

LOGISTYKA - NAUKA

hydromechanika, transport morski, badania modelowe,
baseny modelowe, urządzenia badawcze,
analizy numeryczne

KRÓLICKA Agnieszka¹

ZNACZENIE BADAŃ MODELOWYCH W PROJEKTOWANIU I EKSPLOATACJI JEDNOSTEK PŁYWAJĄCYCH NA PRZYKŁADZIE CTO S.A.

Ośrodek Hydromechaniki Okrętu jest specjalistyczną placówką badawczo-rozwojową Centrum Techniki Okrętowej S.A. w Gdańsku. Ośrodek wykonuje prace badawcze i usługowe w zakresie hydromechaniki, związane z projektowaniem i eksploatacją statków, okrętów oraz innych konstrukcji pływających. Zakres wykonywanych prac obejmuje: prognozy, analizy numeryczne, projekty - kształtu kadłuba zoptymalizowanego pod kątem funkcji statku w oparciu o nowoczesne narzędzia projektowe, pędników śrubowych z uwzględnieniem kawitacji i wymuszeń. Spółka osiąga sukcesy nie tylko w branży okrętowej. CTO S.A. realizuje także szereg innych programów: jachtowy, inżynierii środowiska, urządzeń badawczych, energii odnawialnej i offshore, a nawet inżynierii medycznej.

IMPORTANCE OF MODEL TESTS IN DESIGN AND OPERATION OF WATERCRAFT FOR EXAMPLE CTO S.A.

Ship Hydromechanics Division is a specialized research and development department of Ship Design and Research Centre conducting tests and research in the field of hydromechanics, connected with design and operation of ships and other floating structures, in scope of: predictions, numerical analyses, designs of - hull shape optimized with respect to the ship's functions with the application of modern design tools, screw propellers considering cavitation and excitations. Company achieves success not only in marine sector. CTO S.A. also implements several other programmers: sailing, environmental engineering, research facilities, renewable energy and offshore, and even medical engineering.

1. WSTĘP

Chcąc podnieść niezawodność i bezpieczeństwo jednostek pływających należy gromadzić dane pochodzące z trzech podstawowych źródeł:

- 1) statystyka dotycząca uszkodzeń, awarii i wypadków,
- 2) badań eksperymentalnych, eksploatacyjnych oraz badań stanowiskowych w laboratoriach
- 3) analiz teoretyczno-obliczeniowych opartych na wynikach badań podstawowych.

¹ Centrum Techniki Okrętowej S.A., Ośrodek Hydromechaniki Okrętu, ul. Szczecińska 65, 80-392 Gdańsk, Tel.: + 48 58 511 63 02, 58 556 11 25, e-mail: agnieszka.krolicka@cto.gda.pl

Należy wyróżnić szczególnie badania eksperymentalne oraz badania stanowiskowe na modelach różnego typu jednostek pływających. Wyniki badań modelowych można porównać z metodami teoretyczno-obliczeniowymi przy zastosowaniu metod komputerowych. Podstawowym problemem jednostek pływających jest stateczność, niezatapialność oraz wytrzymałość kadłuba, co wynika ze zmiennych w czasie rozkładów sił wyporu i ciężkości, uderzeń wody i zalewania pokładu oraz przyspieszeń działających na masy związane z jednostką pływającą a także wiatru. Wiązanie ze sobą dużej liczby informacji pochodzących od środowiska i obiektu pływającego jest podstawą nowoczesnych metod projektowania konstrukcji obiektów pływających i ich wyposażenia, wg kryteriów niezawodności i bezpieczeństwa dla całego okresu eksploatacji.



[Statki do obsługi wież wiertniczych](#)



[Promy](#)



[Statki specjalne](#)



[Mega-jachty](#)

Rys. 1 Przykładowe jednostki pływające dla których przeprowadza się próby modelowe i analizy numeryczne

2. ZAKRES DZIAŁALNOŚCI OŚRODKA HYDROMECHANIKI OKRĘTU

Zakres wykonywanych prac obejmuje:

Prognozy:

- 1) osiągow statku na wodzie spokojnej, głębokiej lub płytkiej,
- 2) osiągow statku na fali i przy różnych stanach morza,
- 3) właściwości manewrowych statku,
- 4) właściwości morskich statków i innych konstrukcji pływających,
- 5) właściwości kawitacyjnych pędników,
- 6) wymuszeń na kadłubie i wale od pracujących pędników.

