

MODELOWANIE CFD MOMENTU PRZECHYLAJĄCEGO STATEK WSKUTEK DZIAŁANIA WIATRU

Artykuł traktuje o modelowaniu momentu przechylającego statek wskutek działania wiatru z wykorzystaniem metod numerycznej mechaniki płynów. Analizę przedstawiono na przykładzie wybranego statku w typowym dla niego stanie załadowania. Wyniki obliczeń zestawiono z klasycznym ujęciem zagadnienia, stosowanym powszechnie w rutynowych obliczeniach statecznościowych prowadzonych na statku.

WSTĘP

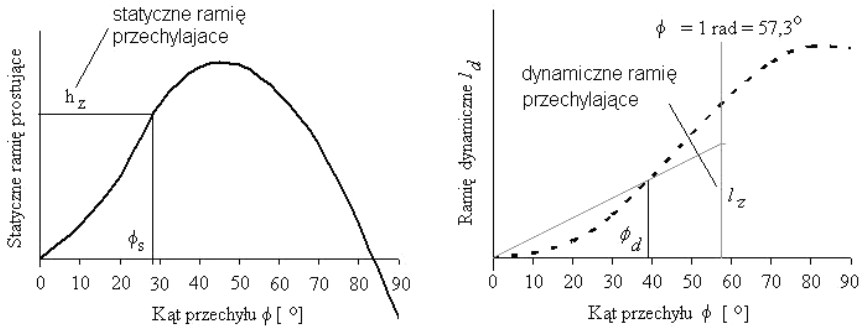
Stateczność statku – środka transportu morskiego jest jedną z cech wpływających na jego eksploatację. Warunkuje ona zarówno pewne aspekty bezpieczeństwa żeglugi, jak i ekonomiki przedsiębiorstw żeglugowych. Parametry statecznościowe wpływają zarówno na zachowanie się statku podczas żeglugi morskiej, jak i na możliwości załadunkowe oraz przebieg operacji portowych.

Stateczność statku jest rozmaicie określana w literaturze przedmiotu, jednakże co do zasady definicje skupiają się na zdolności statku do przeciwstawiania się zewnętrznemu momentowi przechylającemu lub na zdolności statku do powrotu do położenia początkowego (wyprostowanego) po ustaniu działania momentu przechylającego. W kontekście związku stateczności statku z bezpieczeństwem i ekonomicznymi aspektami żeglugi zagadnienie wyznaczania przechyłu statku w rozmaitych warunkach, w tym również momentu przechylającego statek wskutek działania wiatru, stanowi istotny element teorii okrętu.

1. WYZNACZANIE PRZECHYŁU STATKU W UJĘCIU KLASYCZNYM

Zagadnienie wyznaczania statycznego i dynamicznego kąta przechyłu statku wskutek działania zewnętrznego momentu przechylającego jest znane i powszechnie stosowane w praktyce morskiej. Opiera się na wykorzystaniu krzywej stateczności statycznej i odpowiednio krzywej stateczności dynamicznej. Znajdowane są te kąty przechyłu statku, przy których występuje równoważenie się momentu przechylającego i prostującego bądź – równorzędne z tym podejściem – zrównanie

statycznego ramienia przechylającego i prostującego. W przypadku określania dynamicznego kąta przechyłu wyznaczany jest kąt zrównania jednostkowej pracy momentu przechylającego i prostującego. Klasyczne ujęcie zagadnienia wyznaczania kąta przechyłu statku przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Wyznaczanie statycznego (φ_s) i dynamicznego (φ_d) kąta przechyłu statku

Krzywa stateczności statycznej, podobnie jak powstająca w wyniku jej całkowania krzywa stateczności dynamicznej statku, jest charakterystyczna dla danego statku w określonym stanie załadunku. Przebieg obu krzywych determinowany jest przez geometrię kadłuba statku oraz rozkład mas wyrażony – w przypadku rozpatrywania stateczności poprzecznej – wzniesieniem środka masy statku ponad płaszczyznę podstawową.

