

REWIZJA PRZYBLIŻONYCH METOD OBLICZANIA OPORU CAŁKOWITEGO KADŁUBA Z WYKORZYSTANIEM BADAŃ MODELOWYCH WYBRANEGO JACHTU ŻAGLOWEGO

Rewizja opiera się na weryfikacji wybranych przybliżonych metod prognozowania oporu całkowitego gólego kadłuba, opracowanych w wyniku badań systematycznej serii kadłubów jachtów żaglowych w latach 1973–2010, znanych jako The Delft Systematic Yacht Hull Series (DSYHS). Zademonstrowano wyniki otrzymane z wykorzystaniem wzorów przybliżonych (Metoda Delft), obliczeń numerycznych (CFD) i badań modelowych dla wybranego jachtu żaglowego o nowoczesnym kształcie kadłuba wraz z ich dyskusją.

Słowa kluczowe: jacht, opór kadłuba, metody przybliżone, regresja, CFD, badania modelowe.

WSTĘP

Od dawna podejmowane są próby znalezienia prostej i satysfakcjonującej metody oszacowania oporu kadłuba na wczesnych etapach procesu projektowania statku. Obecnie próby te opierają się na trzech podstawowych sposobach, takich jak: obliczenia na podstawie formuł przybliżonych, symulacje numeryczne w mechanice płynów (ang. *Computational Fluid Dynamics* – CFD) oraz eksperymenty fizyczne na modelu statku w skali (tzw. badania modelowe). Najbardziej pożądane przez projektantów są metody przybliżone, wymagające najmniejszych nakładów finansowych i czasowych. W literaturze przedmiotu można znaleźć wiele formuł o prostej strukturze algorytmicznej, łatwych w implementacji do arkusza kalkulacyjnego, szczególnie w odniesieniu do statków motorowych [Zborowski 1972; Michalski 2007; Larsson, Eliasson i Orych 2014; Karczewski, Kozak 2018]. Kilka z nich zagnieżdżono w modułach szeroko obecnie stosowanych programów, wspomagających projektowanie wstępne okrętu, np. MaxSurf moduł Resistance, RhinoCeros + Orca3D, Aveva czy Delftship. Wyniki tych obliczeń należy jednak traktować jako wartości przybliżone. Przytaczane formuły często przydatne są wyłącznie dla danego rodzaju statków, typu i aranżacji kadłuba oraz dla pewnego zestawu parametrów głównych.

W artykule przedstawiono wybrane przybliżone metody prognozowania oporu statku o napędzie wiatrowym oraz ich weryfikację przez badania na basenie numerycznym (CFD) i fizycznym na podstawie geometrii i danych współczesnego

jachtu żaglowego [Kijewski 2017]. Badania zostały przeprowadzone na Wydziale Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej przy współpracy Centrum Badawczo-Rozwojowego Delphia Yachts w Olecku.

1. OPÓR GOŁEGO KADŁUBA

Współcześnie podstawowa dekompozycja oporu gołego kadłuba R_T polega na wydzieleniu dwóch odrębnych składowych, które charakteryzują się różnymi zjawiskami. Wyróżnia się opór resztowy $R_R(F_N)$, zależny od liczby Froude'a i opór lepkości $R_V(R_N)$, zależny od liczby Reynoldsa, zgodnie z formułą (1.1):

$$R_T(F_N, R_N) = R_R(F_N) + R_V(R_N) \quad (1.1)$$

Przyjmuje się, że opór lepkości równoważny jest oporowi ekwiwalentnej płaskiej płyty o tej samej powierzchni zwilżonej, zgodnie ze wzorem (1.2):

$$R_V = \frac{1}{2} \rho (1 + k) C_F S_W v^2 \quad (1.2)$$

gdzie:

- ρ – gęstość ośrodka [kg/m^3],
- $(1+k)$ – współczynnik kształtu kadłuba,
- C_F – bezwymiarowy współczynnik oporu tarcia ekwiwalentnej płaskiej płyty [-],
- S_W – powierzchnia zwilżona kadłuba [m^2],
- v – prędkość statku [m/s].

