

**Dr hab. Janusz Steller**

**Instytut Maszyn Przepływowych  
Polskiej Akademii Nauk**

**Ośrodek Hydrodynamiki**

**ul. J.Fiszera 14, 80-231 Gdańsk**

■ **+48 (58) 5225139**

☎ **+48 (58) 341 61 44**

📠 **+48 608 197185**

e-mail: [steller@imp.gda.pl](mailto:steller@imp.gda.pl)



## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Łukasza Złotego p.t. „Wpływ otworów odciążających w wirnikach pomp wirowych na zdolności ssawne oraz sprawność pompy”**

### **Podstawa i przedmiot recenzji**

Poniższa recenzja została opracowana w wyniku realizacji uchwały podjętej w pierwszej połowie tego roku przez Radzę Dyscypliny Naukowej „Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka” przy Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa „Wpływ otworów odciążających w wirnikach pomp wirowych na zdolności ssawne oraz sprawność pompy”, przedłożona ww. Radzie Dyscypliny przez p. mgra inż. Łukasza Złotego.

### **Ocena cech formalnych i redakcyjnych**

#### **Struktura rozprawy**

Rozprawa liczy 206 stron, na które składają się kolejno: streszczenie, spis treści, wykaz oznaczeń, 11 rozdziałów merytorycznych, spis literatury oraz cztery załączniki zawierające kolejno: dokumentację techniczną stanowiska badawczego, zestawienie wyników badań doświadczalnych w postaci bezwymiarowej, wyniki badań laboratoryjnych w postaci tabelarycznej oraz wykresy zawierające zestawienie wyników obliczeń numerycznych (CFD) i doświadczalnych w postaci wykresów wyróżników bezwymiarowych wysokości podnoszenia, mocy i siły wzdłużnej w funkcji wyróżnika wydajności.

Z uwagi na bardzo szeroki zakres badań (64 serie pomiarowe, w sumie 540 charakterystyk), wyniki badań doświadczalnych w postaci tabelarycznej zadokumentowano w postaci plików pdf na dołączonej do rozprawy płycie CD. Staranna dokumentacja badań, włącznie z szczegółowym opisem i dokumentacją stanowiska badawczego, to ważne atuty przedłożonej rozprawy, umożliwiające powtórzenie badań w niezależnym laboratorium i analizę porównawczą wyników uzyskanych przez doktoranta oraz wyników innych badaczy.

Na najwyższą ocenę zasługuje przyjęty plan badań oraz struktura samej rozprawy. W obu przypadkach wyraźny jest ciąg logiczny dociekań naukowych. W problematykę badań bardzo dobrze wprowadza zwięzły wstęp (rozdział 1). Z punktu widzenia recenzenta, ale i innych czytelników, cenny jest rozdział 2, w którym sformułowano przejrzyste tezy rozprawy, jej cele i zakres. Na podobną ocenę zasługuje rozdział 11 (Wnioski), na końcu którego wyodrębniono osobno autorskie osiągnięcia pracy i proponowane dalsze kierunki. Recenzent nie zgłasza żadnych zastrzeżeń dotyczących formy wniosków. Do większości treści merytorycznych

oraz aspektów rozprawy leżących na pograniczu tych treści i formy redakcyjnej, recenzent odniesie się jednak w dalszej części tego dokumentu.

### Terminologia

Bardzo dobrym zwyczajem jest umieszczanie na początku dzieł naukowych spisu stosowanych oznaczeń. Tak postąpił i autor. Słusznie też ograniczył się do oznaczeń najważniejszych, pomijając w szczególności dużą część symboli stosowanych w rozdziale 3, w którym dokonuje obliczeń porównawczych wpływu otworów odciążających na napór hydrauliczny skierowany wzdłuż osi wału posługując się procedurami rekomendowanymi przez różnych autorów. Poza tym, spis oznaczeń budzi jednak zastrzeżenia. Autor nie zawsze stosuje kolejność alfabetyczną, opisy są niekompletne lub nieściśle, a niektóre oznaczenia dziwne. Poniżej sformułowano najważniejsze uwagi.

