

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra Dawida Majewskiego
pt.

Uderzenie fali odbitej w poziomą płytę zamocowaną powyżej powierzchni swobodnej

Podstawa opracowania recenzji: Uchwała Rady Naukowej Instytutu Budownictwa Wodnego
Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku z dnia 13.12.2019 r.

1. Przedmiot recenzji

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy ważnych i aktualnych zagadnień doskonalenia istniejących i opracowania nowych modeli obliczeniowych oraz prowadzenia laboratoryjnych badań eksperymentalnych, a mających na celu wyznaczenie rodzaju i istotnych cech oraz wartości obciążeń hydrodynamicznych oddziałujących na zarówno posadowione na dnie jak i pływające obiekty morskie. Zagadnienia te nurtowały naukowców i projektantów różnych obiektów hydrotechnicznych oraz statków już od dawna i doczekały się szeregu modeli obliczeniowych, a także badań eksperymentalnych zarówno laboratoryjnych jak i przeprowadzonych niekiedy na obiektach. Należy jednak zaznaczyć, że bardzo dynamicznie rozwijający się przemysł offshore i transportu morskiego spowodował powstawanie nowych konstrukcji statków i różnego rodzaju platform, zarówno posadowionych jak i pływających, a także konstrukcji brzegowych, w tym falochronów. Z uwagi na to, że w przypadku planowanych inwestycji wymienionych obiektów, których koszty projektu i budowy z reguły są bardzo wysokie, zachodzi potrzeba wykonania niezbędnych obliczeń i ewentualnie laboratoryjnych badań modelowych w celu wyznaczenia możliwych do wystąpienia obciążeń, jakie wystąpią podczas eksploatacji obiektu, zwłaszcza w ekstremalnie niekorzystnych warunkach morskich.

Duża różnorodność wymienionych obiektów dotycząca ich kształtu i wielkości powierzchni pod i nadwodnych oraz warunków eksploatacji i wynikającego z tego charakteru i wartości występujących obciążeń powoduje, że istniejące modele obliczeniowe na ogół nie są na tyle uniwersalne, by w pełni uwzględniały te czynniki. W takich przypadkach, często zachodzi potrzeba rozszerzenia istniejących modeli obliczeniowych o człony uwzględniające specyfikę konstrukcji i jej parametrów geometrycznych oraz przewidywanych warunków eksploatacyjnych.

Jednym z wymienionych obiektów hydrotechnicznych będącym przedmiotem badań Autora jest pionowościenny falochron z zamocowaną na jego koronie poziomą płytą zwróconą w kierunku morza. Taki kształt falochronu skutecznie ogranicza przedostawanie się wody morskiej ponad falochronem w czasie sztormów. W dostępnej literaturze naukowej brakuje, jak dotąd prac, które by prezentowały pełny model matematyczny i obliczeniowy zjawisk oddziaływania fal na tego typu przeszkodę, zwłaszcza występujących pod poziomą płytą takiego falochronu.

Doktorant postawił sobie za cel opracowanie numerycznego modelu procesu uderzenia wody w dolną powierzchnię sztywnej poziomej płyty zamocowanej wychylnie, ale ze sprężystym podparciem, do pionowej ściany falochronu, co umożliwi prowadzenie badań zjawisk hydrodynamicznych pod płytą, w tym rozkładu i wartości ciśnień w zależności od parametrów fali oraz położenia płyty nad powierzchnią wody.

Ponadto w celu zweryfikowania wyników obliczeń numerycznych Doktorant zaprojektował stanowisko laboratoryjne do badania modelu takiego falochronu w kanale falowym IBW PAN, na którym dokonał pomiarów istotnych wielkości, a otrzymane wyniki porównał z wynikami otrzymanymi z obliczeń.

Uwzględniając powyższe należy uznać, że podjęta w rozprawie tematyka jest ważna i aktualna, a próba rozwiązania przedstawionych wyżej zadań badawczych w pełni uzasadniona.

2. Ogólna ocena rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa jest obszerna, zawiera łącznie 124 strony. Składa się z sześciu rozdziałów, spisu treści, spisu ilustracji, spisu tablic, listy symboli, wykazu bibliografii zawierającego 54 pozycje i czterech liczących razem 30 stron załączników AI, AII, AIII, AIV. Pierwszy z nich AI zawiera rysunek ukazujący wzajemne położenie układów współrzędnych $x-z$ i stycznego $s-n$ oraz wyprowadzenie równań na warunki brzegowe dynamiczne i kinematyczne w lokalnym układzie odniesienia. W drugim załączniku AII padano w postaci tabelarycznej wykaz wszystkich elementów zespołu modelu płyty wraz z podaniem ich mas i momentów bezwładności oraz oznaczenia i sztywności poszczególnych sprężyn i ich zestawów ustalających położenie poziome płyty. W kolejnym załączniku AIII wyprowadzona została zależność na całkowitą energię kinetyczną układu płyty łącznie z uwzględnieniem zastosowanych do pomiarów czujników. W ostatnim załączniku AIV Doktorant zamieścił dokumentację rysunkową obejmującą rysunek złożeniowy stanowiska badawczego oraz rysunki wykonawcze jego elementów składowych.