Mimo znajomości przebiegu krzywej stateczności statycznej statku wyznaczenie wartości kąta przechyłu statku wskutek działania zewnętrznego momentu przechylającego może sprawiać trudności. Moment bądź ramię przechylające może bowiem nie być łatwe do wyznaczenia. O ile moment przechylający od załadunku, wyładunku bądź przemieszczenia masy na statku jest łatwy do wyliczenia, o tyle moment przechylający od działania wiatru stwarza istotne problemy.

W typowych zadaniach z zakresu stateczności, rozpatrywanych na statku w toku rutynowej kontroli i oceny stateczności, moment przechylający od działania wiatru przyjmowany jest jako stały, niezależny od kąta przechyłu statku. Może to budzić wątpliwości, w szczególności dotyczące wpływu zmiany współczynnika oporu powietrza wraz ze wzrostem kąta przechyłu na wartość momentu oraz ekspozycji na działanie wiatru zmiennej powierzchni nawiewu. Aspekty te są pomijane, zaś moment przechylający wyznaczany jest na podstawie prostej zależności [3]:

$$h_z = \frac{p \cdot A \cdot z}{1000 \cdot g \cdot D} \quad (1)$$

gdzie:

- h_z – ramię zewnętrznego momentu przechylającego wskutek działania wiatru,
- p – ciśnienie wiatru,
- A – powierzchnia nawiewu,
- z – ramię siły naporu wiatru,
- g – przyspieszenie ziemskie,
- D – wyporność statku.

Ramię siły naporu wiatru przyjmowane jest jako odległość od środka powierzchni nawiewu (co modeluje położenie punktu przyłożenia wypadkowej siły naporu wiatru) do środka oporu części podwodnej – dla momentu statycznego i odpowiednio do środka masy – dla momentu działającego dynamicznie. Kluczowe znaczenie ma jednakże sposób wyznaczania ciśnienia wiatru. W praktyce żeglugi morskiej przyjmuje się średnie ciśnienie odpowiadające wybranym prędkościom wiatru, bez wykonywania jakichkolwiek obliczeń. Jednakże wartość tego ciśnienia zależy od wielu czynników i jest inna dla każdego statku, a nawet dla różnych kątów przechyłu tego samego statku.

W celu oceny stateczności statku w ujęciu proskrypcyjnym nie ma w praktyce konieczności każdorazowego wyznaczania ciśnienia wiatru oddziałującego na kadłub statku. Wartość ciśnienia wiatru zapisana jest bowiem w stosownych wymogach technicznych towarzystw klasyfikacyjnych, jak również w zaleceniach Międzynarodowej Organizacji Morskiej [3]. Wartość ciśnienia jest możliwa do oszacowania dla wiatru o zadanej prędkości, na podstawie zależności:

$$p = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \rho \cdot V^2, \quad (2)$$

gdzie:

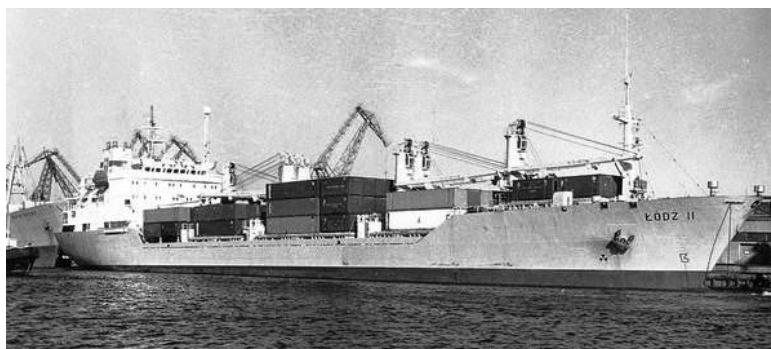
c – współczynnik oporu,

ρ – gęstość płynu,

V – prędkość wiatru.

