

**Monika Warmowska**

Polski Rejestr Statków S.A., Gdańsk

## **SYMULACJE RUCHU CIECZY W ZAGADNIENIACH SLOSHINGU I RUCHU WODY NA POKŁADZIE**

### **STRESZCZENIE**

Okręt poruszający się na fali poddawany jest działaniu sił i momentów, które decydują o jego ruchu i o rozkładzie naprężeń w jego konstrukcji. Zjawiska dynamicznego ruchu cieczy takie jak ruch wody na pokładzie okrętu i ruch cieczy w częściowo wypełnionych ładowniach lub zbiornikach, mają wpływ na zachowanie okrętu. W przypadku małych jednostek, woda na pokładzie może doprowadzić do ich zatonięcia, zaś źle zaprojektowane konstrukcje zbiorników nie wytrzymają dynamicznych obciążeń wywołanych ruchem cieczy w ich wnętrzu.

W Polskim Rejestrze Statków opracowano programy komputerowe symulujące ruch wody po pokładzie okrętu i ruch wody w częściowo wypełnionych zbiornikach. W czasie symulacji obliczane są wartości ciśnień, sił i momentów wywołanych poruszającą się we wnętrzu cieczą. Wyznaczane są wartości maksymalnych obciążeń. W Polskim Rejestrze Statków w ramach prac badawczych opracowano i porównano dwie metody numeryczne: dwuwymiarową metodę elementów brzegowych i trójwymiarową metodę wody płytkiej. W artykule przedstawiono charakterystykę tych metod oraz ich zastosowanie przy opisie zjawisk ruchu cieczy w obszarze ograniczonym. Przedstawiono praktyczne zastosowanie tych metod w symulacji ruchu okrętu na fali z uwzględnieniem wody na pokładzie jednostki oraz efektu sloshingu.

Słowa kluczowe: sloshing, woda na pokładzie, symulacja ruchu okrętu na fali

### **WSTĘP**

Zapewnienie bezpieczeństwa eksploatacji okrętów na fali wymaga uwzględnienia wielu czynników w procesie weryfikacji jego stateczności. Okręt musi zachować pływalność i stateczność nie tylko w warunkach statycznych, ale również w czasie jego pracy na morzu. Stąd tworzone są programy symulujące ruch okrętu, umożliwiające obserwację zachowania okrętu na fali. W równaniach ruchu opisujących zagadnienie uwzględniane są między innymi siły spowodowane rozłożeniem masy we wnętrzu okrętu, siły wynikające z falowania morskiego, siły spowodowane ruchem okrętu, siły tłumiące, siły oddziaływania wiatru na powierzchnię kadłuba i inne. Również w Polskim Rejestrze Statków powstał program symulujący ruch

okrętu na zadanej fali nieregularnej, [1]. Programy symulujące ruch okrętu na fali rozwijane są o dodatkowe procedury modelujące dynamiczny ruch cieczy:

- w częściowo wypełnionych zbiornikach lub ładowniach okrętu;
- dynamiczne przemieszczanie wody morskiej po pokładzie jednostki.

W obu zagadnieniach ruch cieczy jest zjawiskiem niestacjonarnym. W czasie zmienia się kształt swobodnej powierzchni, powierzchnia zwilżona pokładu lub zbiornika, oraz rozkład ciśnień wywołanych przemieszczającą się masą cieczy.

Stosowane są różne techniki modelowania ruchu cieczy w obszarze ograniczonym z odkształcalną swobodną powierzchnią. Do opisu zjawiska stosowane są między innymi takie metody jak:

- metoda elementu skończonego FEM (Kim [2]);
- metoda elementów objętościowych VOF (Standing [3]);
- metodę cząstek znaczonych SPH (Maeda [4]);
- metoda różnic skończonych FDM (Yamaguchi [5]);
- metoda elementów brzegowych BEM (Faltinsen [6]).

Ruch wody na pokładzie modelowany jest przy pomocy metody wody płytkiej. Model dwuwymiarowy został przedstawiony przez Dillinghama w artykułach [7] i [8]. Praca Pantazopoulou [9] zawiera równania ruchu wody płytkiej na pokładzie okrętu dla zagadnienia trójwymiarowego ruchu okrętu bez myszkowania. Metoda została rozszerzona przez Huang i Hsiung [10].

W Polskim Rejestrze Statków opracowano własne procedury symulujące ruch wody oparte na dwóch metodach:

- dwuwymiarową metodę elementów brzegowych, stosowaną do opisu zagadnienia sloshingu;
- trójwymiarową metodę wody płytkiej, uwzględniającą 6 stopni swobody ruchu okrętu, zastosowaną w opisie zjawiska ruchu wody na pokładzie okrętu.