Anglojęzyczny termin *Net Positive Suction Head (NPSH)* bywa zwykle tłumaczony na język polski jako „antykawitacyjna nadwyżka wysokości ssania”. Często używa się określenia skrótowego „nadwyżka antykawitacyjna” lub po prostu *NPSH*. Termin ten ostatecznie wyparł takie wcześniej stosowane terminy i oznaczenia, jak np. „zapas antykawitacyjny” ( $\Delta H_s$ ). *NPSH* jest wielkością fizyczną. Jej wartości odpowiadające przejściu w różne stadia rozwoju kawitacji w maszynie określa się jako wartości krytyczne. W przypadku pomp pracujących z określoną prędkością obrotową i wydajnością jest nią między innymi wartość *NPSH* odpowiadająca 3-procentowemu spadkowi wysokości podnoszenia w stosunku do wysokości podnoszenia podczas pracy bezkawitacyjnej. W przypadku turbin wodnych używa się spadku mniejszego (np. 1 %) i odnosi się go zwykle do sprawności oraz pracy przy stałym spadzie. Dla użytkownika pompy najważniejsza jest oczywiście wskazana przez dostawcę dopuszczalna wartość *NPSH*, w przypadku pomp określana też mianem wartości wymaganej (*NPSHR, required*). W przypadku pracy ciągłej lub długotrwałej wartość ta jest znacznie większa od *NPSH3*. Celem odróżnienia wartości kryterialnej od dostępnej w miejscu instalacji pompy („instalacyjnej”) używa się czasem symbolu *NPSHA* (od angielskiego *available*).

Zdaniem recenzenta, wyjaśnienie „nadwyżka kawitacyjna wyznaczona w oparciu o 3 % spadek wysokości podnoszenia” jest co najmniej nieprecyzyjne. Można było najpierw wyjaśnić oznaczenie *NPSH* (wystarczyłoby podać polską pełną nazwę i odesłać do odpowiedniej normy lub jednej z pozycji literatury). Następnie można było wyjaśnić, co oznaczają poszczególne wskaźniki dolne lub też dodatkowe symbole używane w rozprawie, np. „*NPSH3* – wartość *NPSH* odpowiadająca 3-procentowemu spadkowi wysokości podnoszenia ...”.

Prawdziwe zdziwienie budzi zastąpienie terminu „wyróżnik kawitacji” lub „liczba kawitacji” określeniem „bezwymiarowy wyróżnik nadwyżki antykawitacyjnej”. Dla recenzenta to dziwny neologizm. Mimo, że chyba kiedyś z nim się już zetknął. Na dodatek, z nieznanymi powodów, zamiast tradycyjnego symbolu  $\sigma$  użyto symbolu  $\xi$ , co jest zupełnie mylące. Warto zauważyć, że w literaturze USA, która - co prawda - „nie grzeszy” precyzją, czasami pojawia się wprost termin „*cavitation sigma*”.

Wyróżnik kawitacji jest podstawową liczbą podobieństwa kawitacyjnego. W przypadku hydraulicznych maszyn wirnikowych definiowany jest on zwykle jako stosunek *NPSH* do wysokości podnoszenia pompy (spadu turbiny) lub do podwojonej wysokości energii kinetycznej związanej z prędkością obwodową łopatek wirnika od strony ssawnej. W pierwszym przypadku mówi się o liczbie Thomy, w drugim – o liczbie Föttingera. Ta druga definicja jest zwykle stosowana w przypadku pomp wirowych i to o nią chodziło autorowi rozprawy. Dość

podobnie definiuje się liczbę kawitacji w przypadku pędników okrętowych, chociaż *NPSH* tam nie występuje.

Zastrzeżenia terminologiczne mogą budzić i niektóre sformułowania w tekście głównym. Pisanie o kierunku pionowym, czy poziomym w przypadku układu przepływowego pompy wirowej tylko utrudnia zrozumienie tekstu. Niezrozumiałe jest, dlaczego Autor nie chce używać takich określeń, jak kierunek równoległy do osi wału (poosiowy), kierunek promieniowy i obwodowy?