Korzystanie z zależności (2) wymaga wyznaczenia współczynnika oporu aerodynamicznego kadłuba statku. W przypadku prezentowanych badań modelowany był opływ nadwodnej części kadłuba dla wiatru wiejącego z trawersu. Z tego względu należało oszacować wartość współczynnika oporu w kierunku prostopadłym do symetrycznej statku, czyli współczynnika c_y .

W celu wstępnego zbadania relacji między stałym momentem przechylającym statek i wyliczonym na podstawie zależności (1) a momentem wyznaczonym z uwzględnieniem większej liczby zjawisk towarzyszących opływowi kadłuba statku przyjęto założenie, że zostaną wykonane obliczenia dla przykładowego rzeczywistego statku. Ze względu na dostępność dokumentacji wybrano statek projektu B-354 (rys. 2).



Rys. 2. Statek B-354 (fot.: <http://www.plo.com.pl>)

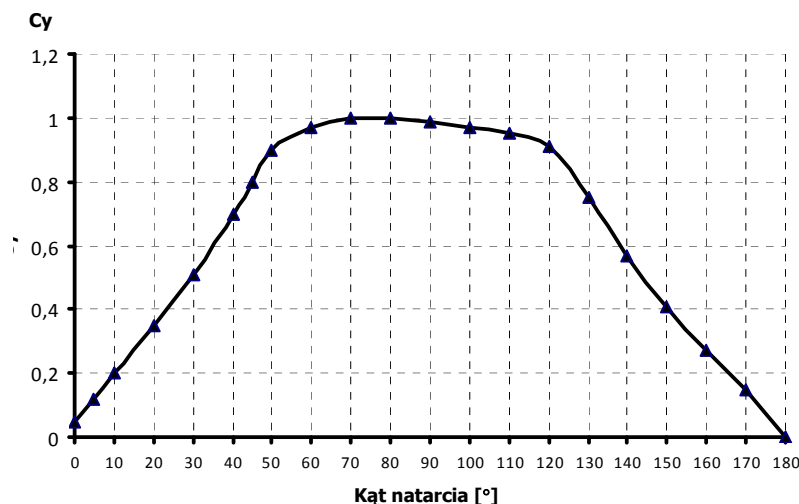
Podstawowe dane statku B-354 [1]:

- długość między pionami – 140 m,
- szerokość – 22 m,
- zanurzenie do letniej linii ładunkowej – 9,14 m,
- wyporność do letniej linii ładunkowej – 20 767 t.

Na potrzeby obliczeń momentu przechylającego wskutek działania wiatru przyjęto stan nr 10 załadowania statku B-354, zgodnie z „Informacją o stateczności dla kapitana” [1]. W stanie załadowania nr 10 statek charakteryzowany jest następującymi wielkościami:

- wyporność – 15 618 t,
- liczba kontenerów na pokrywach luków – 104 szt.,
- zanurzenie średnie – 7,16 m,
- powierzchnia nawiewu – 2105 m²,
- rzędna środka masy statku – 8,29 m od płaszczyzny podstawowej,
- rzędna środka powierzchni bocznej nawiewu – 8,12 m powyżej wodnicy pływania.

Dokumentacja statku B-354 nie zawiera wartości współczynników oporu, niemniej takie dane w literaturze przedmiotu są dostępne dla wielu statków, w tym podobnych do B-354. Na rysunku 3 przedstawiono wykres wartości współczynnika oporu c_y w zależności od kąta natarcia dla statku podobnego do B-354.



