

PORÓWNANIE KOMPUTEROWYCH METOD OBLICZANIA OPORU JEDNOSTKI ŻAGLOWEJ Z METODĄ DOŚWIADCZALNĄ

Przedmiotem rozważań niniejszego artykułu było porównanie trzech metod uzyskania krzywej oporu jednostki żaglowej typu Nefryt. W tym celu zamodelowano kadłub Nefryta w programie Delftship oraz RhinoCeros i uzyskano krzywą oporu dla wyznaczonego wcześniej przedziału prędkości. Następnie przeprowadzono badania na jednostce rzeczywistej, aby możliwe było porównanie rezultatów otrzymanych z opisanych poniżej procesów. Wyniki przedstawiono w formie tabelarycznej (wartości oporu kadłuba przy danej prędkości) oraz w formie wykresu (zależność oporu od prędkości jednostki).

Słowa kluczowe: opór, porównanie, Delftship, RhinoCeros, metoda Holtrupa.

WSTĘP

Prognozowanie oporu kadłuba jest jednym z ważniejszych elementów, decydujących o osiąгах oraz ekonomiczności jednostki. Szczególne znaczenie ma ono w odniesieniu do jachtów żaglowych, które siłę oporu pokonują głównie napędem żaglowym.

Jednym ze sposobów uzyskania wartości całkowitego oporu jednostki jest zastosowanie przybliżonych metod określania oporu. Zazwyczaj metody te zostają opracowane na podstawie wyników badań modelowych ściśle określonej serii kształtów kadłuba. Uzyskane w ten sposób dane przedstawia się w postaci zbioru odpowiednich wykresów lub wyrażań analitycznych.

Drugim wariantem jest przeprowadzanie badań modelowych na zaprojektowanym wcześniej kształcie. Jest to jednak metoda czasochłonna, technicznie skomplikowana i bardzo kosztowna.

Wraz z postępowaniem techniki coraz większą rolę w prognozowaniu oporu kadłuba zaczęły odgrywać specjalistyczne programy komputerowe, które jako algorytmy obliczeniowe wykorzystują przybliżone metody obliczeniowe oporu. W przeciwieństwie do badań modelowych w łatwy sposób pozwalają one na zmianę kształtu projektowanej jednostki, aż do momentu uzyskania satysfakcjonujących użytkownika rezultatów.

Tutaj jednak nasuwa się pytanie: czy uzyskane w ten sposób wyniki są porównywalne do tych otrzymanych w badaniach modelowych?

1. PROGNOZOWANIE OPORU DLA JEDNOSTEK ŻAGLOWYCH

Szacowanie oporu jednostki żaglowej różni się nieco od prognozowania oporu jednostek nieżaglowych. Na tę różnicę wpływ ma zarówno budowa kadłuba (kil, brak wstawki cylindrycznej, omasztowanie wraz z olinowaniem), jak i specyficzne zachowanie się jednostki podczas żeglugi.

W momencie, gdy kadłub przechyla się w wyniku działania aerodynamicznej siły bocznej pochodzącej od żagli, powstają dwie składowe siły oporu. Opór indukowany generowany jest głównie przez kil i ster oraz opór przechyłu. Na skutek przechyłu zmieniają się w pewnym stopniu wszystkie składowe oporu.