Zdziwienie budzi też użycie symbolu „÷” w charakterze znaku dzielenia w spisie oznaczeń. Dlaczego Autor nie zdecydował się na powszechnie stosowaną kreskę pochyłą (ukośnik) lub poziomą kreskę ułamkową? To dość dziwna maniera. Znak „÷” stosuje się często na oznaczenie zakresu parametrów lub na oznaczenie dzielenia liczb całkowitych (z resztą). Recenzent nigdy nie spotkał się jednak z konwencją zastosowaną przez autora rozprawy.

### **Literatura i przegląd stanu wiedzy**

Literatura przedmiotu liczy 51 pozycji, wśród nich kilkanaście monografii (w tym dzieła klasyczne) i 2 rozprawy doktorskie. Reszta to artykuły wydane w czasopismach (w zdecydowanej większości - po roku 2000) i w wydawnictwach pokonferencyjnych oraz - w niewielkiej mierze - różnego rodzaju opracowania, w tym sprawozdania z realizacji projektów, opracowania normalizacyjne i inne.

Recenzent nie zgłasza zastrzeżeń dotyczących doboru literatury. Zastrzeżenia formalne budzi natomiast sposób jej przywoływania. Chodzi tu zwłaszcza o dzieła monograficzne, których zawartość weszła już do kanonu wiedzy. W każdym przypadku Autor wskazuje tylko pozycję w spisie literatury, unikając podania chociaż raz nazwiska lub nazwisk autorów. To nie tylko bardzo utrudnia śledzenie rozważań przez czytelnika, ale jest też nieeleganckie wobec autorów przywoływanych prac. Zwłaszcza w przypadku prac o znaczeniu podstawowym. Czy naprawdę Autorowi łatwiej jest zapamiętywać numery zamiast nazwisk? Czy sądzi, że dotyczy to również czytelnika, który zna nazwiska części autorów, ale który nie jest w stanie szybko zapamiętać ich powiązanie z numerami ze spisu literatury? Warto zwrócić uwagę, że wiele wydawnictw w ogóle nie rekomenduje posługiwania się numerami w spisie literatury, lecz tylko nazwiskami z datą w nawiasie i małymi literami dodawanymi w przypadku kilku prac opublikowanych w tym samym roku.

Być może właśnie sposób przywoływania literatury sprawił, że przegląd w rozdziale 3 robi wrażenie chaotycznego. Kolejność wydaje się dość przypadkowa. Nie za bardzo widać rozwój myśli badawczej. Rezygnując z przywoływania nazwisk i zachowywania nawet kolejności chronologicznej, autorowi zdarza się przywoływać najpierw pracę późniejszą, a omawiając następnie pracę wcześniejszą wskazywać na zgodność lub niezgodność (monografie prof. prof. Trokoleńskiego i Stępniewskiego). Przy czytaniu po raz pierwszy rozdziału 3.2 nie od razu jest jasne, kto jest „autorem rozprawy”.

Pomysł przeprowadzenia obliczeń siły wzdłużnej w wybranej pompie z różną konfiguracją otworów odciążających według różnych formuł, czy raczej procedur obliczeniowych, jest bardzo dobry. Jednak poruszanie się w tym fragmencie rozprawy jest trudne. Zdecydowanie przydałby się podział podrozdziału 3.2 na podrozdziały jeszcze drobniejsze z tytułami wskazującymi na autorstwo procedury. Może należało się zastanowić nad połączeniem podrozdziałów 3.1 i 3.2 tak, aby wszystkie obliczenia poprzedzał bezpośrednio opis założeń.

Tabele 4 i 5 zamieszczone na końcu rozdziału 3.2 są bardzo pouczające. Rozrzut wyników obliczeń jest bardzo duży, a daleko idące uproszczenia często dają nieoczekiwane dobre rezultaty. Oczywiście, byłoby pięknie, gdyby Autor spróbował zanalizować przyczyny obserwowanych rozbieżności, lecz recenzent zdaje sobie sprawę, że praca taka mogłaby okazać się mozolna i niekoniecznie dająca satysfakcję wprost proporcjonalną do włożonego wysiłku.

### **Język i pisownia**

Język jest chyba najsłabszą stroną tej pracy. Oczywiście, źle byłoby, gdyby ta uwaga dotyczyła innych aspektów. Na szczęście tak nie jest – od strony merytorycznej rozprawa broni się bardzo dobrze i to ma znaczenie kluczowe.

