

**ZESZYTY NAUKOWE NR 2 (74)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Teresa Abramowicz-Gerigk

**Identyfikacja rzeczywistego pola przepływu powstającego
podczas cumowania pomiędzy statkiem i nabrzeżem**

Słowa kluczowe: manewry portowe, cumowanie statku, opływ kadłuba statku,
badania w skali rzeczywistej

Podano stan wiedzy w zakresie opisu nieustalonego przepływu trójwymiarowego indukowanego podczas równoległego cumowania statku do nabrzeża. Przedstawiono wyniki pomiarów rzeczywistego pola prędkości, otrzymane podczas manewrów statku „Horyzont II” przeprowadzonych w porcie Gdynia. Na obecnym etapie badań posłużyły one do jakościowej oceny zjawisk decydujących o wielkości występujących sił hydrodynamicznych.

**Identification of a Real Flow Field Induced During Berthing
Between a Ship and a Quay**

Key words: harbour manoeuvres, ship berthing, flow around the ship hull,
full scale measurements

The paper presents the state of art on three dimensional transient flows induced by a ship approaching a berthing structure. The results of full scale measurements of the velocity field obtained during the trials conducted in Gdynia Port with the motor ship “Horyzont II” are given. At the present stage of research the results of measurements have been used for the qualitative assessment of phenomena and making preliminary conclusions regarding the hydrodynamic forces.

Wstęp

Cumowanie statku należy do najbardziej skomplikowanych i niebezpiecznych manewrów wykonywanych przez nawigatora. Niewłaściwie przeprowadzona operacja cumowania wiąże się zwykle ze stratami ekonomicznymi i może stanowić zagrożenie dla ludzi i środowiska naturalnego.

W ciągu ostatnich dziesięciu lat (1994 – 2004) w porcie Gdynia odnotowano 8 wypadków, w których podczas cumowania statków zostało uszkodzone nabrzeże. Koszty tych awarii w każdym przypadku były związane z naprawą konstrukcji nabrzeża i urządzeń odbojowych oraz wyłączeniem danego rejonu z eksploatacji na czas naprawy.

Duże statki towarowe przy cumowaniu korzystają z pomocy holowników, które ustawiają statek równolegle do nabrzeża a następnie powoli, równomiernie go dopychają. Duże statki pasażerskie, posiadające najczęściej napęd dwusrubowy klasyczny lub POD-owy i stery strumieniowe, zapewniające im bardzo dobre właściwości manewrowe, manewrują w porcie bez asysty holowników. Podczas cumowania podchodzą równolegle do nabrzeża, wykorzystując siły naporu pędników i sterów strumieniowych.

Ruch poprzeczny statku powoduje powstawanie nieustalonego przepływu trójwymiarowego wokół kadłuba. Przy podchodzeniu do nabrzeża pojawia się złożone oddziaływanie hydrodynamiczne pomiędzy statkiem i nabrzeżem a dla statków cumujących samodzielnie występuje dodatkowo wpływ strumieni zasrubowych urządzeń wytwarzających napór. Oprócz energii kinetycznej uderzenia, która decyduje o bezpieczeństwie wykonania manewru, należy więc brać pod uwagę również siły hydrodynamiczne [1, 2].

W związku z przewidywanym w porcie Gdynia wzrostem ruchu statków pasażerskich, który już w chwili obecnej jest dość duży – w 2003 roku zawinęło do Gdyni 86 statków pasażerskich (największy – „Constellation” – miał 294 m długości) – konieczne jest precyzyjne kierowanie ruchem statków, dokładne przewidywanie wymaganej przestrzeni manewrowej i określenie wpływu wykonywanych manewrów na konstrukcję nabrzeży i urządzeń odbojowych.

Znajomość zachowania się statku w rzeczywistych warunkach stanowi podstawę bezpiecznego przeprowadzenia operacji cumowania i umożliwia ocenę właściwej eksploatacji nabrzeży, zarówno z punktu widzenia bezpieczeństwa jak i efektywności. Pozwala ona na właściwe modelowanie ruchu statku w celu szkolenia kapitanów statków, kapitanów holowników i pilotów oraz wykonywania prac z zakresu inżynierii morskiej na symulatorach manewrowych.

W artykule opisano zjawiska hydrodynamiczne występujące podczas równoległego cumowania statku do nabrzeża, na podstawie dostępnych publikacji [1, 2, 4, 5] oraz omówiono wyniki badań rzeczywistego pola przepływu podczas

cumowania statku, uzyskane w badaniach w skali rzeczywistej przeprowadzonych w porcie Gdynia na statku szkolnym Akademii Morskiej w Gdyni „Horyzont II”.

