

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr Anety Zdolskiej  
pt.

### **GENERACJA I TRANSFORMACJA NIELINIOWYCH FAL GRAWITACYJNYCH W BASENIE FALOWYM**

Podstawa opracowania recenzji:

**Uchwała Rady Naukowej**

**INSTYTUTU BUDOWNICTWA WODNEGO POLSKIEJ AKADEMII NAUK**  
z dnia 14.07.09. 2020 r.

#### **1. Przedmiot recenzji**

Recenzowana rozprawa doktorska wchodzi w zakres ważnych i aktualnych badań naukowych dotyczących teorii trójwymiarowych generatorów i wielokierunkowego pola falowania w basenie falowym. Już we Wstępie Doktorantka dokonała chronologicznego przeglądu wybranych prac opisujących liniowe i nieliniowe teorie generatorów falowania, a także teorie trójwymiarowych generatorów i wielowymiarowego pola falowania w numerycznym basenie falowym. Za główny cel swoich badań Doktorantka postawiła sobie rozszerzenie dotychczasowego stanu wiedzy w tej tematyce o opracowanie pół-analitycznego nieliniowego modelu numerycznego, który w sposób efektywny opisywałby zjawiska zachodzące podczas generacji i transformacji nieliniowych fal grawitacyjnych w zamkniętym akwenu. W celu doświadczalnej weryfikacji opracowanego modelu numerycznego Doktorantka przeprowadziła pomiary w kanale falowym IBW PAN, w których zastosowany został oryginalny typ bocznego wywoływacza wahadłowego, umożliwiającego generowanie trójwymiarowego pola falowego.

Wyniki obliczonych i pomierzonych w badaniach laboratoryjnych wartości wzniesień powierzchni swobodnej oraz ich faz wykazały bardzo dobrą zgodność.

Uwzględniając powyższe należy uznać, że podjęta w rozprawie tematyka jest ważna i aktualna, a postawiony przez Doktorantkę cel jest istotny dla rozwoju badań teorii trójwymiarowych generatorów i wielokierunkowego pola falowania w basenie falowym.

#### **2. Ogólna ocena rozprawy**

Przedstawiona do oceny rozprawa jest bardzo obszerna, zawiera łącznie 131 strony. Zawiera: streszczenie, spis treści, spis symboli, 5 rozdziałów i wykaz literatury z przytoczonymi 64 pozycjami.

**Rozdział 1** pt.: „**Wstęp**” Autorka podzieliła na pięć podrozdziałów.

W pierwszym z nich zatytułowanym **1.1 Znaczenie basenu falowego w modelowaniu zagadnień hydrotechniki**, ukazuje celowość prowadzenia badań laboratoryjnych przyszłych, z reguły bardzo kosztownych konstrukcji hydrotechnicznych, zarówno posadowionych jak i

plywających, których ostatnio szybko przybywa, w związku z pozyskiwaniem podwodnych złóż mineralnych, jak i farm wiatrowych. Badania takie prowadzone w dobrze wyposażonych basenach falowych odpowiednie urządzenia do generowania różnego rodzaju fal umożliwiają już na etapie projektowania tych konstrukcji hydrotechnicznych wyznaczyć charakter i wartości obciążeń wywołanych falowaniem, jakie mogą wystąpić podczas przyszłej eksploatacji tych obiektów.

W podrozdziale **1.2 p.t. Rodzaje generatorów falowania w basenach falowych** Dyplomantka przedstawiła fotografie oraz schematycznie konstrukcję i zasadę działania kilku spotykanych generatorów falowania stosowanych obecnie w basenach falowych, w tym:

- generatora typu tłokowego,
- generatora typu klapowego (wahadłowego),
- generatora typu klinowego,
- generatora typu segmentowego składającego się z wielu niesprężonych ze sobą segmentów umożliwiających generację fal rozchodzących się pod różnymi kątami oraz,
- generatora skonstruowanego specjalnie do badań związanych z doktoratem będącego hybrydą generatora tłokowego i wahadłowego bocznego, który umożliwił uzyskanie trójwymiarowego pola falowego.