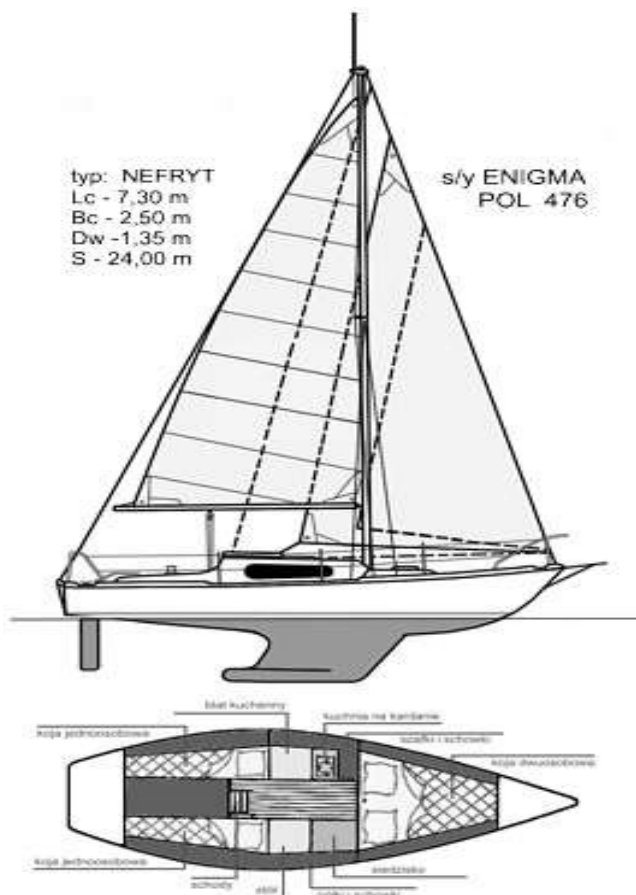
Najistotniejsze z nich to opór tarcia, związany ze zmianą powierzchni zwilżonej kadłuba, opór związany z falami wytwarzanymi przez kadłub oraz opór fal wytwarzanych przez kil.

2. MODEL BADAWCZY

Jako model badawczy wybrano jednostkę typu Nefryt (rys. 1). Jest to mały jacht, który charakteryzuje się dużą dzielnością morską. Jednostka została wybudowana w 1971 roku w Stoczni Jachtowej im. Josepha Conrada w Gdańsku. Jej projektantami są Waław Liskiewicz oraz Edward Rejewski. Kadłub wykonano z laminatu poliestrowo-szklanego. Jacht posiada stalową płetwę balastową. Jest wykorzystywany do celów szkoleniowych.

Korzystając z linii teoretycznych jachtu, **kadłub zamodelowano w dwóch programach komputerowych (Delftship, RhinoCeros) w celu uzyskania krzywej oporu przy zadanych prędkościach.** Następnie obliczono wartości oporu całkowitego wybraną metodą analityczną oraz przeprowadzono badania oporowe na obiekcie rzeczywistym.

Wyniki otrzymane za pomocą wyżej wymienionych metod porównano między sobą w celu zweryfikowania różnic w wartościach oporu całkowitego w zależności od użytej metody.

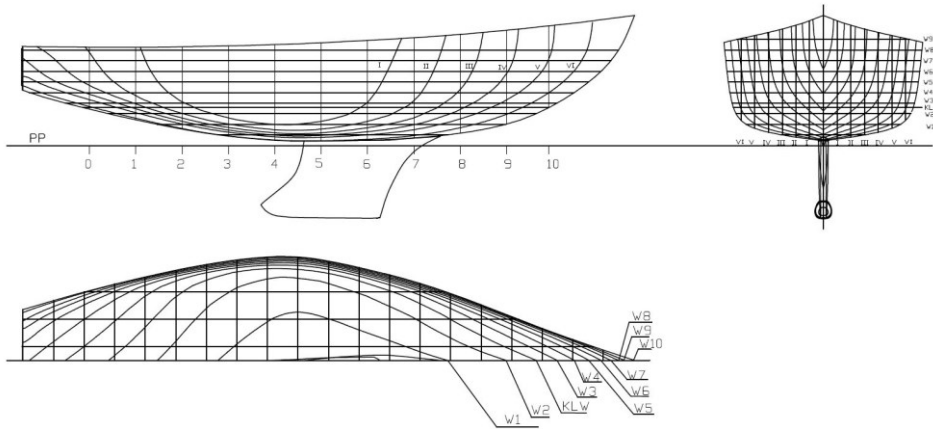


Rys. 1. Jednostka typu Nefryt

Źródło: <http://www.enigma.rusajczyk.com/> (z dnia: 23.06.2017).