Natomiast formuła na wartość oporu resztowego w przypadku metod przybliżonych jest najczęściej wynikiem aproksymacji wyników z badań serii obiektów pływających danego typu. Dla jachtów żaglowych powszechnie przyjmuje się, że wzory regresyjne opracowane pod koniec XX wieku w ramach badań *Delft Systematic Yacht Hull Series* (DSYHS) są najbardziej wiarygodnymi i wszechstronnymi przybliżeniami, dotyczącymi predykcji oporu kadłuba [Huetz i Alessandrini 2011].

2. ROZWÓJ METODY DELFT

Badania DSYHS zostały zapoczątkowane w 1973 roku przez profesorów Jelle Gerritsma z Uniwersytetu Delft w Holandii oraz Nicka Newmana i Justina Kerwina z Massachusetts Institute of Technology w Bostonie. Prawdopodobnie do chwili obecnej jest to najliczniejsza seria testowanych kadłubów jachtów żaglowych. Składa się z około 80 różnych modeli, przetestowanych systematycznie w spójnej procedurze pomiarowej w Laboratorium Hydromechaniki Uniwersytetu Delft w Holandii.

Początkowo metody odzwierciedlały stan wiedzy i możliwości obliczeniowe lat siedemdziesiątych. Zostały tak opracowane, aby było możliwe korzystanie z nich bez konieczności używania komputera [Huetz i Alessandrini 2011].

Wyróżniały się prostą i elegancką strukturą, opartą na zestawie kilku stosunków parametrów głównych kadłuba i zbiorze współczynników regresyjnych. Od tego czasu mimo rozwoju samej serii kolejnych zaproponowanych formuł, a przede wszystkim wzrostu możliwości obliczeniowych, podejście do zagadnienia pozostało takie samo, dzięki czemu proponowane funkcje są łatwe w użyciu, nawet dla projektantów amatorów.

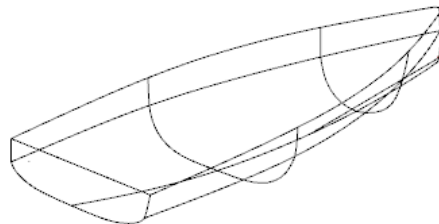
Historycznie pierwsza formuła została zaprezentowana w 1975 roku przez Kerwina i obejmowała serię 9 modeli, dla prędkości w zakresie liczby Froude'a F_N do 0,45 [Kerwin 1975]. Kolejne przedstawiano w 1981 roku [Gerritsma, Onnink i Versluis 1981] i w 1987 roku [Gerritsma i Keuning 1988]. Bazowały one na serii kadłubów, których geometria nawiązywała do rozwoju myśli projektowej tamtych czasów. Później jeszcze w latach 1996 i 1998 zespół Keuninga uaktualniał formułę [Keuning i Binkhorst 1997; Keuning i Sonnenberg 1998], natomiast ostatnie propozycje zostały opublikowane w 2008 roku [Keuning i Katgert 2008].

Kolejne rewizje wzorów następowały ze względu na znaczące zmiany, zachodzące w dziedzinie projektowania jachtów. Od lat siedemdziesiątych zmienił się kształt kadłuba i części wystających (balastów, sterów), a co za tym idzie, rozkład wyporności po długości jachtu, zmieniły się układy takielunku oraz wymagania użytkowników i prędkości osiągane przez jachty żaglowe [Keuning i Katgert 2008], co łatwo zauważyć, porównując np. linie teoretyczne pierwszych jachtów serii Delft z dzisiejszymi jachtami typu IMOCA. Usprawiedliwiało to i nadal usprawiedliwia dalszy rozwój rodziny badanych kształtów oraz krytyczne podejście do proponowanych funkcji poprzez ciągle sprawdzanie ich stosowalności dla współcześnie pojawiających się kształtów.