W podrozdziale **1.3 p.t. Liniowa i nieliniowa teoria generatorów falowania** Autorka przedstawiła w sposób chronologiczny rozwój prac badawczych dotyczących liniowych teorii generatorów falowania oraz ich niedoskonałość do opisu długich fal o dużej amplitudzie, co uzasadniało potrzebę zastosowania teorii i rozwiązań nieliniowych. W dalszej części Doktorantka omówiła prace różnych autorów zajmujących się tą tematyką, w tym relatywnie nowe osiągnięcia (Sulisz i Paprota), dotyczące opracowania i zweryfikowania w kanale falowym dwuwymiarowego modelu trzeciego rzędu, umożliwiającego rozkład ciągów fal głębokowodnych i formowanie fal ekstremalnych.

W podrozdziale **1.4 p.t. Teoria trójwymiarowych generatorów i wielokierunkowego pola w basenie falowym** Doktorantka przedstawiła rozwój metody spektralnej do skonstruowania rozwiązania zależnego od czasu, pozwalającego na opis fal nieliniowych, a następnie rozszerzenie tych metod do zagadnienia trójwymiarowego dla tzw. fal biegnących oraz dla zagadnienia trójwymiarowego fal przejściowych. Znaczny rozwój technik obliczeniowych i wzrost mocy procesorów spowodowały duże zainteresowanie zespołów badawczych tematyką modelowania numerycznego basenów falowych (NWT – *Numerical Wave Tank*), z których niektóre oparto na metodzie różnic skończonych (*Different Potential Model*). Na koniec tego podrozdziału Autorka konkluduje, że najbardziej efektywne okazały się modele oparte na metodach spektralnych, a to dzięki możliwości wielokrotnego użycia w nich algorytmu (*Fast Fourier Transform - FFT*) i metod programowania równoległego (Paprota i Sulisz 2019).

W podrozdziale **1.5 p.t. Cel i przedmiot pracy** Autorka nawiązując do omówionych w poprzednich podrozdziałach prac badawczych i przedstawionych w nich nieliniowych modeli generacji i propagacji nieliniowych fal wodnych podkreśla, że wymagają one dyskredytacji w czasie i przestrzeni, co ogranicza ich zastosowanie do stosunkowo małych obszarów obliczeniowych. Dodatkowym ich problemem jest ograniczona stabilność numeryczna. Oznacza to, że nadal istnieje potrzeba opracowania efektywnego modelu matematycznego i opartego na nim modelu numerycznego, pozwalającego na efektywną i wiarygodną predykcję pola falowego dla dużych basenów falowych, możliwą do przeprowadzenia w rozsądnie krótkim czasie obliczeń. Przemawia za tym także możliwość wykorzystania znajdującego się w IBW PAN kanału falowego wyposażonego w boczny płytkowy generator fal pozwalający

wytwarzać kierunkowe, nieliniowe fale regularne i nieregularne, a tym samym zweryfikować wyniki obliczeń.

Podsumowując, Dyplomantka uznała, że celem jej pracy jest opracowanie trójwymiarowego modelu matematycznego i numerycznego generacji i transformacji nieliniowych fal grawitacyjnych w basenie falowym z uwzględnieniem efektów początku ruchu cieczy oraz walidacja tego modelu wynikami badań przeprowadzonych w laboratorium hydraulicznym dla szerokiego zakresu parametrów falowych.

## **Rozdział 2 p.t. Modelowanie matematyczne falowego pola prędkości i wzniesienia powierzchni swobodnej w obszarze trójwymiarowym**

W rozdziale tym Autorka sformułowała model matematyczny opisujący ruch falowy fal powierzchniowych w obszarze trójwymiarowym zgodnie z opisem Eulera .

W podrozdziale 2.3.1 i 2.3.2 zdefiniowała zagadnienie początkowo-brzegowe dla obszaru obliczeniowego odpowiadającego basenowi falowemu wyposażonemu w segmentowy generator falowania, kolejno w rozwinięciu do pierwszego i drugiego rzędu.

Rozwiązanie to opiera się na metodzie półanalitycznej wykorzystującej technikę rozwijania rozwiązania w szereg funkcji własnych oraz szybką transformatę Fouriera.

Do znalezienia współczynników rozwiązania związanych ze swobodną powierzchnią zastosowała wielokrokową metodę całkowania numerycznego predyktor – korektor Adamsa – Bashfortha – Moultona czwartego rzędu (ABM4). Współczynniki rozwiązania związane z powierzchnią generatora wyznaczone są na drodze rozwinięcia w szereg Taylora warunku na powierzchni generatora do drugiego rzędu i obliczeń wykorzystujących całkowanie numeryczne.