Prognozy wykonywane są na podstawie prób modelowych i analiz numerycznych zgodnie z zaleceniami ITTC i wieloletnim doświadczeniem Ośrodka.

Analizy numeryczne:

- 1) opływu kadłuba statku z uwzględnieniem swobodnej powierzchni, rozkładu ciśnienia na powierzchni kadłuba, linii prądu na powierzchni kadłuba, układu falowego i pola prędkości w kręgu śruby (BOS-L, Comet, Fluent),
- 2) pracy śruby napędowej w niejednorodnym polu prędkości, z uwzględnieniem kawitacji oraz wyznaczeniem fluktuacji ciśnienia na powierzchni kadłuba statku, a także sił i momentów łożyskowych na wale śruby (UPCA2000),
- 3) krótko- i długoterminowych prognoz dotyczących zachowania się statku na fali (Wares, Resta).

Projekty:

- 1) kształtu kadłuba zoptymalizowanego pod kątem funkcji statku w oparciu o nowoczesne narzędzia projektowe (Napa, Maxsurf),
- 2) pędników śrubowych z uwzględnieniem kawitacji i wymuszeń.

3. BADANIA MODELOWE

Teoretyczne metody hydromechaniki nie dają możliwości zaspokojenia praktycznych potrzeb w projektowaniu i eksploatacji okrętu. Duże znaczenie ma więc eksperyment który może dotyczyć obiektów naturalnych, jak i modeli. Doświadczenia przeprowadzane z obiektami naturalnymi dają bezpośrednią odpowiedź na żądane pytania a więc są najbardziej cenne. Często jednak są bardzo czasochłonne, technicznie skomplikowane i bardzo kosztowne. Dlatego są bardzo rzadko wykorzystywane, a na czołówkę wysuwają się badania modelowe.

Badania modelowe są nie tylko podstawową i uniwersalną metodą prognozowania właściwości dynamicznych okrętu, szczególnie na etapie jego projektowania, ale również mają duże znaczenie naukowo-badawcze zarówno jako metoda weryfikacji teorii, jak też jako autonomiczna metoda poznawcza. Idea badań modelowych zakłada, aby z pomiarów przeprowadzonych na modelu wnioskować o zachowaniu się obiektu rzeczywistego. Wyróżnia się więc zjawisko podstawowe (w naturze) oraz zjawisko modelowe jako obraz zjawiska podstawowego. Warunki jakie musi spełnić zjawisko modelowe, aby wyniki pomiaru można było odnieść do zjawiska w naturze, są warunkami podobieństwa zjawisk. Warunki podobieństwa zjawisk obejmują kryteria podobieństwa oraz algorytmy przeliczania wyników pomiarów z modelu na naturę. Podobieństwa dotyczą geometrii, kinematyki i dynamiki.

W modelowaniu właściwości dynamicznych okrętu mamy do czynienia z tzw. efektem skali. Jest to różnica jaka powstaje pomiędzy zjawiskiem podstawowym i zjawiskiem modelowym wywołana niemożliwością zachowania wszystkich kryteriów podobieństwa. Błędy wynikające z istnienia efektu skali zmniejsza się skutecznie np. poprzez przybliżone obliczenie wielkości fizycznych charakteryzujących zjawisko, które się nie modelują (ekstrapolator) oraz wprowadzenie poprawek korelacyjnych. Źródłem metod ekstrapolacyjnych jest wiedza o zjawisku przebiegającym w uproszczonych warunkach, natomiast źródłem poprawek korelacyjnych jest bezpośrednie porównanie przeliczonych na naturę wyników badań modelowych z wynikami bezpośrednich pomiarów w naturze.