Niemniej, rozprawa doktorska to całość i nie powinna roić się od różnego rodzaju niezręczności i błędów językowych – gramatycznych i logicznych. Kontrastuje to jaskrawo z bardzo dobrą, logiczną strukturą całości, co już podkreślono na wstępie. Recenzent nie chciałby skupiać na tym aspekcie oceny, ale podnosząc ją, czuje się zobowiązany zacytować takie sformułowania, jak „otrzymano, że”, „wykonanie wersji geometrii”, „zmniejszenie modelu obliczeniowego”, „wykres serii pomiarowej”, „wyniki formuł” itp. Wszystkie one brzmią co najmniej dziwnie.

W tym miejscu można zwrócić też uwagę na nadużywanie znaku apostrofu przy nazwiskach obcych. Nikt nie używa apostrofu przy nazwisku „Newton”. Nie używa się go też przy nazwisku „Taylor” w podręcznikach analizy matematycznej i hydrodynamiki. Dlaczego więc tutaj?

### **Rysunki**

Rysunki są wykonane starannie. Zastrzeżenia może budzić kreskowanie stosowane za jednym razem do elementów konstrukcyjnych pompy, a za drugim - do obszaru wypełnionego cieczą. Trudności można napotkać przy odczytywaniu wykresów przedstawiających charakterystyki uzyskane doświadczalnie i numerycznie. Autor dokonuje na ich podstawie analizy porównawczej, wyciąga ważne wnioski, a krzywe są do siebie bardzo zbliżone. Pokazano je w całości podczas, gdy rozbieżności wyrażają się w pojedynczych procentach. Jednym z możliwych rozwiązań w takich przypadkach jest pokazywanie dodatkowo wykresu różnic między krzywą referencyjną (np. charakterystyką pompy bez otworów odciążających), a krzywymi będącymi przedmiotem zainteresowania (charakterystykami pomp z otworami w różnej konfiguracji).

## **Ocena wartości merytorycznych**

### **Zadanie badawcze**

Mimo wszystkich zastrzeżeń natury formalnej i redakcyjnej, recenzent od samego początku nie miał wątpliwości, że ma do czynienia z pracą dobrą, a nawet bardzo dobrą od strony merytorycznej. Niezależnie od znakomitej struktury, bardzo silną stroną rozprawy jest dobrze postawione zadanie badawcze i przyjęta metodyka jego rozwiązania. Zagadnienie jest ważne od strony technicznej i intrygujące od strony poznawczej. Intuicja mogła podpowiadać, że otwory odchylone jednocześnie w dwóch kierunkach (obwodowym i promieniowym), mogą być korzystne z punktu widzenia przepływowego, ale to dopiero praca Autora udowodniła, że tak jest istotnie. Co najważniejsze, udało się zachować wciąż dobre własności odciążające, zwłaszcza przy wysokich wydajnościach.

### **Analiza wstępna i metodologia badań**

Zasady metodologiczne i sposób prezentacji oraz analizy wyników badań są dobre, chociaż rozdziały 4 i 6 mogły być połączone, gdyż w obu analizuje się metodami numerycznymi przepływ przez otwory odciążające – najpierw bez odchylenia, a potem z odchyleniem. Rozdział 5, opisujący budowę stanowiska badawczego wydaje się sztucznie wstawiony pomiędzy rozdziały 4 i 6. Dyskusja przeprowadzona w rozdziałach 4 i 6 jest przeprowadzona w sposób przekonujący i profesjonalny. Dwie uwagi odnoszące się do rozdziału 4 mają charakter porządkowy.

1. Opis przedostatniej kolumny tabeli 8 jest mylący.
2. Powoływanie się na analizę wymiarową na stronie 72 jest nieściśle. Z analizy wymiarowej mógł wynikać fakt zależności współczynnika przepływu  $\mu_4$  od współczynnika  $K_0$ , ale już nie szczególna postać wzoru 103.

Odnosząc się do rozdziału 5, należy stwierdzić, że konstrukcja stanowiska badawczego budzi najwyższe uznanie. To rzeczywiście ważny element pracy, dowodzący wysokich kwalifikacji inżynierskich Doktoranta połączonych ze zrozumieniem badanych zjawisk, czego oczekuje się od osoby ze stopniem naukowym. Dobrze, że stanowisko zostało szczegółowo opisane, a podstawowe elementy dokumentacji włączono do rozprawy.