1. Opis opływu statku podczas cumowania

W przypadku cumowania równoległego decydujące znaczenie ma energia kinetyczna statku w ruchu poprzecznym. Z tego względu prędkości dosuwania do nabrzeża dużych statków nie przekraczają 0,1 węzła, zaś prędkość statku w momencie zetknięcia z nabrzeżem powinna być bliska zera.

Podczas ruchu poprzecznego statku występuje nieustalony przepływ trójwymiarowy, którego charakter zależy od kształtu kadłuba i części wystających, szczególnie stępek przeciwprzechyłowych i skegów. W przypadku statków wykorzystujących podczas cumowania własny napęd, oddziaływanie hydrodynamiczne zależy także od prędkości strumieni zaśrubowych.

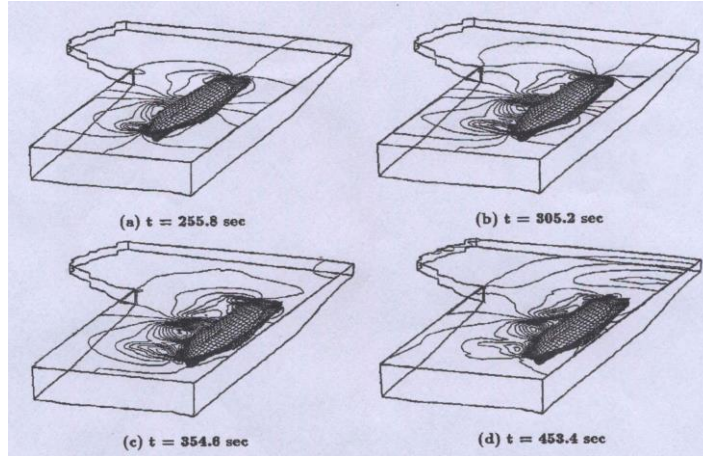
1.1. Cumowanie równoległe

Analizę nieustalonego przepływu wody wokół statku w ruchu poprzecznym z uwzględnieniem wpływu kształtu kadłuba, oddziaływania nabrzeża oraz ukształtowania dna akwenu umożliwia hybrydowa metoda symulacji cumowania oparta na uśrednionych równaniach Naviera-Stokesa (RANS), znana pod nazwą *Chimera RANS method for Transient Flows* [1], opracowana do projektowania konstrukcji nabrzeży i urządzeń odbojowych.

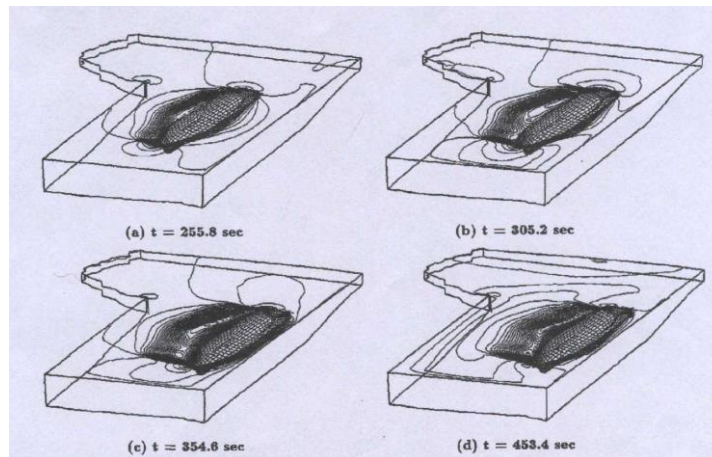
Symulacja cumowania statku z wykorzystaniem tej metody pozwoliła uwzględnić charakterystyczne cechy przepływu, występujące w skali rzeczywistej, w tym przyspieszenie przepływu wody pod stępką statku, oderwanie burtowego strumienia nadążającego i powstawanie poduszki wodnej pomiędzy burtą statku i ścianą nabrzeża.

Na przykładzie obliczeń wykonanych dla statku, który był przedmiotem wcześniejszych prób w skali rzeczywistej, cytowanych w pracy [1], można opisać charakterystyczne cechy przepływu. Badania dotyczyły pomiarów pola prędkości statku o długości 57,3 m i zanurzeniu 3,58 m. Prędkość dosuwania statku do nabrzeża wynosiła od 9 cm/s do 15 cm/s i nie przekraczała $F_n = 0,005$. Statek posiadał stępki przeciwprzechyłowe i skeg rufowy. Ogólna charakterystyka nieustalonego pola przepływu została pokazana na rysunkach 1 i 2. Przepływ można scharakteryzować następująco:

1. Podczas ruchu poprzecznego prędkość wody na powierzchni kadłuba równa jest prędkości statku, lokalnie woda za statkiem ma prędkość większą niż statek, co wskazuje na występowanie cyrkulacji w danym rejonie.