3. OBIEKT BADAŃ

Obiektem badań był jacht turystyczny o długości kadłuba około 43 stóp [Kijewski 2017].

Na rysunku 1 zaprezentowano model krawędziowy bryły kadłuba. Można zauważyć cechy kształtu, będące wyróżnikiem nowoczesnego jachtingu, takie jak: odwrotna dziobnica, szeroka i wyporna część rufowa oraz wyraźna linia załamania przekrojów poprzecznych powyżej obła.

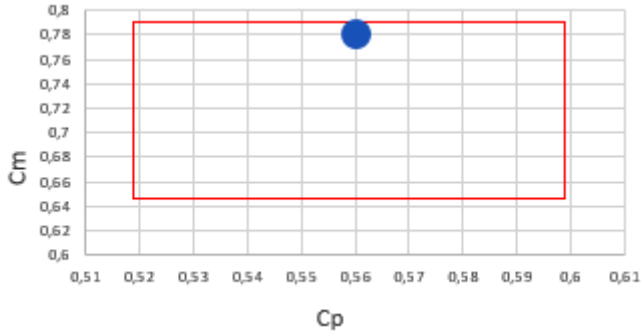


Rys. 1. Model krawędziowy bryły kadłuba

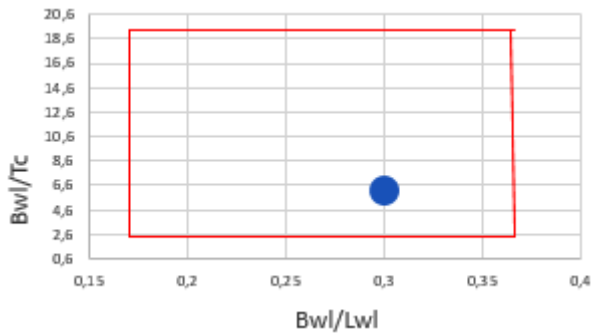
W badaniach przyjęto jeden standardowy stan załadunku, zgodnie z wytycznymi normy PN-EN ISO 12217-2 [PN-EN ISO 12217-2:2017], odpowiadający

minimalnemu stanowi załadowania. Początkowo sprawdzano, czy stosunki parametrów głównych i współczynników bezwymiarowych jachtu leżą w zbiorze wartości określonych dla przebadanej serii jachtów Delft.

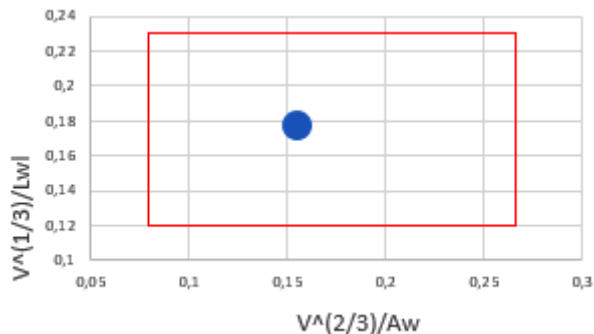
Wyniki zaprezentowano w formie graficznej na rysunkach 2–5.



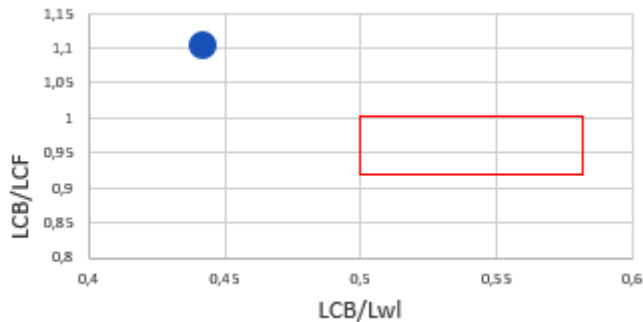
Rys. 2. Badany jacht na tle przebadanej serii Delft, wartość współczynników C_p i C_m