Rozdziały 7 i 8 tworzą tematycznie też jedną całość, gdyż analizę niepewności wyniku pomiaru można uznać za część metodyki badań. Recenzent nie ma zastrzeżeń do programu badań opisanego w rozdziale 7. Odpowiada on dobrze postawionym na wstępie celom. Zadanie zostało postawione ambitnie i stąd bardzo duży, lecz dobrze uzasadniony, zakres prac badawczych. W każdym razie, wkład pracy budzi szacunek.

Ocena metodyki wyznaczania niepewności wyniku pomiaru nie wypada już tak jednoznacznie. Otóż Autor ogranicza się do tak zwanej niepewności standardowej, wynikającej z klasy przyrządów pomiarowych. Całkowicie pomija niepewność przypadkową wynikającą z warunków pomiaru. Niepewność ta ma istotne znaczenie przy wyznaczaniu charakterystyk energetycznych i przepływowych maszyn wirnikowych różnych typów. Odpowiednie normy dokładnie opisują jak wyznaczać niepewność przypadkową zarówno w przypadku pomiaru w jednym punkcie pracy, jak i w przypadku zdejmowania charakterystyk. Szczególne wątpliwości budzi sposób wyznaczania niepewności wartości krytycznej nadwyżki antykawitacyjnej NPSH3, którą potraktowano, jak każdy inny parametr pracy. Sprawa ta jest na tyle istotna, że omówiono ją poniżej.

### **Analiza końcowa wyników badań**

Analizę wyników doświadczalnych przedstawiono w rozdziale 9, zaś wyników obliczeń numerycznych – w rozdziale 10. To oczywiście najważniejsza część rozprawy – prowadząca do ważnych wniosków pozwalających wyjaśnić naturę zjawisk zachodzących w otworach i skutkujących różnym oddziaływaniem na własności energetyczne i kawitacyjne pompy. Wnioski z tej analizy są istotne z punktu widzenia zastosowań w przemyśle pompowym. Przedstawiono je w rozdziale 11. Recenzent odniesie się do nich w ostatniej części recenzji. Przedtem chce zwrócić uwagę na znakomite opanowanie warsztatu CFD, umiejętną interpretację fizyczną wyników jakościowych i bardzo dobrą zgodność ilościowych wyników obliczeń numerycznych i badań eksperymentalnych. To niewątpliwy sukces Autora.

Pewnego komentarza wymagają badania kawitacyjne. Polegały one na wyznaczeniu wysokości podnoszenia w miarę obniżania wartości  $NPSH$  przy zachowaniu stałej wydajności pompy. Pomiarom towarzyszyły obserwacje wizualne rozwoju kawitacji, które zostały zadokumentowane w formie fotograficznej. Fotografowanie zjawisk kawitacyjnych zachodzących w maszynie hydraulicznej jest niełatwe i wykonane zdjęcia charakteryzują się niewysoką jakością, chociaż wystarczającą dla celów, do których zostały wykorzystane. Inaczej niż w turbinie wodnej zdjęcia można jednak wykonywać w warunkach, gdy obserwuje się już silne oddziaływanie kawitacji na przebieg charakterystyki  $H = H(NPSH)$ . Oddziaływanie to rozpoczyna się niekiedy już przy wartościach  $NPSH$  znacznie przekraczającą próg  $NPSH3$ . Wskazanie dokładnej wysokości podnoszenia w przepływie bezkawitacyjnym staje się wówczas sprawą nieoczywistą, gdyż wymagałoby wskazania wartości, do której zmierza ona w miarę wzrostu ciśnienia w całym układzie. Rutynowym rozwiązaniem jest posługiwanie się wartością średnią z pewnego przedziału  $NPSH$  powyżej miejsca załamania krzywej. Tak właśnie postąpił Doktorant. Lecz i to standardowe postępowanie obciążone jest sporą niepewnością. Zaś posługiwanie się „niepewnością standardową”, jak to opisano w rozdziale 8, w ogóle nie informuje o istocie problemu. Mamy przecież do czynienia z niepewnością, która wynika głównie z natury zjawiska, a nie z dokładności techniki pomiarowej. Generalnie, recenzent wyraża opinię, że w takich przypadkach dla każdego punktu pomiarowego należy dokonywać oceny niepewności całkowitej, zaś punkty doświadczalne na charakterystykach  $\sigma_{3\%} = \sigma_{3\%}(\phi)$  ( $\xi_{3\%} = \xi_{3\%}(\phi)$ ) lub też  $NPSH3 = NPSH3(Q)$  ( $n = const$ ) opatrywać słupkami niepewności.