Rys. 1. Pole prędkości wzdłużnych (w kierunku równoległym do PS statku) [1]
Fig. 1. Longitudinal velocity contours [1]



Rys. 2. Pole prędkości poprzecznych (w kierunku prostopadłym do PS statku) [1]
Fig. 2. Transverse velocity contours [1]

2. Podczas przyspieszania i ruchu ze stałą prędkością stępka przeciwprzechyłowa na burcie bardziej oddalonej od nabrzeża powoduje powstawanie dużego obszaru cyrkulacji za statkiem, ponieważ w rejonie stępek przeciwprzechyłowych występuje lokalnie prawie całkowite oderwanie przepływu. Przepływ związany na kadłubie za obszarem oderwania ma kierunek zgodny z kierunkiem ruchu statku.

3. Po zatrzymaniu się statku i zetknięciu z odbojnicami woda za statkiem nadal porusza się w kierunku nabrzeża i wymusza przepływ skierowany pod stępkę statku. Strumień wody wpływa pod stępkę statku oraz do przestrzeni pomiędzy odbojnicami i nabrzeżem. Ruch wody w kierunku nabrzeża wywołuje silnie zawirowany przepływ na burcie statku.

4. Od momentu, w którym po zatrzymaniu statku, przepływ wody w rejonie pod stępką zmienił swój kierunek, oderwanie przepływu i obszary ponownego przylegania przepływu powstają na przeciwnej stronie stępek przeciwprzecyłowych niż przed zetknięciem z odbojnicami.

5. Obraz opływu w rejonie rufy znacznie różni się od obrazu obserwowanego na śródokręciu. Podczas przyspieszania oraz ruchu statku ze stałą prędkością skeg rufowy powoduje powstanie obszaru cyrkulacji za torem statku. Po zetknięciu z odbojnicami woda, która porusza się w kierunku nabrzeża wymusza przepływ skierowany pod stępkę. Woda wpychana pod skeg wywołuje wir skierowany w stronę statku.

6. Obszar wysokiego ciśnienia, podczas ruchu statku jest umiejscowiony przed statkiem wokół czołowego punktu spiętrzenia. Duże podciśnienie, które występuje w obszarach cyrkulacji za statkiem, wynika z występującego w tym rejonie oderwania przepływu. W chwili gdy statek styka się z odbojnicami i zostaje zatrzymany, woda nadal popycha statek w kierunku nabrzeża. Obszar wysokiego ciśnienia przemieszcza się na burtę zewnętrzną. To przemieszczenie rozkładu ciśnień jest przyczyną powstawania dużej siły na kadłubie działającej w kierunku nabrzeża.

1.2. Cumowanie równoległe z wykorzystaniem własnego napędu statku

Dla statków pasażerskich i promów, zdolność do przemieszczania poprzecznego jest sprawdzana już na etapie projektu wstępnego. Uwzględnia się przy tym możliwości pędników i sterów strumieniowych oraz charakterystyki części nadwodnej statku. Zdolność ta jest jednym z kryteriów projektowych, ponieważ wpływa na skrócenie czasu operacji portowych i pozwala uniknąć opłat za usługi holownicze.

Do oceny możliwości przemieszczania poprzecznego statku konieczne jest określenie:

- sił i momentów generowanych przez urządzenia sterowo-napędowe,
- oporu części nadwodnej dla dowolnego kierunku wiatru.

Na podstawie badań opisanych w pracach [4] i [5] przepływ generowany przez statek cumujący samodzielnie, posiadający standardowy napęd dwuśrubowy – konwencjonalny lub POD-owy i dziobowy ster strumieniowy, można scharakteryzować następująco:

1. Najsilniejsze oddziaływanie występuje przy odchodzeniu statku od nabrzeża. Najlepszym rozwiązaniem jest w tym wypadku praca wstecz śrubą od strony nabrzeża i równoważenie siły wzdłużnej poprzez zadanie obrotów naprzód dla śruby zewnętrznej. Jeśli jest wykorzystywany dziobowy ster strumieniowy, strumień zaśrubowy śruby pracującej wstecz jest zatrzymywany pomiędzy nabrzeżem i burtą statku i generuje pole ciśnień ułatwiające odchodzenie statku od nabrzeża.

2. Siły i momenty generowane na kadłubie statku dwuśrubowego zależą od kąta wychylenia steru za śrubą równoważącą napór śruby pracującej wstecz.