W rozdziale 1 pt.: „Wstęp” Autor ukazuje genezę tematyki badawczej dotyczącej możliwie jak najlepszego poznania zjawisk hydrodynamicznych jakie występują podczas oddziaływania mas wody np. podczas falowania na posadowione lub pływające obiekty hydrotechniczne jak np. statki, platformy stałe i pływające, a także różnego rodzaju pirsy i falochrony. Podkreśla przy tym potrzebę prowadzenia badań teoretycznych i modelowych eksperymentalnych podyktowaną bardzo zróżnicowanym charakterem warunków eksploatacji tego typu obiektów, jak i wartością występujących obciążeń. Uwzględniając przy tym olbrzymie koszty projektowania, budowy, a w przypadku platform, także ich holowania, posadowienia lub kotwiczenia i bezpiecznej eksploatacji, prowadzenie relatywnie tanich badań numerycznych i modelowych jest w tym przypadku jak najbardziej celowe. Duża różnorodność konstrukcji obiektów oraz warunków ich eksploatacji powoduje występowanie wielu odmiennych zjawisk. Niektóre z nich mogą być na tyle istotne dla bezpieczeństwa działania konkretnego obiektu, że powinny być wcześniej rozpoznane. Doktorant uznał, że jednym z obiektów hydrotechnicznych, w których występujące zjawiska hydrodynamiczne nie zostały w pełni zbadane i nie doczekały się wyczerpujących publikacji jest falochron parapetowy. Przywołuje liczne pozycje literatury dotyczące tych zagadnień. Zachodzące pod poziomą płytą tego typu falochronu zjawiska dynamicznego uderzenia wody w dolną powierzchnię tej płyty i generowane tymi uderzeniami ciśnienia oraz obciążenia są na tyle istotne dla projektantów tego typu urządzeń, że uzasadnia to ujęcie tych zagadnień w tematyce prowadzonych przez Niego badań. Autor stawia sobie za cel opracowanie modelu teoretycznego opisującego te zjawiska, co umożliwiłoby relatywnie szybko i tanio wyznaczać

istotne parametry konstrukcyjne i obciążenia już na etapie projektowania tego typu obiektów. W oparciu o prace przytoczonych autorów i swoje, a dotyczące podobnych zjawisk, Autor w miarę dokładnie opisał proces przewidzianego do badań zjawiska uderzenia fali.

Z uwagi na duże prędkości wody względem obiektów stałych wyznaczenie obciążeń hydrodynamicznych z reguły wymaga stosowania nieliniowych równań ruchu wody, co znacznie komplikuje obliczenia. Z tego względu tam, gdzie jest to uzasadnione wprowadza się pewne założenia upraszczające prowadzące do linearyzacji. Doktorant wymienił i scharakteryzował kilka metod i równań oraz ich przydatność w rozwiązaniu analizowanego problemu. Założył przy tym, że woda dotyka płyty poziomej od narożnika łączącego ją z pionową płytą falochronu. To założenie stanowi duże uproszczenie, ale umożliwiło dokładniejszą weryfikację wyników modelu numerycznego, wynikami pomiarów laboratoryjnych. Ponadto pominął ścisłość i lepkość wody oraz efekty kawitacji. Dla tych założeń opracował teoretyczny model opisu badanego zjawiska. W modelu tym wykorzystał Metodę Elementów Brzegowych, a nieliniowe warunki brzegowe sformułował dokładnie na granicach geometrycznych obszaru. Model opisuje ruch falowy w skończonym obszarze obliczeniowym rzeczywistego kanału falowego i pozwala wyznaczyć charakterystyczne ciśnienia wywołane uderzeniem fali oraz siły działające na płytę. Doktorant wykonał także analizę dokładności i stabilności zaproponowanego schematu numerycznego oraz sprawdzenie poprawności rozwiązania.

W dalszej części tego rozdziału Autor przedstawia w bardzo zwięzły sposób zawartość pozostałych rozdziałów pracy.

W rozdziale 2 pt.: **Sformułowanie matematyczne problemu** Autor przedstawił podstawowe równania ruchu, przy czym w opisie fal powierzchniowych uwzględnił siły grawitacji, a pominął siły kapilarne oraz siły wynikające z obrotu ziemi, a także wynikające ze zmian lepkości i gęstości wody. Rozdział ten podzielony został na cztery podrozdziały.

W pierwszym z nich **2.1 pt. Równania ruchu** Autor, wykorzystując zasadę zachowania masy oraz zasadę zachowania pędu, jak również wprowadzając założenie braku wirowości, wyprowadza tak zwane równanie Bernoulliego dla przepływów niestacjonarnych. Równanie to pozwala wyznaczyć pole ciśnienia, gdy znany jest potencjał prędkości oraz jego zmiana w czasie.