Procedury te zostały włączone do programu symulującego ruch okrętu na fali, co prowadzi do wzajemnego oddziaływania ruchu okrętu na ruch cieczy w zbiornikach i na pokładzie jednostki.

## **ZJAWISKO SLOSHINGU**

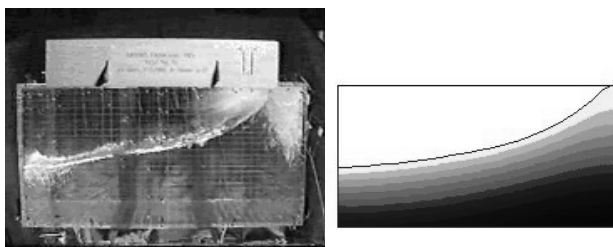
Zjawisko sloshingu to dynamiczne przemieszczanie się cieczy we wnętrzu częściowo wypełnionych zbiorników lub ładowni. Ruch okrętu na fali wymusza ruch cieczy w zbiorniku. Zjawisko występuje w zbiornikach paliwowych oraz zbiornikach balastowych. Jednak największe zagrożenie, powstawanie dużych wartości ciśnień wynikające z ilości rozpędzonej masy cieczy, stanowią częściowo wy-

pełnione ładownie przewożące ładunki płynne, lub częściowo zalane, uszkodzone pomieszczenia okrętu.

W zjawisku sloshingu najważniejszą rolę odgrywają siły bezwładnościowe cieczy. Stąd zjawisko to modelowane jest przy pominięciu sił lepkości. Metoda elementów brzegowych opiera się na założeniu istnienia potencjału prędkości cieczy. W metodzie tej poszukiwane jest rozwiązanie na brzegu obszaru, które definiuje rozwiązanie w całym wnętrzu. Szczegóły opisu metody zastosowanej w symulacji zjawiska sloshingu można odnaleźć w pracy [11].

W ramach weryfikacji zastosowanej metody i opracowanych procedur wyniki symulacji zostały porównane z wynikami przeprowadzonych eksperymentów. Ponieważ metoda opisuje zjawisko dwuwymiarowe, w Centrum Techniki Okrętowej w Gdańsku przeprowadzono eksperymenty, w których trójwymiarowy zbiornik prostopadłościenny wykonywał ruch płaski. Eksperyment potwierdził, że ruch cieczy nie zależy od sił lepkości i jest identyczny w płaszczyznach przekroju równoległych do płaszczyzny ruchu płaskiego. W wyniku weryfikacji porównano:

- kształty swobodnej powierzchni, Rys. 1;
- obwiednie maksymalnych ciśnień;
- przebiegi zmiany ciśnienia na wybranym elemencie konstrukcji.



Rys. 1. Porównanie kształtu swobodnej powierzchni w czasie eksperymentu i symulacji, wypełnienie 60%

Weryfikacja potwierdziła zgodność otrzymanych wyników symulacji i eksperymentu. Metoda szczególnie dobrze oddaje symulacje dla dużych wypełnień zbiornika (powyżej 50%). Najniebezpieczniejsze wypełnienia zbiornika mieszczą się w zakresie wypełnienia od 50% do 80%. Masa wody jest wówczas dostatecznie duża, aby powstały duże siły bezwładności, a wolna przestrzeń w zbiorniku umożliwia znaczne odkształcenie swobodnej powierzchni i rozpędzenie cząstek cieczy. Dochodzi wówczas do powstawania tak zwanej fali stojącej, powodującej uderzenia swobodnej powierzchni o sufit zbiornika, Rys.1.

Zachowanie się cieczy we wnętrzu zbiornika zależy od parametrów ruchu zbiornika. Istotny wpływ na charakter ruchu ma wartość częstotliwości ruchu zbiornika. Dla ruchów harmonicznym można ustalić wielkość tak zwanej częstotliwości własnej