W podrozdziale 2.4 Doktorantka przedstawiła zastosowanie tłumienia na brzegach obszaru obliczeniowego polegające na wprowadzeniu członu dysypatywnego do warunku kinematycznego na powierzchni swobodnej.

W ostatnim podrozdziale 2.5, w części dotyczącej modelowania matematycznego Autorka przedstawiła proste rozwiązanie analityczne zagadnienia generacji fal w basenie z wywoływaczem segmentowym wykorzystane w dalszej części pracy do weryfikacji wyników symulacji programu numerycznego w rozwinięciu liniowym.

## **Rozdział 3 p.t. Analiza wyników teoretycznych**

składa się z pięciu podrozdziałów, w których Autorka przedstawiła szereg eksperymentów numerycznych przeprowadzonych przy wykorzystaniu modelu matematycznego opisanego w poprzednim rozdziale. Doktorantka podzieliła te eksperymenty na części. Pierwszą z nich poświęciła falom regularnym i podsumowała w podrozdziale 3.3 zestawieniem wyników analizy widmowej przeprowadzonej dla zapisanych w eksperymentach wzniesień powierzchni swobodnej w wybranych punktach basenu numerycznego. W kolejnej części przedstawiła symulację generacji i propagacji fal w basenie numerycznym przy takim dobraniu wymiarów i parametrów fal generowanych przez wywoływacz segmentowy, by uzyskać podczas propagacji tych fal efekty rezonansowe. Analiza wyników symulacji numerycznych i ich analiz widmowych pozwoliła Doktorantce dokonać kilku istotnych spostrzeżeń dotyczących powstawania efektów rezonansowych w basenie falowym z zastosowaniem ruchu generatora segmentowego opisanego trzema różnymi funkcjami kształtu. W ostatnim podrozdziale 3.5 Autorka przedstawiła obliczenia mające na celu sprawdzenie dokładności zaprezentowanego w pracy rozwiązania w aspekcie zasad zachowania masy i energii. Są to standardowe procedury sprawdzania poprawności działania i dokładności modeli numerycznych poparte odpowiednią pozycją literaturową w dziedzinie hydromechaniki. Należy podkreślić, że uzyskana w tych obliczeniach dokładność bilansu masy i energii dla przedstawionego modelu

numerycznego jest rzędu wielkości  $10^{-4}$ , co według literatury w dziedzinie metod spektralnych jest bardzo dobrym wynikiem. Ponadto Autorka przedstawiła dodatkowo procedurę obliczeniową sprawdzenia zachowania masy i energii dla basenu numerycznego podczas generowania falowania przy użyciu generatora o kształcie bardziej złożonym niż kształt tłoka, co jest nowością i stanowi kolejny krok rozwoju w dziedzinie obliczeń dla modeli numerycznych basenów falowych. Rozdział ten zakończyła opisem przyjętych warunków i parametrów decydujących o stabilności obliczeń numerycznych zaprezentowanym modelem.

**Rozdział 4 p.t. Badania eksperymentalne** został podzielony na cztery podrozdziały. W pierwszych dwóch podrozdziałach Autorka przedstawiła zwymiarowane rysunki kanału falowego w widoku z boku i z góry z zaznaczeniem położenia wywoływacza fal, a także rysunki i fotografie płyty wahadłowego wywoływacza bocznego. Ponadto omówiła metodykę i zakres badań doświadczalnych przeprowadzonych dla fal krótkich ( $L/h = 0,75 - 6,0$ ) i długich ( $L/h = 8,0 - 10,0$ ) generowanych bocznym wywoływaczem wahadłowym, sprzężonym z generatorem tłokowym, będącym na wyposażeniu kanału. Podczas badań generowane były rezonansowe dla geometrii kanału fale harmoniczne ( $L/h=0,75-3,0$ ), w obecności których generowały się poprzeczne fale stojące w polu bliskim generatora i nakładały się na wygenerowaną przez generator boczny falę progresywną. W ten sposób otrzymano w kanale falowym trójwymiarowe pole falowe odpowiadające warunkom falowym generowanym w basenach hydrotechnicznych z wywoływaczami segmentowymi. Generowane były też nierezonansowe fale harmoniczne ( $L/h=4,0 - 10,0$ ), propagujące się wzdłuż kanału. Pomiary przeprowadzono dla dwóch głębokości wody:  $h=0,4$  i  $0,6$  m.