Badania modelowe dotyczą:

- 1) analizy pracy śruby napędowej w niejednorodnym polu prędkości
- 2) badania modelowe statków żaglowych

- 3) badania modelowe wodowania bocznego statku
- 4) badania modelowe wodowania wzdłużnego statku
- 5) badania obiektów typu offshore
- 6) krótko- i długoterminowe prognozy dotyczące zachowania się statku na fali
- 7) prognozy osiągow statku na fali przy różnych stanach morza
- 8) prognozy osiągow statku na wodzie spokojnej, głębokiej lub płytkiej
- 9) prognozy wymuszeń na kadłubie i wale od pracujących pędników
- 10) prognozy własności kawitacyjnych pędników
- 11) prognozy właściwości manewrowych statku
- 12) program właściwości morskich statków i innych konstrukcji pływających
- 13) program wsparcia projektowania jachtów motorowych
- 14) projektowanie kształtu kadłuba zoptymalizowanego pod kątem funkcji statku w oparciu o nowoczesne narzędzia projektowe (NAPA, MAXSURF)
- 15) projektowanie pędników śrubowych z uwzględnieniem kawitacji i wymuszeń

Badania modelowe pozwalają uzyskać informacje dotyczące strony hydrodynamicznej zjawiska. Próby przeprowadza się zgodnie z wymaganiami standardowych procedur CTO S.A. zweryfikowanych na podstawie własnych długoletnich doświadczeń. Modele wykonywane są z drewna i/lub z pianki poliuretanowej i wyposażone są w uproszczony model podbudowy. Ruchy modelu jako ciała sztywnego, w sześciu stopniach swobody, są śledzone w czasie rzeczywistym. Przebiegi rejestruje się za pomocą bezkontaktowego, szybkiego i precyzyjnego systemu Rodym DMM, który śledzi trajektorię za pomocą układu diod LED zainstalowanego na modelu. Dodatkowo wszystkie próby rejestrowane są przez cyfrową kamerę wideo. Za pomocą oprogramowania analizuje się wyniki prób w celu:

- przeliczenia zarejestrowanych zjawisk do skali rzeczywistej,
- identyfikacji parametrów decydujących o bezpieczeństwie przeprowadzanej próby.

4. BASENY MODELOWE I INNE OBIEKTY BADAWCZE

4.1 Zaplecze badawcze

Baseny modelowe



Rys. 2 Basen holowniczy (głębokowodny)

Głębokowodny basen holowniczy o wymiarach 260 m × 12 m × 6 m wyposażony w pomost holowniczy o prędkości maksymalnej 12 m/s oraz płytowy wywoływacz fal

nieregularnych generujący falowanie odpowiadające stanowi morza do około 8° w skali 1:25 oraz fale regularne o wysokości maksymalnej 0,7 m i długości do 14 metrów. Pomost holowniczy wyposażony jest w skomputeryzowane uniwersalne stanowisko rejestrujące.



Rys. 3 Basen holowniczy pomocniczy-mniejszy

Pomocniczy basen holowniczy o wymiarach $55 \text{ m} \times 7 \text{ m} \times 0,2\text{-}3,0 \text{ m}$ (regulowana głębokość) wyposażony w pomost holowniczy o prędkości maksymalnej 4 m/s oraz płytowy wywoływacz fal nieregularnych generujący falowanie odpowiadające stanowi morza do około 8° w skali 1:50 oraz fal regularnych o wysokości do 0,5 m przy długości do 7 m lub o wysokości do 0,18 m i długości do 14 m.

Basen do prób modelowych wodowania bocznego o wymiarach $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$.

Rola okrętowych basenów modelowych

- 1) Prognozowanie własności nautycznych statku
- 2) Optymalizacja kształtu kadłuba i pędnika
- 3) Analiza szczególnych przypadków pracy systemów i urządzeń
- 4) Koncepcja statku – metody przybliżone, statystyka
- 5) Projektowanie – metody analityczne, badania modelowe
- 6) Eksploatacja – pomiary w skali rzeczywistej