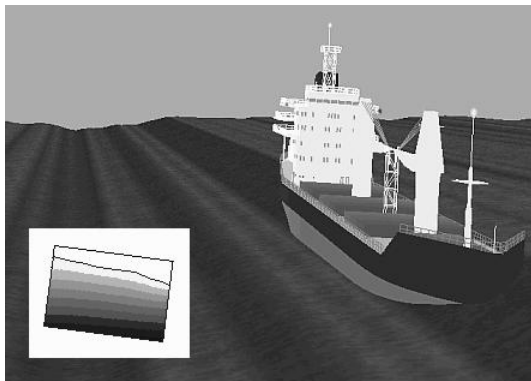
ruchu cieczy w zbiorniku, która zależy od stopnia wypełnienia cieczą i długości zbiornika. Dla częstości ruchu równej częstości własnej należy spodziewać się największej dynamiki cieczy. Położenie zbiornika względem środka ciężkości okrętu również wpływa na wielkości ciśnień działających na elementy konstrukcji. Najbardziej gwałtownych ruchów należy spodziewać się w zbiornikach szczytowych. Wnioski dotyczące wpływu parametrów ruchu i kształtu zbiornika na zjawisko sloshingu zostały umieszczone w pracy [11]

Procedury rozwiązujące zagadnienie sloshingu zostały włączone do programu symulującego ruch okrętu na fali. W czasie wykonywania obliczeń następuje sprzężenie: ruch okrętu wpływa na ruch cieczy w częściowo wypełnionej ładowni, zaś rozkład ciśnień na ściankach ładowni decyduje o wielkości sił i momentów uwzględnianych w równinach ruchu okrętu.



Rys. 2. Położenie ładowni uszkodzonej w czasie symulacji ruchu okrętu na fali czołowej

Wykonano obliczenia testowe zachowania się cieczy w uszkodzonych ładowniach okrętu, poruszającego się na fali czołowej (regularnej lub nieregularnej). W celu oszacowania maksymalnych ciśnień na grodziach ładowni, jakie mogą wystąpić w czasie eksploatacji, wykonano symulacje uszkodzenia i zalewania ładowni umieszczonych na śródokręciu i na dziobie okrętu, Rys. 2. Wyniki obliczeń zostały przedstawione w artykule [12].



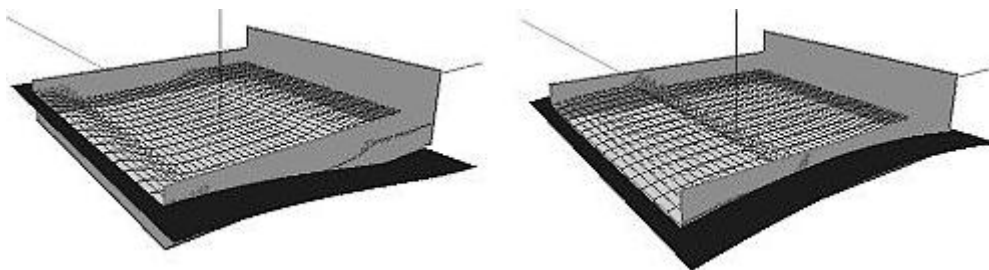
Rys. 3. Kadr z symulacji ruchu okrętu na nieregularnej fali bocznej z uwzględnieniem zjawiska ruchu cieczy we wnętrzu ładowni okrętu

Wyniki obliczeń testowych dla okrętu poruszającego się na fali bocznej regularnej lub nieregularnej, Rys. 3, przedstawiono w artykule [13]. Wskazały one na

konieczność wykonywania tego typu testów zarówno dla stanów morza odpowiadających częstościom własnym kołysań okrętu, kiedy amplitudy ruchu okrętu są największe, ale również dla stanów morza, dla których częstość falowania odpowiada częstości własnej zbiornika. W tym drugim przypadku nawet niewielkie amplitudy składowych ruchu okrętu powodowały dynamiczne przemieszczanie się cieczy we wnętrzu ładowni.

### ZJAWISKO RUCHU WODY NA POKŁADZIE OKRĘTU

Zjawisko wdzierania się wody morskiej na pokład okrętu jest szczególnie niebezpieczne w przypadku jednostek małych. Na całym świecie prowadzone są badania nad ustaleniem przyczyn zatonięcia małych jednostek w trudnych warunkach pogodowych. W Polskim Rejestrze Statków wykonano szereg symulacji komputerowych ruchu kutra rybackiego na fali nieregularnej. Wyniki tych badań zostały przedstawione w referacie [15]. W symulacji uwzględniono uproszczoną metodę obliczania sił pochodzących od wody na pokładzie. Metoda ta uwzględniała siły hydrostatyczne spowodowane obecnością wody, siły wywołane przyspieszeniem okrętu, a także siły spowodowane zmianą wysokości słupa wody. Obecnie w PRS opracowano procedury symulujące dynamiczny ruch wody na pokładzie. Procedury oparto na trójwymiarowej metodzie wody płytkiej.