Rys. 3. Współczynnik oporu aerodynamicznego dla statku podobnego do B-354 [5]

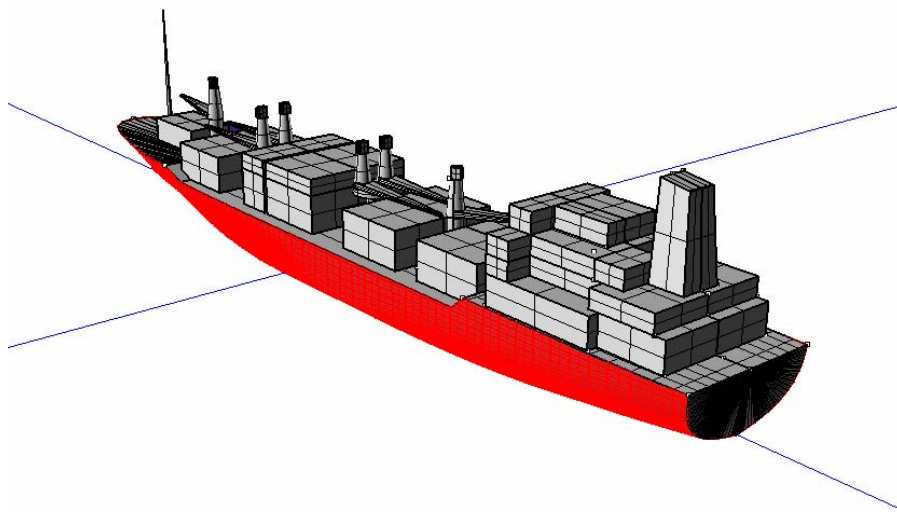
W obliczeniach ciśnienia wiatru i w konsekwencji momentu przechylającego przyjęto prędkość wiatru równą 39,2 m/s. Odpowiada ona sile wiatru 12°B i jest wykorzystywana na potrzeby kryterium pogodowego oceny stateczności statku w nieograniczonym obszarze żeglugi.

2. MODELOWANIE CFD MOMENTU PRZECHYLAJĄCEGO STATEK

Jedną z powszechnie stosowanych współczesnych metod badania zjawisk hydromechanicznych w okrętownictwie jest modelowanie przepływów z wykorzystaniem numerycznej mechaniki płynów – CFD (*Computational Fluid Dynamics*). W trakcie badań wykonano modelowanie opływu nadwodnej części kadłuba statku metodą RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*) [2].

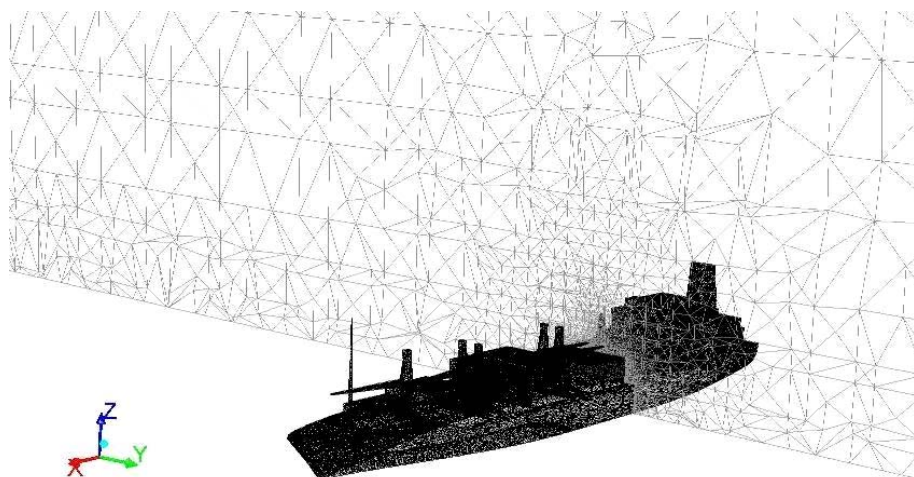
Zastosowana metoda RANS pozwala na uwzględnienie turbulencji przepływu, jednakże dokładne charakterystyki turbulencji nie są wyznaczane ze względu na ograniczenia mocy obliczeniowej współczesnych komputerów. W zamian wyznacza się uśrednione parametry przepływu, natomiast turbulencja przejawia się w równaniach w postaci predefiniowanych modeli turbulencji. Są one w istocie równaniami transportu wielkości związanych z turbulencją, wynikającymi z rozdzielenia wszystkich parametrów przepływu na składową uśrednioną i fluktuacje. Stosowane w RANS półempiryczne modelowanie turbulencji oparte jest na wyznaczaniu makroskopowych zjawisk z nią związanych [4].