3. OBLICZENIA OPOROWE PRZEPROWADZONE ZA POMOCĄ PROGRAMU DELFTSHIP

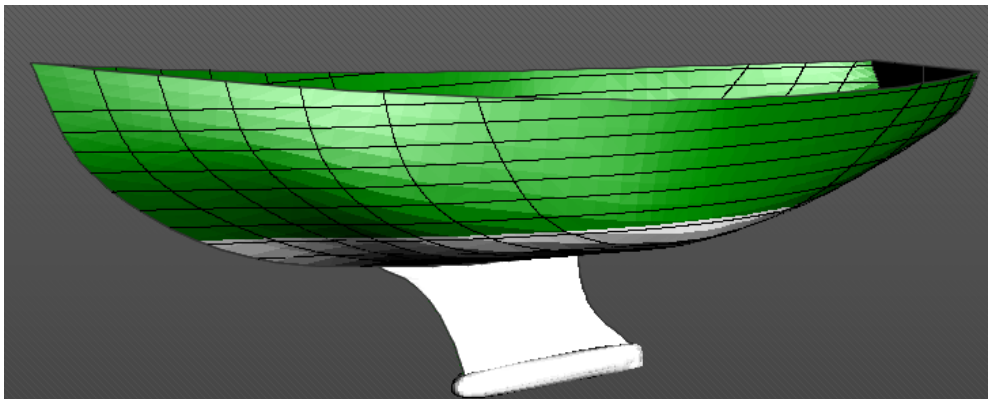
Kadłub jednostki typu Nefryt modelowany był przy użyciu podkładki z linii teoretycznych. Linie teoretyczne ze względu na błędy występujące przy procesie skanowania (linie bazowe pochylone względem oryginalnego położenia) przerysowano w programie BricsCad, a następnie przerobiono na format zgodny z wymaganiami programu Delftship (JPG) (rys. 2).



Rys. 2. Linie teoretyczne

Źródło: opracowanie własne.

Po zamodelowaniu kadłuba należało wywołać moduł obliczeniowy (rys. 3). Program Delftship oferuje zarówno **obliczenia oporowe, jak i hydrostatyczne**. Najczęściej występującym błędem, który wpływa na poprawność obliczeń, jest przesunięta współrzędna y punktów położonych w płaszczyźnie symetrii (PS). W momencie wystąpienia komunikatu o błędach należy upewnić się, czy siatka nie jest przzerwana bądź czy współrzędne y punktów położonych w PS mają wartość 0.



Rys. 3. Gotowy model

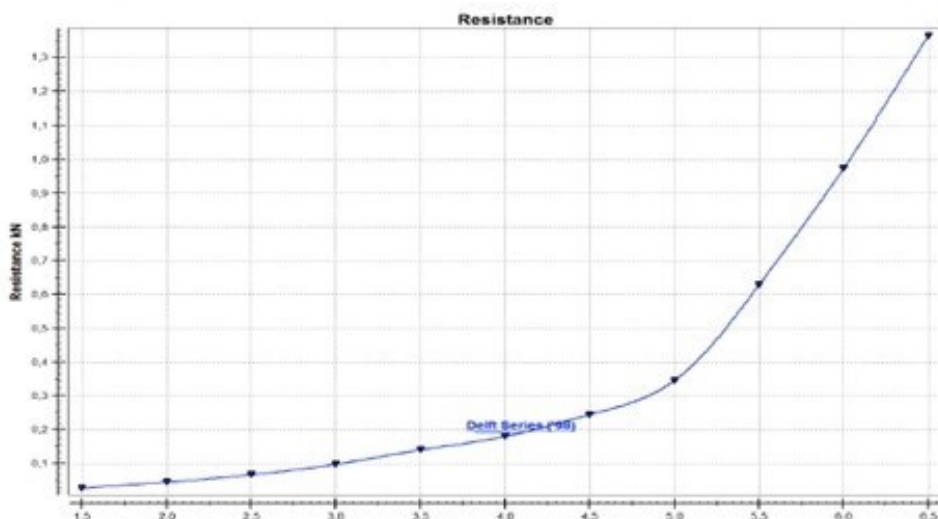
Źródło: opracowanie własne.