Odbiorcy usług basenów modelowych

- Biura projektowe i armatorzy
- Stocznie i producenci wyposażenia okrętowego

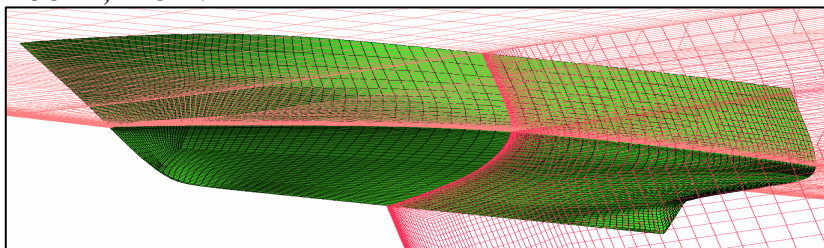
Narzędzia CFD

Do metod numerycznych zaawansowanych zalicza się metody wyznaczania właściwości hydrodynamicznych okrętu uwzględniające lepkość wody. Zaawansowane metody numeryczne nazywa się metodami CFD (Computational Fluid Dynamics). Metody te dotyczą przepływów cieczy lepkiej, nieściśliwej ($\rho = \text{const}$). Praktycznie techniki CFD (włączając do CFD przepływy lepkie, nie lepkie, wirowe i bezwirowe) stosowane są w obliczeniach:

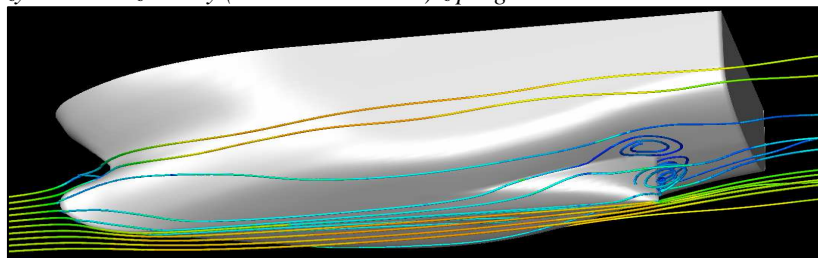
- właściwości oporowo-napędowych (z uwzględnieniem pędników) okrętów
- właściwości manewrowych okrętów

- właściwości morskich okrętów
- slemingu oraz efektów wchodzenia do wody (z uwzględnieniem hydroelastyczności)
- właściwości morskich obiektów oceanotechniki (obiektów offshore - zero prędkość postępową)

STAR CCM+, FLUENT



Rys. 4 Przykład obliczeniowy (CFD calculations) z programu Star CCM+



Rys. 5 Przykład obliczeniowy (CFD calculations) z programu Fluent

Inne obiekty badawcze:

- *Tunel kawitacyjny* o wymiarach przestrzeni pomiarowej 0,8mx0,8mx3,0m i maksymalnej prędkości przepływu 20m/s, z regulowanym ciśnieniem od 3 do 400kPa z możliwością symulacji pola prędkości za kadłubem, w miejscu usytuowania śruby. Wyposażenie stanowi aparatura do pomiaru charakterystyki hydrodynamicznej modelu śruby okrętowej kawitującej, obserwacji i rejestracji zjawiska kawitacji, system laserowy do pomiaru pola prędkości w kręgu śruby, aparatura do pomiaru sił i momentów hydrodynamicznych działających na ciało umieszczone w tunelu kawitacyjnym, pomiarów impulsów ciśnień na powierzchni kadłuba. Tunel kawitacyjny jest urządzeniem laboratoryjnym hydromechaniki eksperymentalnej wykorzystywanym głównie do kawitacyjnych badań modelowych śrub okrętowych wykonywanych w jednorodnym polu prędkości oraz kawitacyjnych badań modelowych pędników i sterów w symulowanym zakadłubowym polu prędkości.
- *Stacja brzegowa* do manewrowych prób modelowych na otwartym akwenie - modele do prób manewrowych wyposażone są we własny napęd a sterowanie odbywa się drogą radiową, stacja wyposażona jest w system do identyfikacji trajektorii ruchu modelu.
- *Stanowisko do prób zbiorników stabilizujących* kołysania boczne statków
- *Laboratorium akustyczne* - jest jednym z najnowocześniejszych obiektów tego typu zlokalizowanych w Polsce. Głównym celem jego istnienia jest świadczenie usług w zakresie badań izolacyjności akustycznej, pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku oraz mocy akustycznej urządzeń, zgodnie z normami międzynarodowymi. Laboratorium