Numeryczna symulacja opływu nadwodnej części statku wykonana została w kilku etapach. W pierwszym etapie określono geometrię statku B-354 w trójwymiarowej przestrzeni określanej współrzędnymi prostokątnymi. Widok perspektywiczny modelu przyjętego do obliczeń przedstawia rysunek 4.



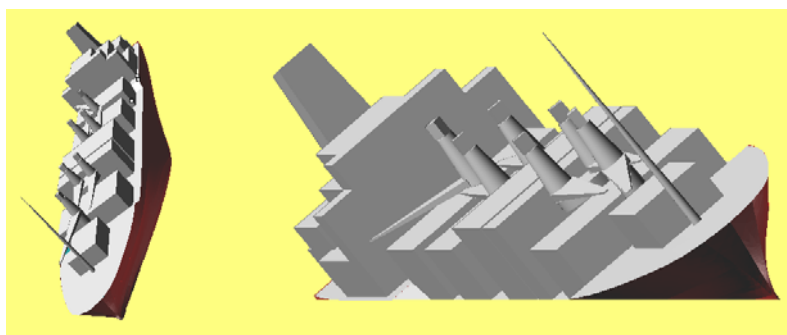
Rys. 4. Model statku B-354 przyjęty na potrzeby symulacji numerycznych

Następnie wykonano dyskretyzację przestrzeni wokół kadłuba poprzez wygenerowanie siatki obliczeniowej i określono dziedzinę obliczeniową. Fragment przyjętej siatki obliczeniowej przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Fragment zastosowanej siatki obliczeniowej

Po określeniu dziedziny obliczeniowej i wygenerowaniu siatki zaimportowano ją do solwera (programu obliczeniowego CFD). Obliczenia przeprowadzono za pomocą komercyjnego pakietu obliczeniowego Fluent w wersji 3D. W obliczeniach uwzględniono kąty przechyłu statku od 40° na burtę nawierzną do 40° na zawierzną, co odpowiada szerokiemu zakresowi możliwych do uzyskania w rzeczywistości kątów przechyłu statku B-354. Na rysunku 6 pokazano geometrię części nadwodnej przechylonego statku.

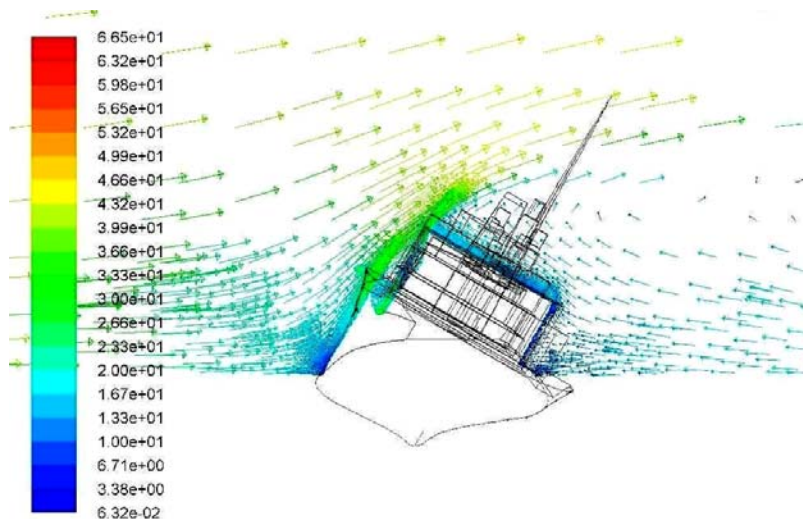


Rys. 6. Modelowanie przechyłu statku B-354

Badania numeryczne 3D przeprowadzono za pomocą programu Fluent wykorzystującego model przepływu RANS. W symulacji zastosowano semiempiryczny model turbulencji RNG $k-\varepsilon$, dla którego zdefiniowano warunki początkowe przy użyciu intensywności turbulencji oraz współczynnika lepkości turbulentnej [2]. Określono również następujące warunki brzegowe i początkowe:

- kadłub – ściana o zdefiniowanym współczynniku chropowatości,
- dziedzina obliczeniowa – ściany boczne idealnie gładkie,
- powierzchnia zwierciadła wody – ściana z zadaniem współczynnikiem chropowatości.

Przeprowadzenie symulacji numerycznych opływu nadwodnej części kadłuba statku pozwoliło na wyznaczenie wielu charakterystyk opływu. Ze względu na możliwość wizualizacji na szczególną uwagę zasługuje schematycznie przedstawione pole prędkości płynu (powietrza) wokół opływającego kadłuba (rys. 7) oraz układ linii prądu (rys. 8).



Rys. 7. Pole prędkości płynu wokół opływającego statku (strzałki umownie oznaczają wektory prędkości elementów płynu)



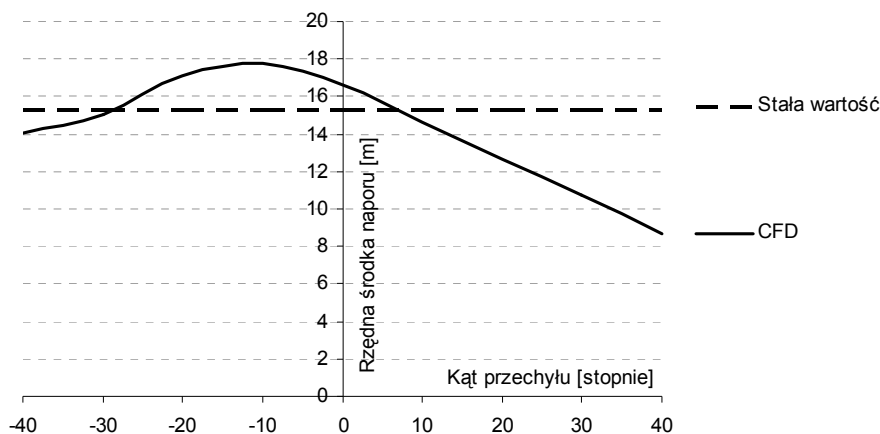
Rys. 8. Linie prądu wokół opływającego statku

Analiza rysunków 7 i 8 jednoznacznie wskazuje na skomplikowany obraz opływu statku przez wiatr, w związku z tym zasadne wydaje się pytanie o zakres i dokładność stosowania powszechnych zależności (1) i (2).

3. WYNIKI OBLICZEŃ

Istotą badanego zagadnienia jest wartość momentu przechylającego statek wskutek działania wiatru. Moment ten uzależniony jest zarówno od parcia (naporu) wiatru, jak i od ramienia, na którym działa siła parcia.

Na podstawie obliczeń wykonanych z wykorzystaniem zależności (1) i (2) oraz wyników symulacji numerycznych opływu kadłuba statku sporządzono osobne wykresy prezentujące rzędną środka naporu wiatru (rys. 9), wartość naporu wiatru (rys. 10) i wartość momentu przechylającego wskutek działania wiatru (rys. 11).