W podrozdziale **2.2 pt. Zagadnienia brzegowe** Autor przedstawił na rys. 2.1 układ geometryczny dla modelu matematycznego zgodny z układem przewidzianym do badań modelowych i dla wymienionych wyżej założeń wyznaczył równanie kinematycznego warunku brzegowego na powierzchni swobodnej oraz równanie kinematycznego warunku brzegowego na brzegu pionowej płyty generatora fali, a także równanie na pozostałych nieprzepuszczalnych granicach. Następnie wykorzystując fakt równości ciśnień po obu stronach powierzchni wody i powietrza i przy założeniu, że jest ono równe ciśnieniu atmosferycznemu wyznaczył dynamiczne zagadnienie brzegowe.

W podrozdziale **2.3 pt. Ciśnienie**, na podstawie równania Bernoulliego wyznaczył zależność na obliczanie wartości ciśnienia statycznego i dynamicznego wywołanego uderzeniem fali w dolną powierzchnię poziomej płyty,

W podrozdziale **2.4 pt. Odpowiedź poziomej płyty** przedstawił na rys. 2.2 schemat układu dynamicznego płyty z ukazaniem jej sprężystego podparcia, a także równań na energię potencjalną i kinetyczną układu.

Korzystając z równania Lagrange'a drugiego rzędu Autor wyznaczył zależność na częstość drgań własnych płyty modelu i wyliczył jej wartość.

Następnie wykorzystując koncepcję impulsu siły oraz drugą zasadę dynamiki Newtona dla ruchu obrotowego wyznaczył równania na kąt, prędkość i przyspieszenie wychylenia poziomej płyty modelu w chwili uderzenia w nią fali.

Rozdział 3 pt.: Metoda elementów brzegowych podzielony został na cztery podrozdziały

W podrozdziale 3.1. pt. *Przegląd metod numerycznych* Autor dokonał przeglądu stosowanych obecnie metod modelowania numerycznego oddziaływania fal na obiekty hydrotechniczne i scharakteryzował ich cechy pod względem możliwości ich wykorzystania w swoim modelu numerycznym. Omówił przy tym dwie podstawowe koncepcje modelowania, z których jedna polega na rozwiązywaniu równań Naviera-Stokesa razem z równaniem ciągłości, a druga bazuje na teorii potencjalnej przepływu. Na podstawie analizy publikacji dotyczących podobnych zagadnień brzegowych Autor uznał, moim zdaniem słusznie, za korzystniejszą ze względu na obszerność i czasochłonność obliczeń, a przez to częściej stosowaną metodę Elementów Brzegowych bazującą na teorii potencjalnej przepływu.

W podrozdziale 3.2. pt. *Metoda Elementów Brzegowych* Autor przystąpił do rozwiązania za pomocą Całkowego Równania Brzegowego, warunków brzegowych, co w połączeniu z Metodą Elementów Brzegowych MEB umożliwia dyskretyzację samej granicy obszaru wody i zapisanie równania różniczkowego ruchu jako Całkowe Równanie Brzegowe. Dzięki temu, że w każdym kroku czasowym poszukuje się powierzchni swobodnej, będącą jedną z granic obszaru, konieczność opisu tylko i wyłącznie granicy jest bardzo istotną zaletą tej metody. Na rys. 3.1 przedstawił schemat obszaru R z zaznaczeniem literką Γ_1 i Γ_2 jego granic, a ponadto na rys. 3.2 pokazał w rzucie na płaszczyznę prostopadłą granice obszaru z zaznaczeniem podziału jego brzegów na stałe elementy brzegowe. Wyznaczył zależności warunki brzegowe na obu tych granicach. Przy użyciu funkcji Greena i drugiej tożsamości Greena Autor przetransformował równanie Laplace'a (2.13) do całkowego równania brzegowego w wyniku czego otrzymał zależność (3.3), w której p i q są punktami na granicy obszaru, widocznymi na rys 3.2, a funkcja $C(p)$ jest współczynnikiem geometrycznym i dla położenia punktu na stałym elemencie brzegowym jest równa 0,5. Po zdyskretyzowaniu tego równania przyjęło ono postać (3.4) umożliwiającą zapisanie warunków brzegowych na poszczególnych elementach, a po całkowaniu, wyznaczenie funkcji potencjału prędkości ϕ dla elementu, dla którego warunkiem brzegowym było $\partial\phi/\partial n$. Po podziale brzegu Γ na N elementów i określeniu warunków brzegowych otrzymał równanie układ równań (3.5).

W dalszej części tego podrozdziału Autor przedstawił w szczegółowy sposób schemat rozwiązania, a właściwie obliczenia warunków brzegowych łącznie z wyznaczeniem kroku czasowego za pomocą tzw, geometrycznej liczby Couranta C_o ,

Na koniec przeprowadził ocenę dokładności przedstawionego schematu poprzez oszacowanie błędów przy użyciu dwóch metod. W pierwszej z nich Autor sprawdził dokładność metody Laplace'a, wyznaczając błąd ciągłości (ubytku masy z obszaru obliczeniowego w czasie symulacji numerycznej) oraz wpływ przyjętej liczby Couranta oraz liczby elementów na wartość błędu. W drugiej, sprawdził czy w czasie obliczeń wartość ciśnienia atmosferycznego nie ulegała zmianie i była bliska zeru.