Krzywą oporu jachtu uzyskuje się, wchodząc w zakładkę *Calculations and extensions* i wybierając opcję *Resistance calculations*. Program zażąda podania temperatury wody, prędkości startowej, końcowej oraz kroku, z jaką prędkość będzie się zmieniała. Po uzupełnieniu wszystkich zmiennych i po uruchomieniu opcji

Report na ekranie w formacie pdf ukaże się krzywa oporu wraz z wartościami takimi jak liczba Froude'a (F_n) oraz opór rzeczywisty dla poszczególnych prędkości (rys. 4).

Delft Series ('98).

Resistance according to Delft Series ('98)								
V	v	F_n	R_f	R_r	R_{total}	P_e		
1.50	0.772	0.105	0.0258	0.0000	0.0258	0.020		
2.00	1.029	0.140	0.0435	0.0000	0.0435	0.045		
2.50	1.286	0.175	0.0653	0.0000	0.0653	0.084		
3.00	1.543	0.210	0.0911	0.0052	0.0963	0.149		
3.50	1.801	0.244	0.1208	0.0185	0.1393	0.251		
4.00	2.058	0.279	0.1543	0.0250	0.1792	0.369		
4.50	2.315	0.314	0.1914	0.0526	0.2440	0.565		
5.00	2.572	0.349	0.2322	0.1125	0.3447	0.887		
5.50	2.829	0.384	0.2765	0.3512	0.6277	1.776		
6.00	3.087	0.419	0.3244	0.6490	0.9734	3.005		



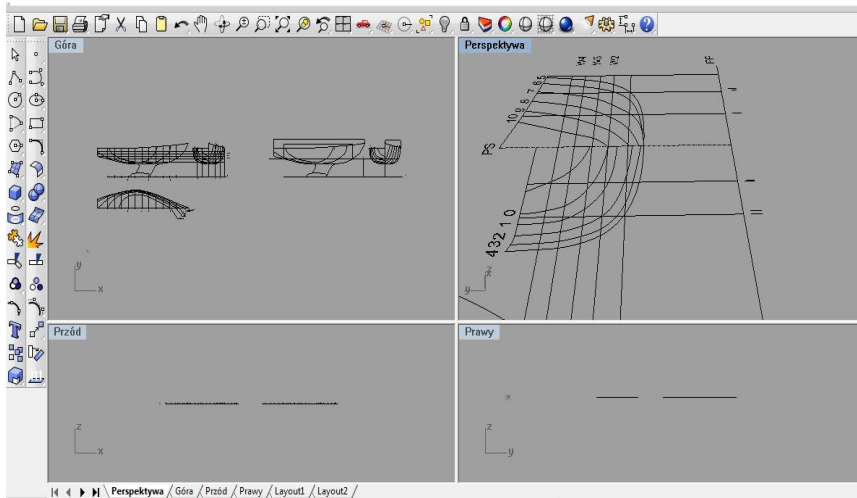
Rys. 4. Krzywa oporu

Źródło: opracowanie własne.

Analizując wyniki, można zauważyć, iż opór tarcia ma jedynie 3% udziału w oporze całkowitym. Pozostałą część oporu stanowi opór resztowy (opór falowy wraz z ciśnieniowym oporem lepkości). W miarę zwiększania prędkości opór całkowity rośnie. Przy prędkości ok. 5 węzłów następuje gwałtowny wzrost oporu, uzależniony od liczby F_n . Przy przekroczeniu bowiem pewnej granicznej jej wartości opór resztowy gwałtownie wzrasta. Największy opór występuje przy prędkości 6 węzłów i wynosi on 0,9734 kN. Znajomość przebiegu krzywej oporu w eksploatacji jednostki jest bardzo ważnym elementem ze względu na możliwość odczytania maksymalnej prędkości, przy której opór gwałtownie wzrasta.