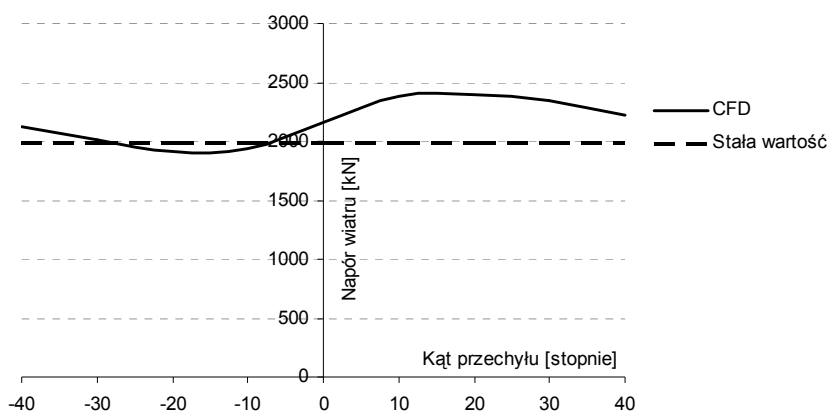


Rys. 9. Rzędna środka naporu od bocznego wiatru liczona od PP, wyznaczona jako stała wartość (odległość od środka powierzchni nawiewu do połowy zanurzenia statku) oraz w wyniku symulacji numerycznych

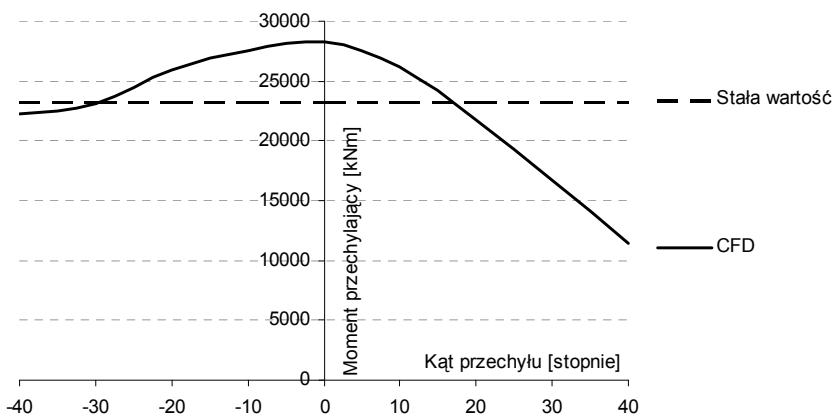
Przyjęto ramię, na którym działa siła naporu wiatru, wyznaczane jako odległość od rzędnej odpowiadającej połowie zanurzenia statku do rzędnej środka naporu. W przypadku obliczeń na podstawie zależności (1) i (2) środek naporu wiatru wyznaczony został jako geometryczny środek powierzchni nawiewu. Dla symulacji numerycznych opływu kadłuba statku punkt przyłożenia wypadkowej siły naporu wiatru uwzględnia zarówno modelowaną geometrię kadłuba, jego przechył, jak i zjawiska związane z turbulentnym opływem bryły kadłuba.

Napór wiatru, którego wartość przedstawiono na rysunku 10, wyznaczony został dla kątów przechyłu statku od -40° do 40° , przy czym wartość ujemna kąta oznacza przechył statku na burtę nawietrzną, zaś kąt dodatni – odpowiednio przechył na burtę zawietrzną. Stała wartość naporu wiatru wyznaczana z wykorzysta-

niem zależności (1) i (2) jest niezależna od przechyłu statku. Rozwiązanie takie jest powszechnie stosowane podczas oceny stateczności statku morskiego, aczkolwiek stanowi dość zgrubne przybliżenie rzeczywistości.



Rys. 10. Napór od bocznego wiatru wyznaczony na podstawie zależności (1) i podczas symulacji numerycznych



Rys. 11. Moment przechylający od bocznego wiatru wyznaczony na podstawie zależności (1) i podczas symulacji numerycznych

Moment przechylający stanowi iloczyn ramienia (rys. 9) i naporu (rys. 10). W przypadku obu porównywanych metod wyznaczania tego momentu zastosowano powszechne uproszczenie polegające na przyjęciu rzędnej środka oporu bocznego podwodnej części kadłuba w połowie zanurzenia [3]. Element ten wymaga niewątpliwie dalszych analiz.