Ponadto Autor dokonał dodatkowej weryfikacji opracowanego modelu numerycznego polegającej na porównaniu uzyskanych z niego wyników ruchu płyty generatora z wynikami analitycznymi otrzymanymi na podstawie teorii Stokesa drugiego rzędu uzyskanymi dla tej samej długości fali i odległości punktu pomiarowego. Wyniki tych testów sprawdzających przedstawił w przejrzysty graficzny sposób na rysunkach 3.3, 3.4 i 3.5

W podrozdziale 3.3. pt. *Chwila uderzenia* Autor w sposób przejrzysty przedstawił proces działania swojego modelu numerycznego podczas jednego z najważniejszych i jednocześnie najtrudniejszych do zamodelowania stanów pracy, w którym z chwilą, gdy pierwszy element powierzchni swobodnej dotknął płyty poziomej, dynamicznie zmieniające się warunki wymuszały dokonywania bardzo szybkich, a przy tym właściwych modyfikacji zmian równań

oraz wprowadzanych do nich wartości parametrów fizycznych i geometrycznych tak, by były one najbardziej odpowiednie dla opisu aktualnie występujących zjawisk.

Na rys. 3.6 przedstawił charakter zmian długości elementów powierzchni swobodnej podczas tego stanu.

W podrozdziale 3.4. pt. *Podsumowanie* Autor wymienia istotne, korzystne cechy opracowanego modelu, a mianowicie:

- nie wymaga on stosowania funkcji wygładzających,
- żadna z konfiguracji parametrów ruchu falowego nie generowała niestabilności,
- uwzględnia oddziaływania w polu falowym wynikające z dyfrakcji oraz odbicia zarówno od pionowej przegrody, jak i modelu poziomej płyty,
- procedura odrywania się powierzchni zwilżonej zapewnia stabilne rozwiązanie.

Rozdział 4 pt.: Pomiary laboratoryjne Autor podzielił na pięć podrozdziałów

W podrozdziale 4.1. pt. *Stanowisko pomiarowe* uzasadnił potrzebę przeprowadzenia badań laboratoryjnych w celu weryfikacji opracowanego modelu numerycznego, co w przypadku potwierdzenia wymaganej zgodności wyników umożliwi praktyczne jego wykorzystanie. Za celowością tych badań przemawiała także posiadana infrastruktura laboratorium hydraulicznego IBW PAN, w tym głównie, przedstawiony na rys. 4.1, kanał falowy wyposażony w programowany generator falowy typu tłokowego ze sztywną pionową płytą napędzaną silnikiem krokowym, a także nowoczesna aparatura pomiarowa i rejestrująca. Głównym przedmiotem pomiarów jest model poziomej płyty falochronu, wykonany z aluminium. Składa się on z dwóch płyt, dolnej i górnej, ramy, żeber wzłużnych, dwóch ścian: czołowej i tylnej oraz z innych elementów połączonych w całość za pomocą spawania lub śrub, co można dostrzec na rys. 4.3, 4.4 i 4.5. Model płyty połączony jest przegubowo do pionowej przegrody kanału za pomocą stałych czopów i łożysk tocznych osadzonych w bocznych żebrach w pobliżu tylnej ściany, co umożliwia jego wychylania przy pomijalnie małych oporach ruchu. Konstrukcja przegrody zapewniała możliwość zmiany odległości mocowania modelu płyty od dna kanału. W płycie dolnej modelu przygotowano otwory dla dwóch konfiguracji ustawienia czujników ciśnienia dla prowadzenia pomiaru ciśnienia wody na płytę. Otwory nie wykorzystywane i wszystkie złącza elementów były na czas pomiaru dokładnie uszczelniane. Od strony generatora falowego, model został zawieszony na dwóch układach sprężyn. Każdy układ składał się z dwóch zestawów, z których każdy zawierał po trzy sprężyny. Po każdym ustawieniu modelu układ był wstępnie napinany, aby podczas pomiarów nie doszło do jego zluźnienia.

W podrozdziale 4.2. pt. *Przeprowadzone pomiary* Autor określił i przedstawił w Tabelicy 4.1 konfiguracje parametrów ruchu falowego dla trzech wartości długości $\lambda = 1,75, 3,5$ i $5,25$ m i amplitud fali $A = 0,03, 0,06$ i $0,09$ m oraz ich oznaczenia, w których litery S, M i L oznaczały kolejno rosnące długości fal, zaś liczby 1, 2 i 3 – rosnące wartości amplitud. Określił także trzy wartości $d = 0,03, 0,06$ oraz $0,09$ odległości zamocowania płyty modelu od powierzchni spokojnej wody. Dla każdej z tych konfiguracji ruchu fali przewidział prowadzenie pomiarów dla tych lokalizacji modelu płyty poziomej, dla których wartość d była większa od amplitudy fali, co przedstawił w Tabelicy 4.2.

Pierwszy etap pomiarów Autor przeprowadził przed zamontowaniem modelu płyty. Miał on na celu, zarejestrowanie ruchu powierzchni swobodnej generowanego falowania za pomocą sond falowych, których rozmieszczenie przedstawiono na rys. 4.6. Rozmieszczenie sond podczas pomiarów z modelem płyty przedstawiono na rys. 4.3. Na rysunkach 4.8 i 4.9 przedstawiono rozmieszczenie czujników pomiaru ciśnienia PG dla dwóch wariantów: A - z czujnikami rozmieszczonymi w dwóch równoległych rzędach i B - z czujnikami w jednym rzędzie.