3. Dla statków z napędem POD-owym zwykle zmienia się kąt ustawienia pędnika wewnętrznego (od strony nabrzeża), podczas gdy pędnik zewnętrzny pracuje przy nie zmienionych obrotach, tak aby mógł przeciwdziałać powstającej sile wzdłużnej. Optymalne wyniki dla manewru odchodzenia statku od nabrzeża uzyskano, gdy gondola od strony nabrzeża była skierowana pod kątem $75 - 90^\circ$, zaś gondola zewnętrzna pomiędzy $90 - 120^\circ$.

4. Z porównania badań przemieszczania poprzecznego statków wyposażonych w napęd konwencjonalny i POD-owy wynika, że napęd POD-owy zapewnia znacznie lepsze właściwości statku podczas cumowania. Jest to spowodowane głównie silnym oddziaływaniem pomiędzy statkiem i nabrzeżem. Pędnik konwencjonalny podczas pracy wstecz wytwarza silny strumień pomiędzy nabrzeżem i kadłubem statku, w wyniku czego pojawia się siła ssąca. Dla statków z napędem gondolowym oddziaływanie takie nie zachodzi. Upraszcza to znacznie manewr podchodzenia statku do nabrzeża.

5. Dla statków z napędem konwencjonalnym najlepsze wyniki przy przemieszczaniu poprzecznym uzyskuje się wówczas, gdy wykorzystywana jest prawie cała moc napędu. Przy napędzie POD-owym do wykonania tego manewru jest wymagana tylko część zainstalowanej mocy. Na przykład, aby uzyskać taką samą siłę wywołującą przesunięcie poprzeczne, statek z napędem konwencjonalnym wykorzystuje 75% swojej mocy maksymalnej, statek z napędem POD-owym tylko 30%. Oznacza to, że występuje wówczas znacznie mniejsze oddziaływanie strumieni zaśrubowych na nabrzeże i dno akwenu.

2. Badania prędkości przepływu wody podczas cumowania statku w warunkach rzeczywistych

Badania prędkości przepływu podczas cumowania statku w warunkach rzeczywistych przeprowadzono w porcie Gdynia. Do badań wykorzystano statek szkolny Akademii Morskiej „Horyzont II”. Długość statku wynosiła 56 m, zanurzenie 5,1 m. Głębokość wody w rejonie nabrzeża Indyjskiego, gdzie wykonywano pomiary wynosiła 8,8 m. Stanowisko pomiarowe pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Stanowisko pomiarowe dla statku „Horyzont II”
Fig. 3. Experimental setup for vessel “Horyzont II”

Prędkości przepływu mierzono za pomocą prądografu Doppler Current Sensor 3900A – Andrea Instruments:

- błąd bezwzględny pomiaru prędkości: 0,15 cm/s,
- błąd względny nie przekracza 1% odczytu,
- odchylenie standardowe: 0,55 cm/s,
- błąd kierunku na skutek przechylenia:
 - przechył do 5° – błąd kierunku w zakresie $0 - 15^\circ$,
 - przechył do $7,5^\circ$ – błąd kierunku w zakresie $15 - 35^\circ$,
- czułość kątowna pomiaru kierunku: $0,35^\circ$.

Pomiary przeprowadzono w rejonie dziobu statku, na głębokości 3 m, w odległości 2 m od ściany nabrzeża. Otrzymane wyniki potwierdziły występowanie intensywnej cyrkulacji w płaszczyźnie poziomej i pionowej. Potwierdziły to również jakościowe badania opływu modelu kadłuba statku, jakie zostały wykonane w ramach współpracy pomiędzy Akademią Morską w Gdyni i Politechniką Gdańską. Na rysunku 4 przedstawiono obraz opływu części dziobowej modelu.

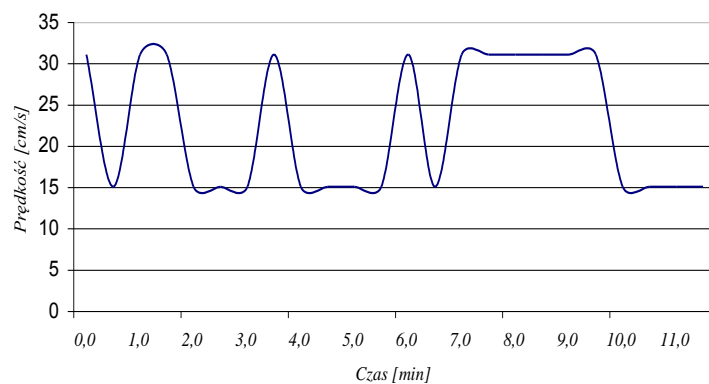
Podczas trzech prób równoległego dosuwania statku do nabrzeża z prędkością od 0,2 do 0,3 węzła wypadkowe prędkości przepływu wody wynosiły od 15 do 31 cm/s. Zmiany prędkości przepływu zmierzone podczas pierwszej próby pokazano na rysunku 5. W czasie prób nie udało się utrzymać stałej prędkości poprzecznej, co wyraźnie widać na wykresie, ani też całkowicie wyeliminować ruchu wzdłużnego statku.