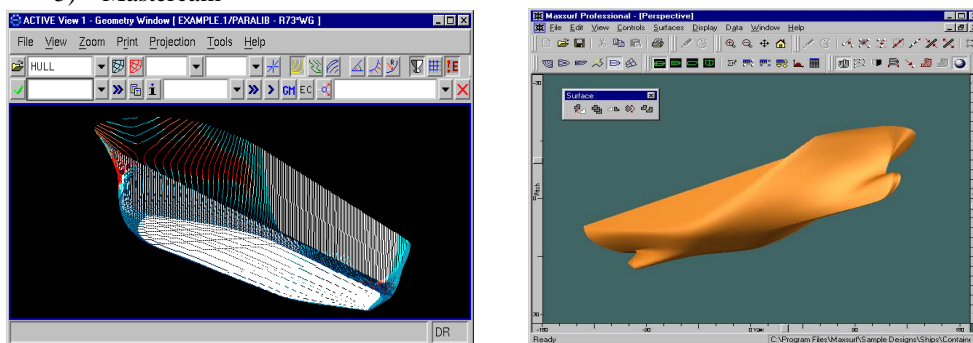
składa się z systemu niezależnych komór pogłosowych, w których, dzięki odpowiedniej konstrukcji budynku, badania akustyczne mogą odbywać się jednocześnie.

- *Laboratorium ogniowe*-wykonuje się badania odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych pionowych o wymiarach (HxW) 3,2 m x 3,4 m oraz poziomych o wymiarach (LxW) 4,0 m x 3,4 m. Badane wyroby to: elementy budowlane, elementy wyposażenia okrętowego, elementy pojazdów szynowych, sejfy i szafy ogniodopusne, komunikacyjne ekrany, dźwiękochłonne.

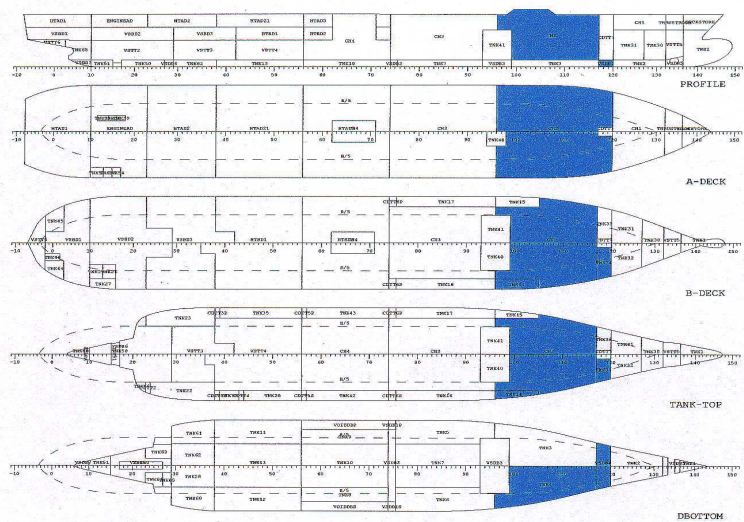
4.2 Zaplecze techniczne

Narzędzia CAD/CAM

- 1) NAPA
- 2) MAXSURF
- 3) Rhinoceros
- 4) ACad
- 5) Mastercam



Rys. 6 Przykład geometrii kształtu kadłuba z programu Maxsurf



Rys. 7 Profil geometryczny kształtu kadłuba z programu Napa

Budowa modeli badawczych (do 12 m długości);

- obróbka CNC – pędniki i kadłuby;
- projektowanie i produkcja wyposażenia badawczego



Rys. 8 Przykład gotowego modelu kadłuba i śruby 5-cio skrzydłowej

4.3 Podstawy modelowania w hydromechanice**Opływ kadłuba statku**

Analiza opływu kadłuba pozwala na ocenę projektowanego kształtu na podstawie generowanego przez jednostkę układu falowego, linii opływu, rozkładu ciśnień na powierzchni kadłuba oraz pól prędkości w zdefiniowanych regionach jak np. dopływ wody do pędnika. Wizualizację opływu kadłuba uzyskuje się za pomocą narzędzi hydromechaniki numerycznej-CFD, modelowych prób opływu, jak i modelowych prób pomiaru pola prędkości wokół kadłuba.