Drugi etap pomiarów miał na celu wyznaczenie sprężystości statycznej i dynamicznej układu pomiarowego przeprowadzono w powietrzu. Wyniki tych pomiarów Autor przedstawił na w sposób graficzny na rys. 4.10 i 4.11.

W podrozdziale **4.3. pt. Wyniki pomiarów** Autor przedstawił wyniki kolejnych pomiarów i tak na rys. 4.12 są to zarejestrowane przebiegi wychylenia płyty generatora oraz wychylenia powierzchni swobodnej przez sondę WG6 dla wszystkich konfiguracji ruchu falowego.

W tabelicy 4.3 zamieścił zidentyfikowane czasy uderzenia odbitej fali w poziomą płytę pomierzone dla rozmieszczenia A czujników ciśnienia i dla tych konfiguracji falowania, w których odległość d była większa od amplitudy fali. Wyniki podobnego pomiaru, ale dla konfiguracji B rozmieszczenia czujników zamieścił w tabelicy 4.4. Wyniki obu tych pomiarów są bardzo zbliżone, a niewielkie różnice wynikają z nieco różniącej się odległości położenia Pierwszego czujnika od pionowej płyty w obu wariantach ich rozmieszczenia.

Wyniki pomiarów maksymalnych wychyleń płyty wykonane dla wszystkich konfiguracji falowania i konfiguracji A rozmieszczenia czujników ciśnienia, dla trzech położen płyty określonych stosunkiem d/h przedstawiono na rys. 4.13 przy czym po lewej stronie pomierzone czujnikiem DG1, a po prawej - czujnikami DG2. Wyniki podobnego pomiaru, ale dla konfiguracji B przedstawiono na rys. 4.14. Zgodnie z przewidywaniem wyniki te ukazują dużą zależność przemieszczenia płyty od amplitudy fali oraz od stosunku d/h , przy czym dla stałej fali, im stosunek ten jest mniejszy tym większe przemieszczenia płyty.

Na rys. 4.15 przedstawił przebiegi ciśnień na parach czujników jednakowo oddalonych od osi wychylenia płyty dla dwóch testów T1 i T13. Wynika z nich, że o ile dla testu T13 przebiegi pomierzone czujnikami P1 i P4 praktycznie pokrywały się to podczas testu T1 różnica w czasie wystąpienia maksymalnego ciśnienia była wprawdzie mała poniżej 0,5% okresu fali, ale wartości zarejestrowanych maksymalnych ciśnień różniły się nawet kilkakrotnie.

Wyznaczone częstotliwości drgań modelu płyty dla wszystkich konfiguracji falowania przedstawił na rysunku 4.16. Siłę oddziaływania wody na model płyty wyznaczył całkując ciśnienia po powierzchni zwilżonej płyty. Wyniki wyznaczonych w ten sposób przebiegów czasowych generowanej składowej siły na modelu płyty dla wszystkich konfiguracji falowania i trzech odległości d położenia płyty przedstawił na rysunkach 4.17, 4.18 i 4.19. Ponadto w celu dalszego potwierdzenia prawidłowości pomiarów porównał wartości kąta α wychylenia otrzymane z pomiarów przemieszczeń liniowych końca płyty z kątami obliczonymi przez dwukrotne całkowania przyspieszeń w czasie. Otrzymane w ten sposób wyniki dla testów T5 i T7, T11 i T122 oraz T13 i T15 przedstawił kolejno na rys. 4.20, 4.21 i 4.22. Widoczna jest na nich duża zgodność wartości kąta.

W podrozdziale **4.4. pt. Posumowanie** Autor w zwięzły sposób zasadność wykonanych pomiarów laboratoryjnych.

Rozdział 5 pt.: Wyniki Autor podzielił na pięć podrozdziałów.

W podrozdziale **5.1. pt. Weryfikacja modelu numerycznego** Autor w przejrzysty sposób graficzny sposób dokonał porównania pomierzonych (linia czerwona) i obliczonych w symulacjach numerycznych (linia niebieska) wartości istotnych parametrów badanego zjawiska uderzenia odbitej fali w poziomą płytę falochronu parapetowego dla wszystkich założonych konfiguracji falowania i wysokości η umieszczenia poziomej płyty nad powierzchnią swobodną położenia.

Na rysunkach od 5.1 do 5.7 przedstawiał od lewej strony przebiegi czasowe wartości η wzniesienia powierzchni swobodnej wody, a następnie gęstości widmowe (amplituda [m] w funkcji częstotliwości [Hz]) pomierzone i obliczone w symulacjach numerycznych. Przedstawione wyniki ukazują dużą zgodność, pogarszającą nieco ze wzrostem amplitudy

fali, przy czym największy błąd obliczonej wysokości fali wystąpił dla fali L3 o największej długości i amplitudzie nie przekroczył 3%. Uzyskano zadowalającą zgodność powierzchni swobodnej obliczonej i pomierzonej. Niewielkie przeszacowania wychylenia powierzchni w modelu teoretycznym wynikają z nie uwzględnienia w nim braku tłumienia, które Autor świadomie i z uzasadnionego powodu pominął w swoim modelu.