W tym miejscu należy też zwrócić uwagę, że chociaż wyznaczanie  $NPSH3$  jest obowiązkowym elementem procedur badania pomp wirowych, to parametr ten opisuje własności kawitacyjne pompy w sposób dalece niedoskonały, a w przypadku pomp przeznaczonych do długotrwałej eksploatacji – zupełnie niewystarczający. Zjawiska kawitacyjne zaczynają się przy nadwyżce kawitacyjnej znacznie wyższej niż  $NPSH3$  prowadząc – miarę podwyższania wysokości ssania - do pojawienia się szumu, oddziaływań erozyjnych, drgań części wirujących i niewirujących, a dopiero przy nasilonej kawitacji – do załamania krzywych sprawności i wysokości podnoszenia. W tych warunkach objawy wibroakustyczne i oddziaływania erozyjne bywają już osłabione. Przy czym - w niektórych przypadkach - do stopniowego spadku sprawności może dochodzić już przy wysokich wartościach  $NPSH$  (rys.67). Dotyczy to zwłaszcza ruchu poza optymalnym punktem pracy.

W wyjaśnianiu natury niepożądanych oddziaływań otworów odciążających, a właściwie w poszukiwaniu dobrego kompromisu między tymi oddziaływaniami a własnościami odciążającymi otworów, upatruje recenzent główne znaczenie pracy od strony aplikacyjnej. Jak Autor pokazał, otwory odciążające wywierają mniejszy lub większy wpływ zarówno na własności energetyczne, jak i kawitacyjne. Dobrze wiadomo, że w przypadku pompoturbin, konstrukcją przypominających pompy helikoidalne, otwory odciążające oraz spojenia łopat wirnika z piastą są miejscami, w których dochodzi do generacji szczególnie agresywnych form kawitacji. Dochodzi do tego przy wartościach  $NPSH$  znacznie przekraczających  $NPSH1$ , a tym bardziej  $NPSH3$ . Oczywiście, poczynienie takich obserwacji w przypadku niewielkiej pompy odśrodkowej badanej w warunkach laboratoryjnych nie jest możliwe. Możliwe jest natomiast wykonanie badań diagnostycznych obejmujących analizę takich zjawisk, jak emisja akustyczna, drgania korpusu pompy, pulsacje ciśnienia. Brak takich badań w trakcie przygotowywania rozprawy trudno uznać za jej wadę. Materiał doświadczalny jest i tak bardzo obszerny. Nie można też zrobić wszystkiego naraz. Jednak ograniczenie omawiania wpływu otworów odciążających na własności kawitacyjne pompy do dyskusji wartości  $NPSH3$  w różnych warunkach



pracy budzi już wątpliwości. Przecież już sam kształt krzywych wysokości podnoszenia wskazuje, że oddziaływanie to jest zróżnicowane pod względem jakościowym.

### Ocena wniosków zawartych w rozprawie

Jak wspomniano przy okazji omawiania struktury rozprawy, rozdział 11, zawierający wnioski z badań oraz podsumowanie osiągnięć własnych i planów na przyszłość przygotowano starannie. Poniżej recenzent odnosi się do tych akapitów, które – jego zdaniem – wymagają pewnego komentarza z jego strony.

Z treścią pierwszego akapitu wypada się zgodzić. W świetle tego, co napisano wyżej, należy jednak zwrócić też uwagę, że ważna jest nie tyle sama wartość  $NPSH_3$ , co ogólne zrozumienie i ocena ilościowa zjawisk kawitacyjnych zachodzących w pompie w zależności od konstrukcji i konfiguracji otworów odciążających.