Rys. 3. Badany jacht na tle przebadanej serii Delft, wartość stosunków B_{wl}/L_{wl} i B_{wl}/T_c



Rys. 4. Badany jacht na tle przebadanej serii Delft, wartość stosunków $V^{2/3}/A_w$ i $V^{1/3}/L_{wl}$



Rys. 5. Badany jacht na tle przebadanej serii Delft, wartość stosunków LCB/LCF i LCB/Lwl

Forma kadłuba i rozkład wyporności po długości zmienił się radykalnie od czasu ostatnich modyfikacji serii Delft. Współczesne jachty formą wodnic nie przypominają XX-wiecznej smukłej „łuski”, a bardziej „pękate żelazko”, co wyraźnie widać po przyjrzeniu się nowoczesnym jachtom regatowym. Wyraża się to szczególnie poprzez zmianę położenia środka wyporu po długości jachtu, LCB/Lwl , i środka wodnicy, LCF , które wyraźnie przesunęły się ku rufie, przez „utyicie” jachtów w części tylnej kadłuba. Dlatego w przypadku badanej jednostki wartości stosunków LCB/Lwl i LCB/LCF znalazły się poza granicą zbioru wyznaczonego przez serię. Pozostałe charakterystyki kształtu znajdują się w zakresie przebadanej rodziny modeli.

4. METODY PRZYBLIŻONE

W odniesieniu do metod przybliżonych rewizji poddano formuły zaadaptowane i używane w module programu komputerowego MaxSurf Resistance, oznaczone jako Delft I i Delft II, które bazują na publikacjach [Gerritsma, Keuning i Onnink 1991, 1992]. Dodatkowo na podstawie [Keuning i Katgert 2008] dla zakresu prędkości $F_N > 0,4$, wykorzystując autorski arkusz kalkulacyjny, sprawdzono również stosowalność poniższej formuły (1.3):

$$\frac{Rrh}{\nabla c \cdot \rho \cdot g} = a_0 + \left(a_1 \cdot \frac{LCB}{Lwl} + a_2 \cdot x_y^2 + a_3 \cdot \frac{\nabla c^{2/3}}{Aw} + a_4 \cdot \frac{Bwl}{Lwl} + a_5 \cdot \frac{LCB}{LCF} + a_6 \cdot \frac{Bwl}{Tc} + a_7 \cdot C_m \right) \cdot \frac{\nabla c^{2/3}}{Lwl} \quad (1.3)$$

gdzie:

- $a_{0..7}$ – współczynniki regresyjne,
- Rrh – opór resztowy gołego kadłuba [N],
- ∇c – objętość wyporności [m³],
- ρ – gęstość ośrodka [kg/m³],
- g – przyspieszenie ziemskie, 9,81 [m/s²],
- Lwl – długość na linii wodnej [m],

- B_{wl} – szerokość na linii wodnej [m],
 T_c – zanurzenie kadłuba [m],
 LCB – wzdłużne położenie środka wyporu [m],
 LCF – wzdłużne położenie środka wodnicy [m],
 C_p – współczynnik pełnotliwości walcowej [-],
 A_w – powierzchnia wodnicy pływania dla prędkości zero [m²],
 C_m – współczynnik pełnotliwości owręża [-].

Składowa oporu lepkości została doliczona zgodnie ze wzorem (1.2).