W trzecim podrozdziale Doktorantka przedstawiła w sposób graficzny przebiegi, pomierzonych przez układ sond, profili fal generowanych wywoływaczem wahadłowym bocznym dla trzech nierezonansowych wartości długości fal:  $L/h = 4, 6$  i  $10$  oraz dla trzech rezonansowych wartości długości fal:  $L/h = 1, 2$  i  $3$ . Następnie, w czwartym podrozdziale, dokonała w sposób graficzny porównania wyników rozwiązania teoretycznego z wynikami badań eksperymentalnych przeprowadzonych z wywoływaczem wahadłowym bocznym. Wyniki obliczeń oraz otrzymane z pomiarów wykazują znaczną zgodność, zarówno co do ich wartości jak i co do zgodności ich faz. Świadczy to o dużej dokładności i wiarygodności, a tym samym przydatności opracowanego rozwiązania teoretycznego za pomocą nieliniowego modelu numerycznego.

**Rozdział 5 p.t. Posumowanie i wnioski** posłużył Doktorantce do wymienienia opracowanych przez siebie, zawartych w pracy, oryginalnych osiągnięć naukowych uwieńczonych efektywnym rozwiązaniem problemu generacji, propagacji i transformacji falowania, umożliwiającym opisanie trójwymiarowych zjawisk występujących w basenach falowych. Podkreśliła przy tym istotne znaczenie przeprowadzonej przez siebie weryfikacji opracowanego modelu badaniami laboratoryjnymi, co znacznie zwiększa możliwości jego wykorzystania do badań hydrotechnicznych.

Na zakończenie Autorka na podstawie analizy przedstawionych w pracy wyników badań teoretycznych i eksperymentalnych sformułowała dziewięć wniosków, które są istotne dla naukowców zajmujących się obiektami hydrotechnicznymi.

### 3. Uwagi ogólne

Praca napisana została poprawnie pod względem językowym z bardzo starannie i przejrzysto wykonanymi rysunkami, fotografiami i wykresami, a także równaniami

matematycznymi, dzięki czemu precyzyjnie prezentuje zawarte w niej treści merytoryczne. Kilka dostrzeżonych pomyłek typu „literówki” nie ma wpływu na ogólnie wysoką formalną ocenę rozprawy.

#### **4. Ocena merytoryczna**

Zawarte w rozprawie treści są zgodne z jej tytułem. Podział pracy na rozdziały jest logiczny, zgodny z kolejnością realizowanych zadań badawczych i odpowiada nazwom tych rozdziałów, co czyni całą pracę przejrzystą. Obszerny wykaz literatury zawiera 64 cytowanych w pracy pozycji, spośród których 22 zostało opublikowanych w ostatnim dwudziestolecium, co świadczy o dobrej znajomości przez Doktorantkę aktualnej problematyki naukowo badawczej dotyczącej tematycznie rozprawy.

Podjęty przez Doktorantkę problem badawczy, którego celem było rozwiązanie zagadnienia propagacji nieliniowych fal powierzchniowych w obszarze trójwymiarowym przy zastosowaniu modelu pseudo-spektralnego z uwzględnieniem procesów nieliniowej transformacji fal powierzchniowych, był moim zdaniem ambitny i trudny. Rozwiązanie tego problemu wymagało opracowania modelu matematycznego, który umożliwił przeprowadzenie analizy trójwymiarowych efektów transformacji falowania, jak na przykład przekazu energii pomiędzy falą poprzeczną i progresywną propagującą się w basenie falowym. Pozwala też opisać zjawisko nakładania się nieliniowych fal powierzchniowych propagujących w różnych kierunkach, które to zjawisko nie może być opisane zasadą superpozycji, mającą zastosowanie tylko dla małych amplitud fal. Dzięki temu stanowi on bardzo cenne narzędzie analizy zjawisk nieliniowych w zamkniętych lub półzamkniętych obszarach wodnych takich jak baseny i kanały portowe. Przez uwzględnienie w tym modelu rozwiązania opisującego tłumienie fal na brzegach obszaru pozwala on na analizę wymienionych powyżej zjawisk w obszarze otwartego morza. Na podstawie modelu matematycznego Doktorantka opracowała model numeryczny, oprogramowany w środowisku obliczeniowym MATLAB, w którym dla osiągnięcia pożądanej dokładności dla potencjału prędkości i wzniesienia powierzchni swobodnej zastosowała numeryczną, krokową metodę predyktor – korektor czwartego rzędu Adamsa-Bashforth-Moultona. Stabilność tej metody dla rozwinięcia warunków brzegowych do drugiego rzędu włącznie została określona jako wystarczająca do uzyskania wyników obliczeń o pożądanej dokładności.

