna - wszystkie 4 modele turbulencji dają błędny obraz – czy w takim razie nie należą one do tej grupy modeli, która nie nadaje się do opisu spontanicznych przemian fazowych?.
4. Rysunek 7.7 wskazuje na zmianę ilości powietrza obliczoną dla dwóch stałych na wlocie poziomów liczb kawitacji mniejszej i większej. Zgodnie z tym co poprzednio powiedzieliśmy o proponowaniu przez obliczeniowców pewnych wielkości do pomierzenia, w tym rysunku jest sugestia ażeby taką zmienność powietrza pomierzyć. Należało by też pomierzyć – jak na stronie 114 stwierdza Doktorantka - stały strumień powietrza na wlocie do kanału. Można przypuszczać, że autorka sugeruje, iż nie tylko para wodna zbiera się najpierw w pęcherza a potem w obłoki, lecz w zupełnie podobny sposób zachowuje się powietrze. Jakie są fizyczne podstawy takiej hipotezy?

8. Konkluzja

W pracy doktorskiej mgr. Dorota Homa wykazała eksperymentalnie i potwierdziła metodami numerycznymi, że spontaniczne odparowanie wody w postaci kawitacji ma naturę nielokalną i niestacjonarną. Jest to oryginalny rezultat dający nowy impuls do rozwoju nauki o

przejściach fazowych indukowanych naprężeniowo. Doktorantka wykazała się doskonałym opanowaniem współczesnych narzędzi badawczych co pozwoliło jej wykonać aż trzy niezależne, wzajemnie się uzupełniające analizy. Tym samym osiągnęła stawiane jej przez promotora cele.

Od strony klasyfikacji formalnej pracę można zaliczyć do dziedziny **Nauk Technicznych** i dyscypliny **Mechanika**. Rozprawa dowodzi dobrej znajomości prowadzenia eksperymentów oraz ich symulacji numerycznych oraz umiejętności analiz uzyskanych wyników. Rozprawa jest oryginalnym rozwiązaniem postawionego zadania, czego częściowym dowodem są również stosunkowo liczne publikacje w językach konferencyjnych.

Stwierdzam, że recenzowana praca spełnia warunki stawiane pracom doktorskim w myśl ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (art. 13. Ust. 1). W związku z powyższym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy Pani mgr inż. Doroty Homy jako pracy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Skala trudności i zakres podjętych badań przewyższają, w moim przekonaniu, wymagania stawiane zwyczajowo pracom doktorskim – stąd liczne są w niej wartościowe wyniki – w szczególności kompletne rozpoznanie mechanizmów pulsacyjnego ruchu i ewolucji obrotu kawitacyjnego – stąd stawiam wniosek o jej wyróżnienie.