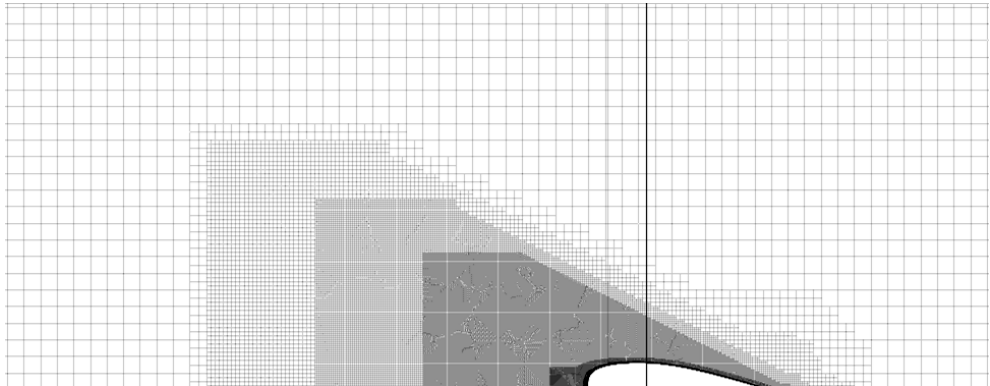
5. SYMULACJE NUMERYCZNE – CFD

Do prognozowania oporu jachtu na wodzie spokojnej w warunkach basenu numerycznego wykorzystany został program STAR CCM+, posługujący się zaimplementowaną wewnątrznie jedną z najbardziej popularnych obecnie i stosowanych w okrętownictwie metod obliczeniowych czyli metodą objętości skończonych (*Finite Volume Method*). Zastosowano model przepływu trójwymiarowego, niestacjonarnego, turbulentnego, dwufazowego. Do modelowania turbulencji wykorzystano solver RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes Equations*). Kolejnym istotnym aspektem wykonanych symulacji było odpowiednie uwzględnienie powierzchni interakcji między dwoma fazami – wodą i powietrzem. Do tego zastosowany został model VOF (*Volume of Fluid*), który pozwala ustalić położenie swobodnej powierzchni na podstawie procentowej zawartości danej fazy wewnątrz każdej objętości. We wszystkich symulacjach uwolnione zostały dwa stopnie swobody – podobnie jak podczas badań na basenie modelowym kadłub mógł się nurzać i przegłębiać. Możliwość swobodnych ruchów kadłuba zapewnił model (*Dynamic Fluid Body Interaction*), który oblicza reakcję bryły sztywnej w odpowiedzi na ciśnienie i siły styczne wywierane przez płyn.

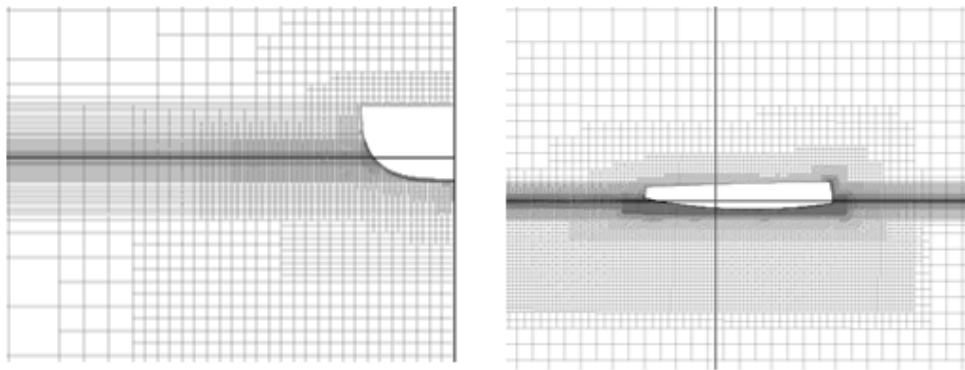
Powierzchnia, na której zdefiniowano wlot, została umieszczona dwie długości kadłuba przed dziobem jachtu, wylot trzy długości za rufą, szerokość domeny wynosiła dwie długości jachtu, górna powierzchnia została umieszczona półtorej długości jachtu od swobodnej powierzchni, a dolna dwie długości od swobodnej powierzchni. Na wszystkich powierzchniach ograniczających wirtualny basen modelowy z wyjątkiem wylotu i płaszczyzny symetrii zostały zdefiniowane takie same warunki brzegowe jak na wlocie. Aby właściwie odwzorować geometrię jachtu oraz uchwycić istotne cechy przepływu, siatka obliczeniowa została zagęszczona wokół kadłuba, na swobodnej powierzchni oraz w śladzie za kadłubem. Łączna suma elementów wyniosła 2 775 976 komórek.