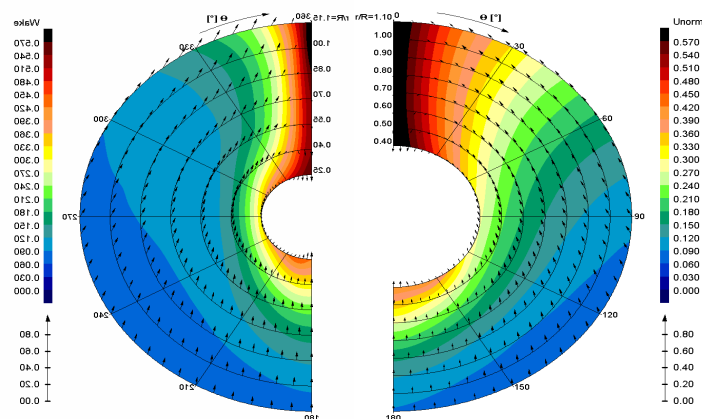


$$CR=f(Fn)$$

$$CF=f(Re)$$

Rys.9 Przykład przeprowadzania badań modelowych na modelu M800

Poprawne określenie opływu kadłuba projektowanej jednostki dla założonego zanurzenia i prędkości jest niezbędne do wyznaczenia rejonów ewentualnej modyfikacji kształtu, w celu optymalizacji oporowo-napędowej oraz prawidłowego umiejscowienia części wystających.



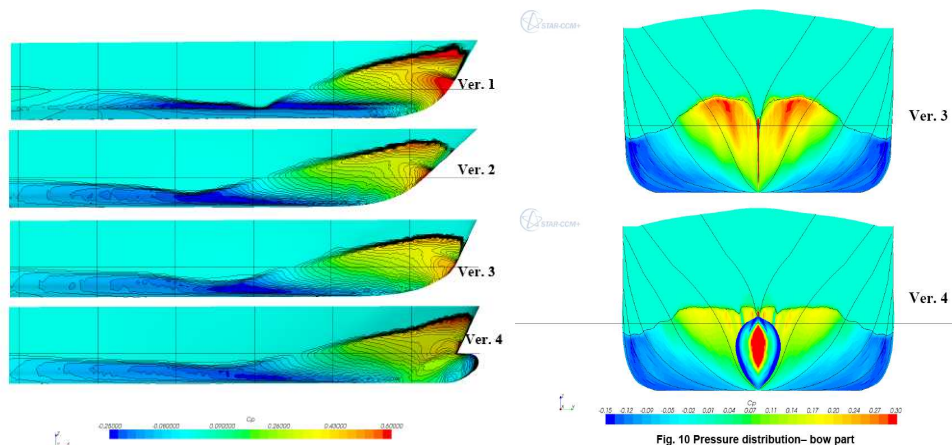
1:1

1:32

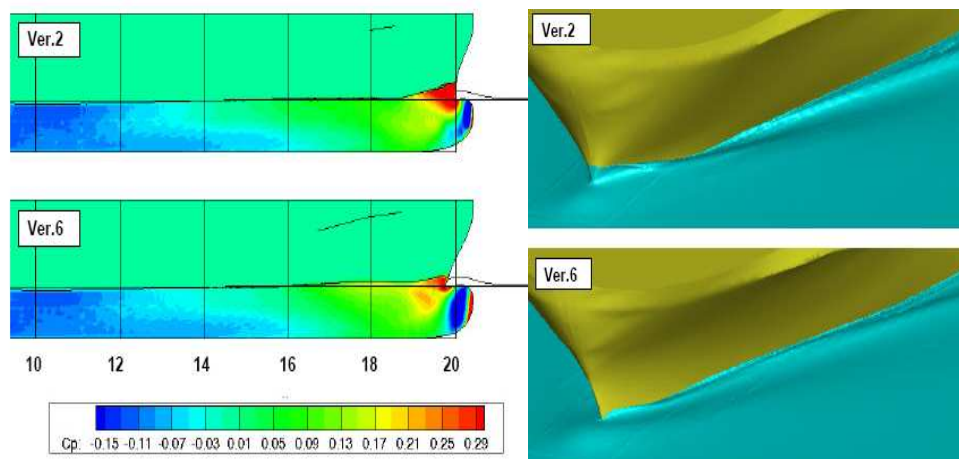
Rys.10 Schemat rozkładu strumienia nadążającego (Wake) w skali statku i modelu