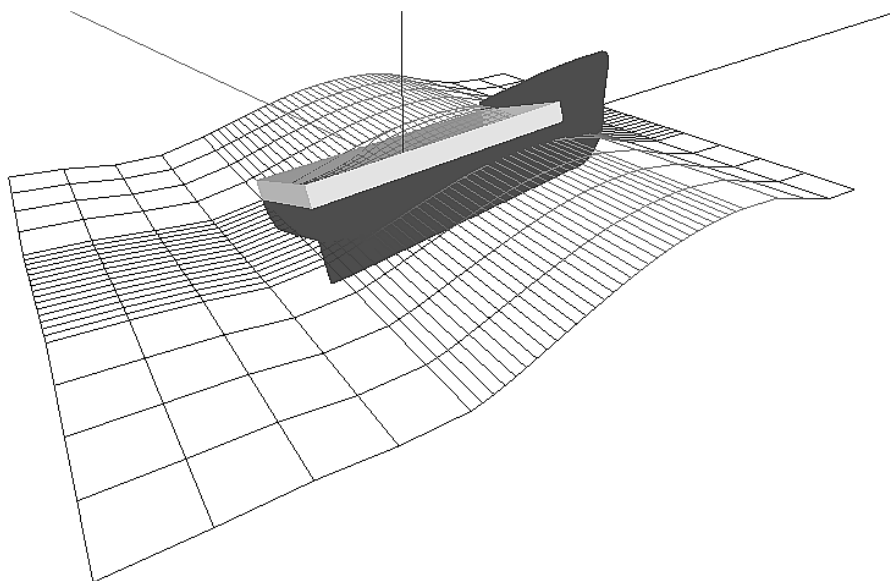


Rys. 4. Woda wdzierająca się na nieruchomą platformę

W metodzie wody płytkiej zakłada się, że ruch wody odbywa się wzdłuż dna pokładu. Założenie prowadzi do wielu uproszczeń w równaniach ruchu i daje szybką metodę wyznaczania kształtu swobodnej powierzchni. W symulacji ruchu wody na pokładzie dodatkowo dołączone zostały procedury odpowiedzialne za wyznaczanie ilości wody przedostającej się przez furty odwadniające oraz nad burtą okrętu. W momencie zanurzenia pokładu w wodzie uwzględnione zostało pole prędkości cząstek fali morskiej, Rys. 4.

W Polskim Rejestrze Statków wykonano szereg obliczeń numerycznych weryfikujących poprawność zastosowanych procedur. Wyniki symulacji zostały porównane z wynikami eksperymentu przedstawionymi w artykule [10]. Rezultaty

potwierdziły poprawność metod i jej skuteczność w zastosowaniach opisu ruchu wody płytkiej przemieszczającej się horyzontalnie wzdłuż dna, [14].



Rys. 5. Kadr z symulacja ruchu wody na pokładzie małej jednostki

Procedury symulujące zostały włączone do programu wyznaczającego ruch okrętu na fali nieregularnej, Rys. 5. Aktualnie przeprowadzane są parametryczne symulacje kutra rybackiego na fali nieregularnej. Analizowane są sytuacje, w których dochodzi do zatonięcia jednostki. Wyniki zostaną porównane z wynikami otrzymanymi przy zastosowaniu metody uproszczonej, zaprezentowanymi w artykule [15].

## WNIOSKI

W Polskim Rejestrze Statków opracowane zostały procedury numeryczne umożliwiające wykonanie symulacji dwóch zjawisk związanych z przemieszczaniem cieczy w obszarach ograniczonych: zjawisko sloshingu i ruchu wody na pokładzie.

W zjawisku ruchu cieczy w zbiornikach lub ładowniach okrętowych zastosowana metoda elementów brzegowych doskonale opisuje zjawisko ruchu cieczy w zagadnieniach ruchu płaskiego zbiornika prostopadłościennego. W wyniku symulacji otrzymywane są wartości rozkładu ciśnień na elementach konstrukcji, które określają wielkości maksymalnych sił i momentów. Symulacje umożliwiają wskazanie takich parametrów ruchu zbiornika, dla których dynamiczne przemieszczanie cieczy może spowodować występowanie największych obciążeń. Symulacje ruchu

wody w zbiorniku zostały zastosowane przy modelowaniu zachowania się uszkodzonego okrętu na fali oraz ruchu okrętu z ładowniami częściowo wypełnionymi ładunkiem płynnym.