Opisaną siatkę zaprezentowano na rysunkach 6 i 7.

Symulacje dla prognozy przebiegu krzywej oporu przeprowadzono w zakresie prędkości od 2 do 12 węzłów.



Rys. 6. Przekrój przez siatkę obliczeniową na swobodnej powierzchni – widok z góry



Rys. 7. Przekrój przez siatkę – widok od rufy (po lewej) i z boku (po prawej)

6. BADANIA MODELOWE

Badaniom poddano kadłub laminatowy, w skali 1:6,5, dostarczony przez Centrum Badawczo-Rozwojowe Delphia Yachts w Olecku. Testy przeprowadzono w basenie holowniczym Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa PG w Gdańsku. Zakres badań obejmował pomiar oporu, wynurzenia i zmiany kąta przegłębienia w warunkach wody spokojnej w zakresie prędkości holowania $v_M = 0,4 - 2,5$ m/s ($v_S = 1,0 - 6,7$ m/s dla jednostki rzeczywistej).

Opór całkowity modelu, R_{TM} , został przeliczony na skalę statku metodą ekstrapolacji trójwymiarowej, będącej rozszerzeniem metody Froude'a, przy założeniu podziału współczynnika oporu całkowitego na opór tarcia zależny tylko od liczby Reynoldsa i współczynnik oporu resztowego (falowy, bryzgowy i ciśnienia), będący funkcją liczby Froude'a, jak również Reynoldsa (opór ciśnienia) z uwzględnieniem współczynnika kształtu, k , który zwiększa opór tarcia zarówno statku, jak i modelu w stosunku do równoważnych płaskich płyt. Jednakże ze względu na specyfikę kształtu współczynnik k przyjęto jako równy zero [Grygorowicz i Karczewski 2018].



Rys. 8. Model jachtu – widok z boku



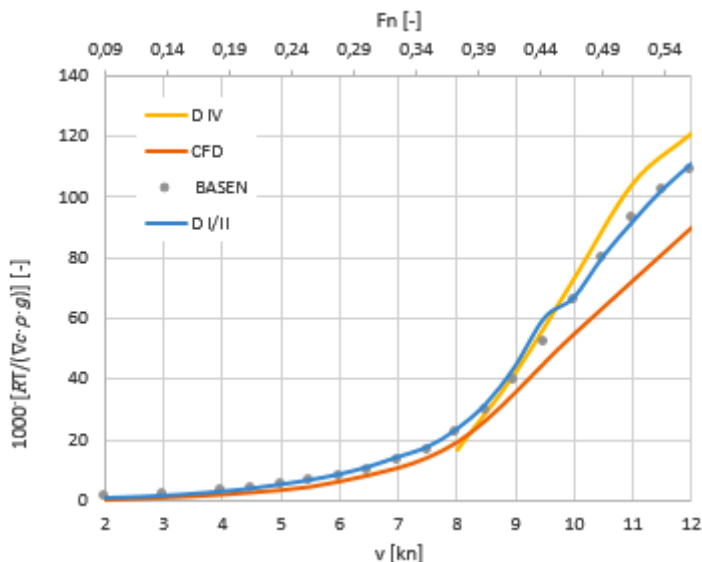
Rys. 9. Model w trakcie badań – $v_M = 2,0$ m/s

7. WYNIKI

Na potrzeby prezentacji wyników przyjęto następujące oznaczenia dla poszczególnych weryfikowanych metod:

- obliczenia wykonane za pomocą metod zaimplementowanych do programu MaxSurf – D I/II;
- obliczenia wykonane z użyciem wzoru (1.1)–(1.3) – D IV;
- wyniki symulacji numerycznych – CFD;
- rezultaty testów na basenie modelowym – BASEN.

Wyniki wszystkich oszacowań przedstawiono na wykresie zbiorczym na rysunku 10.