Akapit drugi został sformułowany niejasno. Zapewne chodzi o obliczenia siły wzdłużnej (naporu), zawarte w rozdziale 3, ale nie napisano tego wprost. W przyszłości przydałaby się próba wyjaśnienia, w jaki sposób poczynione założenia różnych autorów wpłynęły na rozbieżności.

W akapicie czwartym Autor odnosi się do przeprowadzonej analizy niepewności. Recenzent może powtórzyć tu tylko zgłoszone wcześniej zastrzeżenia dotyczące wyznaczania wartości  $NPSH_3$ .

Pozostałe wnioski dotyczą generalnie wpływu geometrii i usytuowania otworów odciążających na własności przepływowe i kawitacyjne pompy. Ze względów aplikacyjnych większość z nich jest bardzo cenna. Podobnie jak poprzednio, pewne zastrzeżenia może jednak budzić ograniczenie dyskusji nad własnościami kawitacyjnymi do wartości  $NPSH_3$ . Warto też zwrócić uwagę na zawarte w czwartym akapicie na stronie 161 stwierdzenie „obszary najbardziej narażone na to zjawisko to krawędzie łopatek wirnika oraz część krawędzi wylotowej otworu odciążającego”. W rzeczy samej są to miejsca na których dochodzi do zainicjowania kawitacji. Jeśli chodzi o „narażenie” na dynamiczne, w tym erozyjne, oddziaływania na powierzchnię omywaną, to obszary te znajdują się za wskazanymi miejscami (patrzac w kierunku przepływu).

Zebranie osiągnięć autorskich Doktoranta jest bardzo pomocne przy formułowaniu ostatecznej oceny rozprawy. Przedtem recenzent chce jednak potwierdzić, że wszystkie osiągnięcia wymienione na stronie 163 nie ulegają dla niego wątpliwości. Jeśli chodzi o jakość tych osiągnięć, to pewne wątpliwości może budzić sposób przeprowadzenia przeglądu formuł analitycznych (punkt t 1) oraz ograniczenie analizy niepewności do tzw. niepewności standardowej – zwłaszcza, gdy chodzi o wartość  $NPSH_3$ . W pierwszym przypadku zastrzeżenia mają w dużej mierze charakter formalno-redakcyjny. W obu przypadkach nie poddają one w wątpliwość też pracy.

Rozdział 11 kończy się propozycjami dalszych badań. Recenzent ocenia je pozytywnie. Jedyne punkt ostatni budzi pewne zastrzeżenia. W przypadku podjęcia dalszych prac w tym kierunku, analizy własności kawitacyjnych nie należałoby już ograniczać do wyznaczenia krzywych  $NPSH_3$  w zależności od wydajności pompy, lecz zająć się analizą pogłębioną, która pozwoliłaby opisać przebieg dynamicznych oddziaływań kawitacji na elementy układu przepływowego w zależności od  $NPSH$  i ewentualnie wskazać wymaganą wartość  $NPSH$  lub też liczby kawitacyjnej w warunkach pracy długotrwałej.

## Ocena i wnioski końcowe

Recenzent nie ma wątpliwości w następujących sprawach.

1. Rozprawa wnosi znaczący wkład w wyjaśnienie i rozwiązanie ważnego problemu technicznego z zakresu budowy i eksploatacji pomp wirowych.
2. Doktorant wykazał się wiedzą naukową i umiejętnościami inżynierskimi umożliwiającymi mu skonstruowanie oryginalnego stanowiska badawczego, a następnie przeprowadzenie badań prowadzących do rozwiązania ww. problemu we wcześniej założonym zakresie. Przedłożona rozprawa zawiera m.in. opis i analizę wyników ww. badań. Wskazuje jednoznacznie na umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych przez jej autora. Na podkreślenie zasługuje znakomite opanowanie warsztatu CFD, w tym umiejętną interpretację fizyczną wyników i duża zgodność wyników obliczeń numerycznych z wynikami badań doświadczalnych.

Przedłożona rozprawa spełnia wymagania określone w artykule 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. Ust. 2003, Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami). Tym samym może stanowić podstawę do dopuszczenia do obrony publicznej zgodnie z zapisami artykułu 14 tej samej ustawy.



Gdańsk, 2 grudnia 2022