Optymalizacja kształtu kadłuba

W polskim przemyśle okrętowym stosuje się różne systemy analitycznego opisu kształtów kadłuba. Systemy te stanowią najczęściej części składowe dużych systemów komputerowych stosowanych do celów projektowo-konstrukcyjno-technologicznych. Polski system Aster opisuje kształty kadłuby za pomocą równań linii płaskich przekrojów w trzech wzajemnie prostopadłych płaszczyznach. Inne używane systemy w polskim przemyśle okrętowym to hiszpański Foran, australijski Maxsurf i fińska Napa. Są to duże systemy wykorzystywane do celów projektowo-konstrukcyjno-technologicznych. Wszystkie one posiadają m.in.moduły pozwalające projektować i dokumentować kształty kadłuba.



Rys.11 Optymalizacja kształtu kadłuba – rozkład ciśnień na części dziobowej (CFD)



Rys.12 Rozkład ciśnienia dla różnych wersji modyfikacji kształtu w części dziobowej (CFD)

5. WNIOSKI

1. Baseny modelowe ewoluują w kierunku centrów kompetencji.
2. Rozszerza się zakres usług oferowanych przez baseny (nowe rynki).
3. Pojawiają się nowe zastosowania głównych narzędzi basenów modelowych dotyczących eksperymentów i obliczeń.
4. Podstawowe badania modelowe dotyczą głównie: śrub okrętowych odosobnionych, oporu, napędu-prognoza prędkości, właściwości morskich okrętu, sterowności, niezatapialności okrętu.
5. Prowadzone symulacje komputerowe mają na celu zwiększenia niezawodności i bezpieczeństwa pływania jednostek pływających.
6. Potrzebne są działania nakierowane na uruchamianie zintegrowanych systemów informatycznych współpracujących ze sobą w branży transportu morskiego
7. Należy tworzyć krajowe konsorcja wykonawcze wszelkich tematów technologicznych decydujących o jakości i bezpieczeństwie a także sprostać pełnym wymogom przyszłościowych konstrukcji okrętowych (duże i szybkie kontenerowce oraz statki typu Ropax).

Eksperyment ciągle odgrywa pierwszoplanową rolę w prognozowaniu właściwości dynamicznych okrętu, głównie przez braki lub niedoskonałości teorii. W eksperymencie dominują badania modelowe chociaż ich rola w prognozowaniu właściwości hydrodynamicznych okrętu ulega zmianie. Z narzędzia prognostycznego stosowanego tam gdzie są braki w metodach analityczno-numerycznych lub gdzie spodziewany jest bardziej dokładny wynik eksperymentu modelowego niż wynik obliczeń, badania modelowe są narzędziem weryfikacji poprawności wyników analiz obliczeniowych. Prowadzi to do obniżenia kosztów i przyspieszenia procesu projektowania okrętu, w którym wykonuje się więcej prognoz na drodze obliczeniowej a eksperyment modelowy staje się weryfikatorem tych analiz.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bertram V.: *Practical Ship Hydrodynamics*, Oxford 2000.
- [2] Dudziak J.: *Teoria okrętu*, Gdańsk, Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, 2008.
- [3] Hann M.: *Komputerowa analiza niezawodności i bezpieczeństwa maszyn i konstrukcji okrętowych poddanych kołysaniom*, Okrętownictwo i Żegluga, Gdańsk 2001.
- [4] Jarosz A.: *Okrętowe baseny modelowe*, Wydawnictwo morskie, Gdańsk 1997.
- [5] Krężelewski M.: *Hydromechanika ogólna i okrętowa*, część II, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1982.
- [6] Krupowicz A.: *Metody numeryczne zagadnień początkowych równań różniczkowych zwyczajnych*, Warszawa, PWN 1986.