#### **5. Wniosek końcowy**

Recenzowana dysertacja doktorska mgr Anety Zdolskiej stanowi samodzielne i oryginalne opracowanie naukowe dotyczące aktualnej oraz bardzo przydatnej tematyki badawczej, a przy tym mające dużą wartość poznawczą i użyteczną. Poziom przedstawionych w niej analiz i prac teoretycznych oraz eksperymentalnych dotyczących teorii trójwymiarowych generatorów i wielokierunkowego pola falowania w basenie falowym uważam za wysoki.

Poniżej przedstawiam wybrane z pracy Doktorantki twórcze osiągnięcia badawcze, które moim zdaniem stanowią istotny wkład w rozwój badań naukowych dotyczących teorii trójwymiarowych generatorów i wielokierunkowego pola falowania w basenie falowym, a mianowicie:

1. Wykorzystywane dotychczas rozwiązania zagadnienia generacji falowania w basenach falowych mają bardzo ograniczony zakres stosowalności, ponieważ bazują na słabo nieliniowych teoriach falowania. Zastosowanie przez Doktorantkę w modelu matematycznym nieliniowego warunku brzegowego opisującego powierzchnię wywołująca segmentowego wykazało, że staje się on w pełni nieliniowym modelem

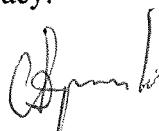
generacji i propagacji fal w basenie falowym. Jest to osiągnięcie naukowe, ponieważ w dotychczasowej literaturze przedmiotu nie ma tak dokładnie i poprawnie sformułowanego rozwiązania nieliniowego opisującego generację fal powierzchniowych przez wywoływacz segmentowy. Dodatkowo należy podkreślić, że uzyskano dobrą zgodność wyników teoretycznych z pomiarami dla trójwymiarowych pól falowych generowanych bocznym wywoływaczem płytowym jak również dla fal wywołujących rezonans w basenie falowym.

2. Przeprowadzenie przez Doktorantkę weryfikacji modelu matematycznego i algorytmu numerycznego na podstawie danych doświadczalnych uzyskanych z badań wykorzystujących generację falowania o charakterze trójwymiarowym przy użyciu innowacyjnego płytowego wywoływacza bocznego stanowi rozwiązanie niespotykane dotychczas w literaturze światowej i krajowej.
3. Wykazanie, na podstawie wyników przedstawionego w pracy modelowania numerycznego, że trójwymiarowy charakter pola falowego zanika wraz z odległością od generatora dla fal dłuższych od podwójnej szerokości basenu. Nieliniowe składowe pola falowego utrzymują się jednak w basenie falowym i można je obserwować nawet w dużych odległościach od generatora. Jest to bardzo istotny i interesujący wniosek dotyczący trójwymiarowego pola falowego generowanego w basenie falowym.
4. Udowodnienie, na podstawie uzyskanej zgodności amplitudy nieliniowej fali wolnej z nieliniową teorią mechanicznej generacji fal, poprawności modelu matematycznego opisującego powstawanie nieliniowej fali wolnej, generowanej przez wywoływacz tłokowy.
5. Wykazanie, że opracowany model matematyczny opisuje również powstawanie fali rezonansowej. Dało to możliwość uzyskania szeregu interesujących wyników symulacji generacji i propagacji fal rezonansowych w basenie falowym dla różnych funkcji kształtu generatora segmentowego. Jest to istotny i interesujący wkład do literatury dotyczącej zjawisk rezonansowych występujących w basenach falowych.

6. Przeprowadzone/obliczone analizy bilansu masy i energii w obszarze trójwymiarowym są zaawansowaną metodą sprawdzania poprawności modelu, biorąc pod uwagę, że przedstawiane dotychczas w literaturze światowej bilanse masy i energii dla takich obszarów jak „baseny numeryczne” były obliczane w reżimie rozwiązań dwuwymiarowych.

Podsumowując stwierdzam, że opracowana przez mgr Anetę Zdolską rozprawa doktorska pt. **GENERACJA I TRANSFORMACJA NIELINIOWYCH FAL GRAWITACYJNYCH W BASENIE FALOWYM** 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 Doktorantki do publicznej obrony pracy.

  
Czesław Dymarski