Rys. 10. Wykres zbiorczy uzyskanych wyników

Na podstawie otrzymanych wartości dla wybranego zakresu prędkości obliczono błąd względny, wyrażony w procentach, odniesiony do wartości oszacowania oporu całkowitego według metod D I/II i D IV, które poddane zostały rewizji. Wyniki umieszczono w tabeli 1.

Tabela 1

Porównanie oszacowań poszczególnymi metodami

v [kn]	1000 · [RT/(∇c · ρ · g)]		D I/II vs. D IV [%]	D I/II vs. CFD [%]	D I/II vs. BASEN [%]	D IV vs. CFD [%]	D IV vs. BASEN [%]
	D I/II [-]	D IV [-]					
4	2,8	–	–	18	-5	–	–
6	8,4	–	–	22	4	–	–
8	23,2	16,7	28	16	5	-17	-33
10	66,6	73,4	-10	17	1	25	10
12	110,8	121,0	-9	19	2	25	10

gdzie:
D I/II – obliczenia wg metod zaimplementowanych do programu MaxSurf,
D IV – obliczenia wykonane z użyciem wzoru (1.1)–(1.3),
CFD – wyniki symulacji numerycznych,
BASEN – rezultaty testów na basenie modelowym

PODSUMOWANIE

Analizując poszczególne wyniki, stwierdzono, że:

- w odniesieniu do rezultatów otrzymanych z badań modelowych, które powszechnie uważa się za najbliższe wartościom oporu rzeczywistego, obliczenia wykonane metodą D I/II można uznać za dokładne i celne oszacowanie oporu gołego kadłuba. Błąd względny w zakresie od 4 do 12 węzłów nie przekroczył 5%. Krzywa oporu w granicach liczby Froude'a, F_N , od 0,40 do 0,47 ma wyraźne „wybrzuszenie”, spowodowane przejściem z reżimu pływania wypornościowego na półwypornościowe i zmianą stosowanej formuły obliczeniowej. Zgodnie z publikacją [Keuning i Katgert 2008] granica stosowalności poszczególnych wzorów przebiega pomiędzy wartościami 0,45–0,475;
- metoda D IV dość dokładnie odpowiada oczekiwaniom w zakresie przejścia proggu wypornościowego. Jednak choć sformułowana dość późno (2008) i na podstawie badań przeprowadzonych dla prędkości odpowiadającej $F_N > 0,60$, to w zakresie stosowalności daje wyniki większe niż wartości eksperymentalne o około 10%;
- powszechnie uważane za przyszłość predykcji oporu kadłuba metody symulacji numerycznej, CFD, w całym zakresie badanych prędkości szacują opór na poziomie około 20% niższym niż metoda D I/II.

Podsumowując, należy stwierdzić, że posiadając wiedzę na temat stosowalności wybranej uproszczonej metody dla danego typu kadłuba, można stosunkowo dokładnie oszacować wartość jego oporu hydrodynamicznego. W przypadku metod, które zostały poddane rewizji, spodziewano się, że to formuła wyprowadzona stosunkowo niedawno, co do otrzymanych wartości liczbowych, powinna być bliższa badanemu obiektowi, tzn. metoda D IV. Wyniki badań jednak tego nie potwierdziły. Umacnia to tezę o niezbędności przeprowadzania badań modelowych w procesie projektowym, w którym jednym z ograniczeń jest opór kadłuba.

Należy przy tym zauważyć, że eksperymenty zostały przeprowadzone z zastosowaniem metod pomiarowych, opracowanych na basenie holowniczym WOiO PG. Przy chęci wprowadzania zmian w formułach przybliżonych, poprzez przeprowadzenie serii badań kształtów kadłubów współczesnych, w testach należałoby ujednoczyć sposób pomiaru z procedurami stosowanymi w laboratorium w Delft.