Opracowana metoda wody płytkiej zastosowana została przy opisie ruchu wody wdzierającej się na pokład okrętu. Procedury symulujące ruch wody na pokładzie z uwzględnieniem masy wody wpływającej i wypływającej przez furty odwadniające oraz ponad burtą okrętu zostały włączone do programu symulującego ruch okrętu na fali nieregularnej. Program daje możliwość przeprowadzenia serii obliczeń, mających na celu zbadanie zachowania się jednostek małych w trudnych warunkach pogodowych.

Przedstawione rozwiązania problemów mogą być zastosowane w analizie przedprojektowej nowych okrętów Marynarki Wojennej RP.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Jankowski J., *Statek wobec działania fali*, Raport Techniczny Nr 52, Polski Rejestr Statków, Gdańsk 2007.
- [2] Kim J.W., Kyuoung J.H., Bai K.J.: *A FEM for a nonlinear sloshing problem*, Proceedings of OMAE04, 2004, Vancouver, Canada.
- [3] Standing B., Amaratunga S., Lopez-Calleja F., Eichaker R., Orme S.: *Marine hydrodynamics modeling using CFD*, CFD 2003: Computational Fluid Dynamics Technology in Ship Hydrodynamics, London, UK.
- [4] Maeda H., Asanuma T., Nisimoto K., Tsukamoto M. M., Masuda K., Tomoki I.: *Numerical analysis for hydrodynamic motions of floating structure using MPS method*, Proceedings of OMAE04, Vancouver, Canada.
- [5] Yamaguchi S., Shinakai A.: *An advance adaptive control system for activated anti-rolling tank*, International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1995, Vol. 5.
- [6] Faltinsen Odd M., Rognebakke Olav F., Lukowski Ivan A., Timokha Alexander N.: *Multidimensional modal analysis of nonlinear sloshing in a rectangular tank with finite water depth*, J. Fluid Mechanics, 2000, Vol. 407, pp. 201–234.
- [7] Dillingham J., *Motion studies of a vessel with water on deck*, Marine Technology 1981, Vol. 18, No. 1.
- [8] Dillingham J.T., Falzarano J.M., *Three-dimensional numerical simulation of green water on deck*, 3rd International Conference on the Stability of Ship and Ocean Vehicles, 1986.

- [9] Pantazopoulos M.S., *Three-dimensional sloshing of water on deck*, Marine Technology, 1988, Vol. 25, No. 4.
- [10] Huang Z.-J., Hsiung C. – C., *Nonlinear shallow-water flow on deck coupled with ship motion*, Proceedings of the Twenty – First Symposium of Naval Hydrodynamics, 1997.
- [11] Warmowska M., *Określenie parametrów ruchu cieczy w zbiorniku okrętowym z uwzględnieniem zjawisk nieliniowych*, praca doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, Gdańsk 2006.
- [12] Warmowska M., *Simulation of water movement on partly filled ship tanks*, Hydronav'05, Politechnika Gdańska, pp. 581-590.
- [13] Warmowska M., Jankowski J., *Ship Motion Affected by Moving Liquid Cargo in Holds*, XVII Krajowa Konferencja Mechaniki Płynów, Systems - Journal of Transdisciplinary Systems Science, 2006, Vol. 11/1, pp.117-124.
- [14] Warmowska M., *Problem of water flow on deck*, Hydronav'07, Politechnika Wrocławska, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. VII, No. 4, pp. 5-15.
- [15] Jankowski J., Laskowski A. *Capsizing of small vessel due to waves and water trapped on deck*, Proceedings of the 9th International Conference STAB2006 – Stability of Ships and Ocean Vehicles, 2006

## ABSTRACT

A ship moving on waves is subject to the impact of loads and moments that are decisive for the ship's movement and distribution of hull stresses. The phenomena of dynamic liquid flow, such as water flow on deck and liquid motion in partially filled holds or tanks, influence ship behaviour. In case of small vessels water on deck may lead to their sinking and inadequately designed tank structures do not withstand dynamic loads generated by motion of liquids inside the tanks.

Polish Register of Shipping developed computer programs simulating water flow on deck and water motion in partially filled tanks. The value of pressure, loads and moments generated by liquid flow are computed during the simulations. Maximum loads are determined. Polish Register of Shipping developed and compared two numerical methods under a conducted research project: D2 boundary element method and D3 method of shallow water flow. The article presents characteristics of both methods and their application in describing water motion in restricted space. Practical application of these methods is shown for simulating ship motion on waves, including water on deck and sloshing.

Recenzent