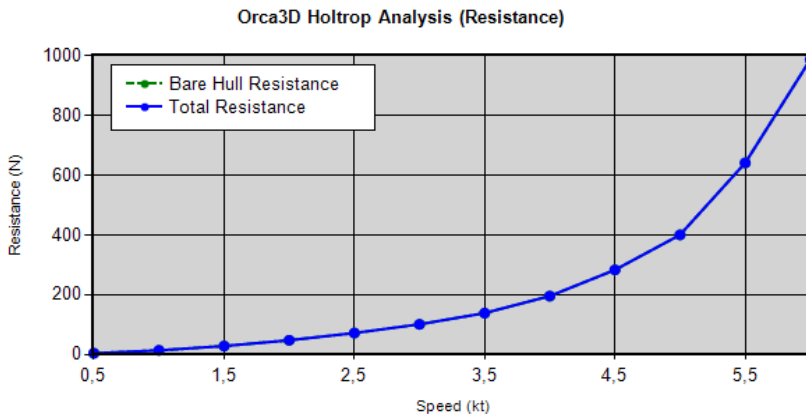
4. OBLICZENIA OPOROWE PRZEPROWADZONE ZA POMOCĄ PROGRAMU RHINOCEROS ORCA 3D

Przygotowane wcześniej linie teoretyczne w formacie dwg zostały zaimportowane do programu RhinoCeros jako płaski rysunek 2D. W tym przypadku w przeciwieństwie do programu Delftship zaimportowane krzywe po odpowiedniej modyfikacji posłużą jako tworzące powierzchnię kadłuba (rys. 5).



Rys. 5. Linie teoretyczne w programie RhinoCeros

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6. Krzywa oporu

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane wyniki oporu podane są w newtonach (N). Największa wartość uzyskana przy 6 węzłach wynosi 0,987 kN. Opór rośnie wraz ze wzrostem prędkości.

Po dokładnym sprawdzeniu płynności powierzchni, wzajemnych ich styczności oraz głównych wymiarów badanej jednostki można przystąpić do obliczeń (tab. 1).

Tabela 1

Obliczenia oporowe

Speed [kn]	F_n [-]	C_f (x 1000)[-]	C_r (x 1000)[-]	R_{total} (N)
0,500	0,035	4,516	2,371	3,8
1,000	0,070	3,916	2,056	13,4
1,500	0,105	3,619	1,901	28,0
2,000	0,140	3,428	1,802	47,4
2,500	0,175	3,290	1,735	71,5
3,000	0,210	3,184	1,722	100,7
3,500	0,245	3,098	1,853	138,2
4,000	0,280	3,026	2,374	195,2
4,500	0,315	2,965	3,304	282,9
5,000	0,350	2,912	4,359	400,2
5,500	0,385	2,865	6,949	640,9
6,000	0,420	2,823	10,048	986,8

5. BADANIA OPOROWE NA JEDNOSTCE RZECZYWISTEJ

Celem przeprowadzonych badań było uzyskanie wartości oporu całkowitego jednostki rzeczywistej typu Nefryt oraz porównanie otrzymanych wielkości z:

- oporem całkowitym uzyskanym z programu Delftship;
- oporem całkowitym uzyskanym z programy RhinoCeros Orca3d.

W tym zamyśle przeprowadzono **95 pomiarów wartości oporu przy 11 różnych prędkościach jednostki**. Otrzymane wyniki uśredniono, a następnie porównano z wynikami uzyskanymi z poprzednich metod.

5.1. Opis badań

Badania przeprowadzono na Martwej Wiśle w miejscowości Błotnik. Jednostka typu Nefryt została podczepiona na hol do jednostki motorowej, której zadaniem było holowanie jachtu przy założonych prędkościach. Zadaniem osoby znajdującej się na jachcie było odczytywanie prędkości na GPS, sterowanie jednostką oraz informowanie pomiarowca na jednostce holującej o możliwości odczytywania wartości oporu na siłomierzu.