Wyniki numeryczne pozwoliły wyznaczyć prędkości pionowe cząstek cieczy tuż przed uderzeniem. Maksymalne wartości tych prędkości przedstawione zostały na rys. 5.8. Wynika z nich, że duże podobieństwo wartości pionowych prędkości występuje dla tych samych amplitud fali, przy czym ze wzrostem amplitudy rośnie prędkość, a dla stałej amplitudy prędkość wzrasta ze zmniejszaniem odległości d .

Na rysunkach od 5.9 do 5.17 przedstawił przebiegi czasowe pomierzonych i obliczonych ciśnień dla tych samych testów i lokalizacji czujnika, zgodnie z tabelicą 5.1. Dla testów, w których wielkość d była zbliżona do amplitudy fali, zgodność wyników jest bardzo dobra. Wyniki obliczeń nie opisują jednak w sposób zadowalający oscylacyjnego charakteru ujemnego ciśnienia w fazie odrywania się powierzchni zwilżonej od płyty, co wynika z tego, że w modelu obliczeniowym płyta jest nieruchoma. Wartości obliczonych maksymalnych ciśnień dla testów 2, 5, 8, 12 i 14 są znacznie wyższe od pomierzonych. Autor słusznie wyjaśnił to ograniczoną częstotliwością rejestrowania ciśnienia przez układ pomiarowy. Wyraźny wpływ długości fali na wzrost ciśnienia widoczny jest tylko na wynikach z testów T16, T17 i T18.

Podczas prowadzenia obliczeń miejsca występowania maksymalnego ciśnienia fali odbitej dla warunków dla kolejnych testów Autor stwierdził, że dla pewnych konfiguracji falowania i parametru d maksymalna wartość ciśnienia nie występuje najbliżej ściany pionowej, co wynikało z pomiarów, a także z wyników w pracy eksperymentalnej (Kisacik i in.). Potwierdził to wynikami obliczeń numerycznych dla warunków, jak dla testu T5. Wyniki te przedstawił na Rys. 5.18.

Kolejnym porównywanym parametrem były siły generowane na powierzchni zwilżonej płyty. Wartości tych sił wyznaczono na podstawie pomiarów ciśnienia za pomocą czujników rozmieszczonych wg konfiguracji B. Ciśnienia w modelu numerycznym całkowane były dla wszystkich elementów brzegowych znajdujących się w położeniach jak w konfiguracji B.

Otrzymane wyniki z wszystkich testów przedstawione zostały na rysunkach od 5.19 do 5.27. Ich zgodność i inne cechy były podobne, jak w przypadku ciśnień.

Ostatnim z porównywanym parametrów był kąt wychylenia modelu płyty a właściwie przebieg zmian tego kąta w czasie. Przebiegi kątów wyznaczone z pomierzonych liniowych przemieszczeń końca płyty dla testów Autor porównał z przebiegami kątów obliczonych z uwzględnieniem masy wody dołączonej i przedstawił na rysunkach od 5.28 do 5.36. Dla wszystkich przedstawionych przypadków stwierdzono dobrą zgodność pierwszego, maksymalnego wychylenia płyty. Dalszy przebieg wielkości kąta w czasie jest zgodny w zakresie uzyskanej częstotliwości drgań. Wyniki dla przypadku $d \ll A$ okazały się niewiarygodne.

W podrozdziale 5.2. *pt. Eksperyment numeryczny* Autor wyznaczył wpływ poszczególnych parametrów wejściowych modelu na obliczane ciśnienia generowane przez falę uderzeniową na płycie, co w badaniach laboratoryjnych napotyka na ograniczenia z powodu złożoności procesów falowania, jego generacji oraz współdziaływania z budowlą. Jako warunki brzegowe przyjął trzy różne wartości potencjałów, które wyznaczył kolejno: z teorii liniowej, z teorii drugiego rzędu Stokesa i z teorii drugiego rzędu z dodaną poprawką uwzględniającą warunki brzegowe na powierzchni swobodnej. Z warunków tych wyznaczył wzniesienia powierzchni swobodnej η . Obliczenia wykonał dla trzech wartości długości i amplitudy fali oraz wysokości położenia poziomej płyty nad powierzchnią

swobodną. Wyniki przedstawił w postaci wykresów na rysunkach od 5.37 do 5.39, przy czym zarówno współrzędne jak i obliczone wielkości podał jako bezwymiarowe. Wynika z nich, że ze wzrostem amplitudy wzrasta ciśnienie, ale w sposób nieliniowy. Uwzględnienie poprawki do teorii drugiego rzędu, powoduje niewielki wzrost. Wpływ długości fali na ciśnienia wywołane uderzeniem fali wodnej jest niewielki. Jest on nieco wyraźniejszy dla fal nieliniowych. Wpływ położenia płyty nad powierzchnią swobodną na ciśnienia okazał się największy. Ciśnienie wzrasta ze zmniejszeniem się odległości d , zwłaszcza przy uwzględnieniu nieliniowości fal. Jednak dla większych wartości d wpływ nieliniowości prawie zanika. Można to ocenić na rysunkach od 5.40 do 5.42 ukazujących wyniki obliczeń ciśnienia wykonane dla bezwymiarowego czasu dla trzech potencjałów i wartości amplitudy i długości fali oraz odległości d .