WNIOSKI

W artykule przedstawiono wyniki modelowania opływu nadwodnej części kadłuba statku przez wiatr, które wykonane zostało pod kątem wyznaczenia momentu przechylającego statek. Uzyskane rezultaty odniesiono do wyników obliczeń przeprowadzonych z wykorzystaniem powszechnie stosowanych formuł obliczeniowych – zależności (1) i (2). Porównanie wyników oraz analiza pola prędkości płynu wokół kadłuba i układu linii prądu jednoznacznie wskazują na większy stopień złożoności zjawiska opływu kadłuba statku przez wiatr, niż są to w stanie uwzględnić proste zależności w postaci (1) czy (2).

Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że dla badanej prędkości wiatru względem kadłuba statku moment przechylający wyznaczony metodami CFD przyjmuje wartości większe niż wyliczone z zależności (1) i (2) dla kątów przechyłu statku z zakresu od około -30° do około 20° . Charakterystyczny jest natomiast znaczny spadek wartości momentu przechylającego dla kątów przechyłu statku większych niż 20° na burtę zawietrzną. W wykonywanych obecnie rutynowych obliczeniach statecznościowych efekt ten jest całkowicie pomijany.

Symulacje wykazały również, że położenie środka naporu wiatru w bardzo dużym stopniu zależy od kąta przechyłu statku. Wobec tego dotychczasowa praktyka, polegająca na przyjmowaniu stałego punktu przyłożenia siły parcia w geometrycznym środku powierzchni nawiewu, oddaje jedynie w niewielkim stopniu stan rzeczywisty. W efekcie stosowane standardowo założenie stałości momentu przechylającego w funkcji kąta przechyłu nie znajduje uzasadnienia w wynikach przeprowadzonych symulacji numerycznych.

Niezależnie od uzyskanych wyników należy zauważyć, że kolejnym krokiem prac badawczych powinno być zmodelowanie nie tylko opływu nadwodnej części kadłuba przez wiatr, ale również podwodnej części kadłuba, w celu wyznaczenia położenia środka oporu bocznego statku podczas przechylania wskutek działania wiatru. Element ten ma istotne znaczenie dla wyznaczenia ramienia, na którym działa siła naporu wiatru, a co za tym idzie dla wyznaczenia wartości momentu przechylającego.

Na obecnym, wstępnym etapie pracy badawczej, prowadzonej w opisanym w artykule zakresie, można stwierdzić przydatność symulacji numerycznych wykorzystujących metodę RANS do modelowania momentu przechylającego statek wskutek działania wiatru. Zagadnienie to ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa żeglugi, dlatego badania powinny być kontynuowane.

LITERATURA

1. Czuchryta T., *Dokumentacja hydrostatyczna, stateczności i wytrzymałości statku B-354*, Katedra Eksploatacji Statku WSM, Gdynia 1999.
2. *FLUENT Tutorial Guide*, Fluent Inc., 2006.

3. *IMO International Code on Intact Stability 2008* (2009 Edition), IMO, London 2009.
4. Kraskowski M., Marcinkowski M., *Wybrane zastosowania numerycznej mechaniki płynów w analizie opływu statku*, Zeszyty Problemowe, nr B-118, Centrum Techniki Okrętowej S.A., Gdańsk 2006.
5. *Maneuvering Technical Manual*, J. Brix (ed.), Schiff & Hafen / Seewirtschaft, Heft 4/1991, Hamburg 1991.

MODELING OF SHIP'S HEELING MOMENT DUE TO WIND BY USE OF CFD METHODS

Summary

The paper presents CFD-based (computational fluid dynamics) modeling of ship's heeling moment due to wind. The case study is carried out for an exemplary general cargo ship in one of her typical loading condition. The obtained outcome of numerical simulation is compared with standard ship's heel calculation which is commonly applied in the course of ship stability assessment.