5.2. Sprzęt użyty do badań

Opór mierzono z użyciem siłomierza Axis FB100k z czujnikiem zewnętrznym. Odczytywane wielkości podano w newtonach (N). Zakres pomiarowy siłomierza wynosił 100 kN. Szybkość pomiarów urządzenia równa była 10 pomiarów na sekundę. Duża czułość urządzenia powodowała kłopoty w odczytaniu wartości oporu całkowitego jednostki.

Wielkości odczytywane były dla prędkości od 1,5–6 węzłów z krokiem co 0,5 węzła. Ze względu na konieczność wyeliminowania czynnika wiatru pomiary rejestrowano dla jednostki holowanej pod wiatr i z wiatrem.

Badania przeprowadzono przy użyciu GPS GARMIN (system nawigacji morskiej GPS 72 z systemem WAAS pozwala określać pozycję z dokładnością do 3 metrów).

Urządzenie znajdowało się na jednostce holowanej i służyło do odczytywania prędkości.

5.3. Trudności napotkane w czasie badań

W przypadku przeprowadzania badań oporowych na basenie modelowym holowanie jednostki nawet przy prędkościach rzędu 0,5 węzła jest możliwe. Inaczej wygląda to, gdy pomiary przeprowadzane są w warunkach naturalnych.

W dniu badań na akwenu wiatr osiągał prędkość 3 w skali Beauforta, co przy holowaniu z wiatrem uniemożliwiało pomiar oporu jednostki w zakresie prędkości od 0,5–2 węzła. Dla każdej z wyznaczonych prędkości wykonano po 5 pomiarów z wiatrem i pod wiatr. Następnie obliczono średnią arytmetyczną.

Kolejnym problemem była zbyt duża czułość urządzenia pomiarowego. Przy konieczności ręcznego spisywania wyników pomiaru wartości oporu zmieniały się tak szybko, że rozrzut między zarejestrowanymi wielkościami przy danej prędkości był dość duży.

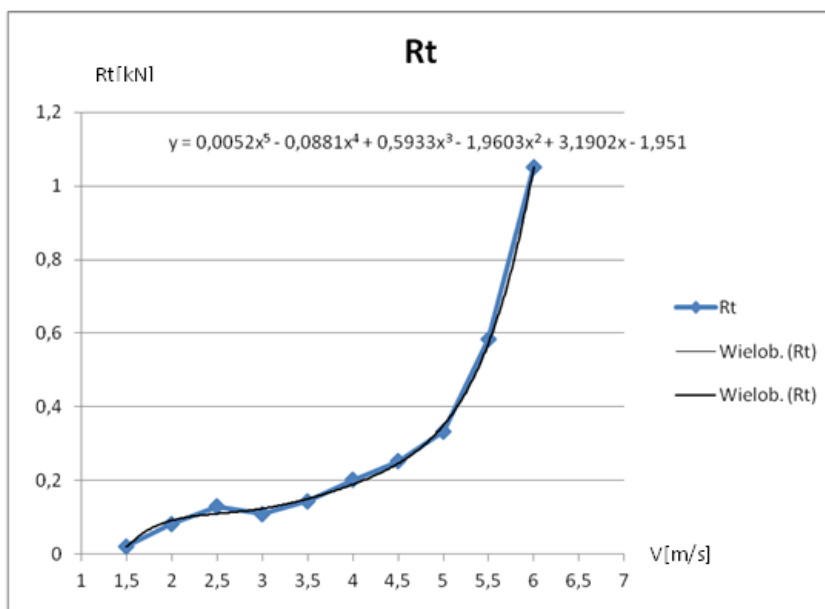
5.4. Wyniki badań

Pomiary notowano na wcześniej przygotowanym protokole z prób oporowych. Wyniki zostały przedstawione w formie tabelarycznej (tab. 2). Otrzymane wyniki poddano analizie i porównano z wartościami z poprzednich metod.