W podrozdziale 5.3. pt. **Podsumowanie** Autor wymienił istotniejsze wnioski wynikające z opisaney w tym rozdziale weryfikacji wyników obliczeń numerycznych wynikami otrzymanymi z badań laboratoryjnych i tak:

- opracowany model teoretyczny bardzo dobrze działa w zakresie generacji falowania;
- obliczone za pomocą modelu ciśnienia wykazują dobrą zgodność z pomierzonymi, zwłaszcza w zakresie małych różnic wartości odległości d i amplitudy fali A ;
- dla większych różnic d i A wartości obliczonego piku ciśnienia mogą być większe od pomierzonych z uwagi na ograniczoną częstotliwość próbkowania;
- dla $d \ll A$, z uwagi na całkowite zwilżenie płyty, czujniki nie zarejestrowały impulsu ciśnienia;
- siły wyznaczone na podstawie ciśnień są zgodne z pomierzonymi zwłaszcza w pierwszej części uderzenia fali;
- nie stwierdzono jednoznacznej zależności ciśnienia od długości fali;
- maksymalne wychylenie płyty rośnie ze wzrostem długości fali;
- opracowany model pozwolił wykonać analizę parametryczną dla fal teoretycznych, o znanym potencjale, z której wynika, że znaczny wpływ na ciśnienia ma amplituda fali A i parametr d , zaś znikomy wpływ ma długość fali.

Rozdział 6 pt.: Wnioski

W rozdziale tym Autor przedstawił przedmiot swojej pracy dotyczącej rozwiązania nieliniowego zagadnienia oddziaływania falowania na poziomy element konstrukcji hydrotechnicznej i wykorzystanie uzyskanych ciśnień w modelu drgań poziomej, sztywnej płyty w celu wyznaczenia reakcji na wymuszenie hydrodynamiczne. Model ten ze względu na przyjęte założenia ma zastosowanie do poziomych elementów konstrukcji położonych nad powierzchnią swobodną wody. Otrzymane z obliczeń numerycznych wyniki zostały zweryfikowane badaniami laboratoryjnymi, co umożliwiło przeprowadzenie analiz numerycznych wpływu wybranych parametrów na zjawiska i obciążenia występujące w podobnych obiektach. Można powiedzieć, że opracowany model numeryczny jest użytecznym i szybkim narzędziem mogącym wspomagać zarówno modelowanie fizyczne jak i prace projektowe. Umożliwia wykonanie szerokiej analizy parametrów istotnych z punktu widzenia trwałości projektowanej konstrukcji hydrotechnicznej.

Na zakończenie Autor przedstawił kierunek dalszych swoich prac badawczych, które będą miały na celu doskonalenie opracowanego modelu numerycznego. W pierwszej kolejności dotyczyć będą implementacji tłumienia numerycznego i oszacowania jego wpływu na generowane wartości ciśnienia, następnie sformułowania i rozwiązania zagadnienia początkowo-brzegowego dla ruchu płyta, a na końcu rozszerzenie modelu o trzeci wymiar.

Praca napisana została poprawnie pod względem językowym z bardzo staraniem i przejrzystością wykonanymi rysunkami, fotografiami i wykresami dzięki czemu precyzyjnie prezentuje zawarte w niej treści merytoryczne. Podobnie przejrzystość wykonana została dokumentacja rysunkowa stanowiska laboratoryjnego, obejmująca łącznie 22 arkusze A-4 których część przedstawiona została w 3D. Autor jednak nie ustrzegł się pewnych błędów i pomyłek, w tym, których wykaz przedstawiłem poniżej.

3. Uwagi szczegółowe

Wykaz uwag dotyczących dostrzeżonych w treści pracy błędów i pomyłek.

1. Str. 12,13 i 21 Autor opisując zjawiska hydrodynamiczne użył słowa „płyn”. Moim zdaniem lepiej byłoby użyć „woda” lub „ciecz”. Płyn jest bowiem pojęciem szerszym i dotyczy także gazów.
2. Str. 15 – jest: *zamieszczana* - powinno być: zamieszczono.
3. Str. 20 – *Laplaca* – Laplace’a.
4. Str. 21 – $(\nabla \phi)^2$ - $\nabla^2 \phi$; *podobnie* - podobne; *gromadzeniu* - gromadzenia.
5. Str. 22 – *będąca* – będący; *jej* - jego. Str. 28 – *pomocy* – pomocą.
6. Str.43 Tab. 4.1 kol. czwarta – *M3* – L2. Str. 53 – *przez* – przez to; – *masą* – z masą.
7. Str. 62 – *wielkości* – wartości. Str.67 – *spadkiem* – lub spadkiem; – *11 i 13* – 12 i 14 ?