PODZIĘKOWANIA

Badanie przeprowadzono w ramach umowy z Centrum Badawczo-Rozwojowym Delphia Yachts w Olecku, które jest właścicielem projektu badanego jachtu.

Artykuł powstał na podstawie wystąpienia podczas IV Konferencji „Osiągnięcia Studenckich Kół Naukowych Uczelni Technicznych” – STUKNUT 2018, zorganizowanej przez Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej.

LITERATURA

1. Gerritsma J., Keuning J., 1988, *Performance of light – and heavy – displacement sailing yachts in waves*, The 2nd Tampa Bay Sailing Yacht Symposium, St. Petersburg, Russia.
2. Gerritsma J., Keuning J.A., Onnink R., 1991, *The Delft Systematic Yacht Hull (Series II) Experiments*, SNAME the 10th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis, MD, USA.
3. Gerritsma J., Keuning J.A., Onnink R., 1992, *Sailing yacht performance in calm water and in waves*, Proceedings of the 12th HISWA Symposium on Yacht Design and Construction, Delft, Netherlands.
4. Gerritsma J., Onnink R., Versluis A., 1981, *Geometry, resistance and stability of the Delft Systematic Yacht Hull Series*, Proceedings of the 7th HISWA Symposium, Amsterdam, Netherlands.
5. Grygorowicz M., Karczewski A., 2018, *Badania modelowe jachtu DELPHIA NS na wodzie spokojnej i fali regularnej – opracowanie i analiza wyników badań*, cz. 1, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
6. Huetz L., Alessandrini B., 2011, *Systematic study of the hydrodynamic forces on a sailing yacht hull using parametric design and cfd*, Proceedings of the 30th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Rotterdam, Netherlands.
7. Karczewski A., Kozak J., 2018, *Comparison of selected parametric methods for prediction of inland waterways ship hull resistance in towing tank test*, Polish Maritime Research, s. 63–67.
8. Kerwin J., 1975, *A velocity prediction program for ocean racing yachts*, Raport 78–11, Department of Ocean Engineering, MIT, MA, USA.
9. Keuning J., Binkhorst B., 1997, *Appendage resistance of a sailing yacht hull*, Proceedings of the 13th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis, MD, USA.
10. Keuning J., Katgert M., 2008, *A bare hull resistance prediction method derived from the results of the delft systematic yacht hull series extended to higher speeds*, INNOVSAIL, Lorient, France.
11. Keuning J., Sonnenberg U., 1998, *Approximation of the hydrodynamic forces on a sailing yacht based on the Delft Systematic Yacht Hull Series*, Proceedings of the International HISWA Symposium on Yacht Design and Construction, Amsterdam, Netherlands.
12. Kijewski J., 2017, *Delphia zapowiada nowe jachty*, <https://www.jachting.com>.
13. Larsson L., Eliasson R., Orych M., 2014, *Podstawy projektowania jachtów*, Alma-Press, Gdynia.
14. Michalski J.P., 2007, *Metody przydatne do wspomaganego komputerem projektowania wstępnego statków śródlądowych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
15. PN-EN ISO 12217-2:2017, *Małe statki – Ocena stateczności i pływerności oraz podział na kategorie*–Część 2: Jednostki żaglowe o długości kadłuba większej lub równej 6 m, PKN, Warszawa.
16. Zborowski A., 1972, *Opór okrętu*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.

VERIFICATION OF THE THEORETICAL METHODS FOR THE PREDICTION OF RESISTANCE OF SAILING YACHTS BASED ON THE TOWING TANK TEST

Summary

The revision is based on the verification of approximate methods of the prediction of the total resistance of the bare hull developed in the results of a systematic study of a series sailboat hulls from 1973 to 2010 known as The Delft Systematic Yacht Hull Series (DSYHS). Demonstrations were obtained based on approximate formulas (Delft method), numerical calculations (CFD) and the towing tank test for a selected sailing yacht with a modern hull shape along with a discussion of results.

Keywords: yacht, hull resistance, approximate methods, regression, CFD, towing tank test.