Rys. 4. Obraz opływu modelu statku podczas cumowania
Fig. 4. Flow pattern around the ship model during berthing

Kierunek przepływu zmieniał się w zakresie od 16° do 22° względem nabrzeża.

Uzyskane wyniki badań wymagają dalszej weryfikacji za pomocą badań modelowych, badań w skali rzeczywistej i symulacji komputerowej metodą objętości skończonych.



Rys. 5. Prędkości przepływu wody w rejonie dziobu zmierzone na głębokości 3 m podczas dosuwania statku do nabrzeża

Fig. 5. Flow velocities measured during berthing 3 m below the water surface near the fore part of the ship

Wnioski

Przedstawione zagadnienie jest istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa manewrów portowych. Przeprowadzone wstępne badania w skali rzeczywistej i modelowej potwierdzają występowanie bardzo zróżnicowanego, trójwymiarowego przepływu wokół kadłuba cumującego statku, co istotnie wpływa na nieustalony charakter sił hydrodynamicznych.

Powstające zmienne w czasie wartości sił hydrodynamicznych działających na statek są przyczyną zmiennej prędkości ruchu statku podczas przemieszczania poprzecznego w kierunku nabrzeża. Urządzenia odbojowe muszą być zaprojektowane tak, aby absorbowały nie tylko energię kinetyczną statku, ale również siłę hydrodynamiczną powstającą w momencie zetknięcia się burty statku z odbojnicami.

Obszar zakłóceń generowanych przez statek cumujący znacznie przekracza długość statku. Na rysunku 4 pokazano wielkość obszaru zakłóceń. Znajomość tego obszaru jest istotna ze względu na oddziaływanie sił hydrodynamicznych na inne statki stojące przy nabrzeżu.

Jednym z celów badań jest określenie zależności dla sił hydrodynamicznych, do wykorzystania w modelu matematycznym stosowanym w symulatorach manewrowych. Dokładne modelowanie manewrów w czasie rzeczywistym jest możliwe dzięki wprowadzeniu tak zwanej siły zastępczej opisanej w pracy [3].

Na obecnym etapie badań możliwa jest jedynie jakościowa ocena zjawisk. Ocena ilościowa wymaga opracowania modelu do obliczeń numerycznych oraz metodyki badań modelowych i w skali rzeczywistej. Dane dostępne w literaturze potwierdzają konieczność prowadzenia dalszych prac, ponieważ omawiane zjawiska nie zostały do końca rozpoznane.

Literatura

1. Gucma S., *Inżynieria ruchu morskiego*, Okrętownictwo i Żegluga, Gdańsk 2001.
2. Chen H., Huang E., *Validation of a Chimera RANS Method for Transient Flows Induced by a Full –Scale Berthing Ship*, Twenty Second Symposium on Naval Hydrodynamics, The National Academy of Sciences 2000, <http://www.nap.edu/openbook/0309065372/html>.
3. Simonsen B., *Real Time Simulation of Ship Impact for Crew Training*, Marine Technology, Vol. 40, October 2003, pp. 249 – 257.
4. Qadvlieg F., Toxopeus S., *Prediction of Crabbing in the Early Design Stages*, Practical Design of Ships and Mobile Units M.W.C. Oosterveld and S.G.

Tan editors, <http://www.marin.nl/original/publications/Prads1998-PredictionOfCrabbing>.

5. Toxopeus S., Loeff G., *Manoeuvring Aspects of Fast Ships with Pods*, 3rd International EuroConference on High-Performance Marine Vehicles HIPER'02, Bergen 14-17 September 2002, pp. 392 – 406, <http://www.marin.nl/original/publications/HIPER-pods%20final.pdf>.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzent

prof. dr hab. inż. kpt.ż.w. Stanisław Gucma

Adres Autora

dr inż. Teresa Abramowicz-Gerigk
Akademia Morska w Gdyni
81-345 Gdynia, Al. Zjednoczenia 3
tel. (58) 6901120 / 0607307355
e-mail: tagerigk@wsm.gdynia.pl