Pewnym mankamentem dokumentacji rysunkowej pracy jest nieprzestrzeżenie w niej zasad rysunku technicznego, zwłaszcza w przedstawianiu powierzchni gwintowanych, osi symetrii, i przekrojów i wymiarowania. Niemniej jednak wykonana została na tyle przejrzystość, że łącznie z rysunkami przedstawionymi w aksonometrii jest praktycznie w pełni czytelna i zrozumiała.

4. Ocena merytoryczna pracy

Zawarte w rozprawie treści są zgodne z jej tytułem. Podział pracy na rozdziały jest właściwy, zgodny z kolejnością realizowanych zadań badawczych i odpowiada nazwom tych rozdziałów, co czyni całą pracę bardziej przejrzystą. Obszerny spis literatury zawiera 54 cytowane w pracy pozycje, spośród których 38 zostało opublikowanych po 1999 roku, w tym 17 – po 2009 roku. Świadczy to o dobrej znajomości przez Doktoranta aktualnej problematyki naukowo badawczej dotyczącej tematycznie rozprawy, co podnosi jej wartość.

Przedstawione w rozprawie prace badawcze w tym:

- przeprowadzenie na podstawie dostępnej literatury szczegółowej analizy i opisu zjawisk hydrodynamicznych zachodzących podczas uderzenia odbitej fali w poziomą płytę falochronu parapetowego zamocowaną powyżej powierzchni swobodnej,
- sformułowanie matematyczne problemu i rozwiązanie nieliniowego zagadnienia oddziaływania falowania wody z poziomym elementem konstrukcji hydrotechnicznej i zastosowanie uzyskanych ciśnień w modelu drgań poziomej, sztywnej płyty w celu wyznaczenia reakcji na wymuszenie hydrodynamiczne,
- zaprojektowanie konstrukcji i układu pomiarowego oryginalnego stanowiska laboratoryjnego, zamontowanego w kanele falowym laboratorium hydraulicznego IBM PAN,
- wykonanie pomiarów testujących w celu wyznaczenia sprężystości układu pomiarowego oraz wartości częstości drgań własnych,
- opracowanie programu badań laboratoryjnych z wyznaczeniem parametrów, które będą mierzone oraz konfiguracji wartości parametrów falowania i wybranych geometrycznych, które mają wpływ na badane zjawiska i dla których wykonane zostały badania,
- przeprowadzenie badań laboratoryjnych i analizy porównawczej wyników otrzymanych

- z pomiarów z wynikami obliczonymi w symulacjach numerycznych wszystkich istotnych parametrów,
- wykorzystanie opracowanego modelu numerycznego do określenia wpływu poszczególnych parametrów wejściowych modelu teoretycznego na obliczone nim ciśnienia działające na poziomą płytę, a generowane przez falę uderzającą.
 - w oparciu o przeprowadzoną analizę porównawczą wykazanie możliwości praktycznego wykorzystania opracowanego modelu na etapie projektowania urządzeń hydrotechnicznych, stanowią pomyślną realizację kolejnych zadań badawczych, zarówno teoretycznych jak i laboratoryjnych, niezbędnych dla osiągnięcia, podanego we Wstępie, pełnego celu recenzowanej pracy.

Wniosek końcowy

Recenzowana dysertacja doktorska mgra Dawida Majewskiego stanowi samodzielne i oryginalne opracowanie naukowe dotyczące aktualnej oraz bardzo przydatnej tematyki badawczej, a przy tym mające dużą wartość poznawczą i utylitarną. Poziom przedstawionych w niej analiz zjawiska uderzenia w poziomą płytę falochronu fali odbitej od pionowej ściany i opracowanie modelu teoretycznego opisującego te zjawiska jest wysoki. Podobnie wysoko oceniam przeprowadzone badania laboratoryjne. Moim zdaniem część z wymienionych w „ocenie merytorycznej” opracowań, a mianowicie:

- sformułowanie matematyczne problemu i rozwiązanie nieliniowego zagadnienia oddziaływania falowania wody z poziomym elementem konstrukcji hydrotechnicznej i zastosowanie uzyskanych ciśnień w modelu drgań poziomej, sztywnej płyty w celu wyznaczenia reakcji na wymuszenie hydrodynamiczne, modele przecieków w szczelinach o zmiennej geometrii,
- zaprojektowanie konstrukcji i układu pomiarowego oryginalnego stanowiska laboratoryjnego oraz opracowanie programu badań laboratoryjnych i wykonanie pomiarów,
- weryfikacja opracowanego modelu teoretycznego poprzez analizę porównawczą wyników otrzymanych z pomiarów z wynikami obliczonymi w symulacjach numerycznych wszystkich istotnych parametrów,

można uznać za oryginalne prace twórcze Autora, co najlepiej świadczy o Jego szerokiej wiedzy i umiejętności prowadzenia badań naukowych z wykorzystaniem najnowszej wiedzy i narzędzi badawczych.

Podsumowując stwierdzam, że opracowana przez mgra Dawida Majewskiego rozprawa doktorska pt. **Uderzenie fali odbitej w poziomą płytę zamocowaną powyżej powierzchni swobodnej** spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z USTAWĄ z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. z dnia 16.04.2003r.).

Stawiam wniosek o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony pracy.