Tabela 2

Wyniki badań

V [kn]	Opór [kN]
1,5	0,021
2	0,0822
2,5	0,1286
3	0,1089
3,5	0,1441
4	0,2006
4,5	0,2514
5	0,3331
5,5	0,5833
6	1,0499



Rys. 7. Krzywa oporu uzyskana z badań na jednostce

Źródło: opracowanie własne.

Analizując wyniki, krzywą należało aproksymować ze względu na gwałtowny wzrost oporu przy prędkości 2,5 węzła. Mogło to być spowodowane błędnym odczytaniem wyników na siłomierzu bądź warunkami atmosferycznymi panującymi podczas badań. Wyniki uzyskane podczas próby uśredniono i przedstawiono w formie zarówno tabelarycznej, jak i w formie wykresu.

PODSUMOWANIE

Metody obliczania oporu jachtu zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3

Porównanie metod obliczania oporu jachtu

V [kN]	Opór próba [kN]	Opór Delftship [kN]	Błąd bezwzględny [kN]	Błąd względny [%]
1,5	0,0210	0,0258	0,0048	23
2	0,0822	0,0435	0,0387	47
2,5	0,1286	0,0653	0,0633	49
3	0,1089	0,0963	0,0126	12
3,5	0,1441	0,1392	0,0049	3
4	0,2006	0,1792	0,0214	11
4,5	0,2514	0,244	0,0074	3
5	0,3331	0,3447	0,0116	3
5,5	0,5833	0,6277	0,0444	8
6	1,0499	0,9734	0,0765	7
V [kN]	Opór Próba [kN]	Opór Rhino [kN]	Błąd bezwzględny [kN]	Błąd względny [%]
1,5	0,021	0,0280	0,007	33
2	0,0822	0,0474	0,0348	42
2,5	0,1286	0,0715	0,0571	44
3	0,1089	0,1007	0,0082	8
3,5	0,1441	0,1382	0,0059	4
4	0,2006	0,1952	0,0054	3
4,5	0,2514	0,2829	0,0315	13
5	0,3331	0,4002	0,0671	20
5,5	0,5833	0,6409	0,0576	10
6	1,0499	0,9868	0,0631	6

Porównując proces prowadzący do uzyskania wartości oporu całkowitego oraz krzywej oporu można stwierdzić, że:

- modelowanie kadłuba w programie RhinoCeros jest znacznie prostsze niż w programie Delftship. Powoduje to możliwość importowania oraz manipulowania krzywymi, tworzącymi linie teoretyczne tak, aby po odpowiednim rozsunięciu tworzyły one szkielet kadłuba;
- obliczenia w obu programach odbywają się w podobny sposób. Po stworzeniu geometrii definiuje się zanurzenie i wybiera, czy program ma importować dane z modelu, czy ma obliczać na podstawie wprowadzonych przez użytkownika danych;

- wyniki uzyskane z zastosowanych metod porównywane były do wartości oporu całkowitego, otrzymanych z badań na jednostce rzeczywistej;
- mimo że wszystkie zastosowane wyżej metody służą do obliczania oporu, wykorzystują one różne algorytmy, które mogą powodować różnice w wynikach;
- największy błąd względny zawiera się w przedziale prędkości od 1,5–2,5 węzła. Przyczyna tego może wynikać z braku eliminacji czynnika wiatru przy tych prędkościach (pomiar oporu z wiatrem nie był możliwy).

LITERATURA

1. *Delftship User Manual*, Delftship BV, The Netherlands, 2006–2007.
2. Dudziak J., *Teoria okrętu*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1988.
3. Larsson L., Eliasson R.E., *Principles of Yacht Design*, Adlard Coles Nautical, London 2000.
4. Zborowski A., *Opór statków wypornościowych*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1980.

Źródła internetowe

5. <http://www.enigma.rusajczyk.com> (dostęp: 23.06.2017).
6. <http://www.whynomath.org/node/americascup/secondary/bulbstream.html> (dostęp: 23.06.2017).

SHIP RESISTANCE – THEORETICAL CALCULATIONS VS. TESTS

Summary

The purpose of this paper was comparison of three methods use to calculate resistance of Nefryt yacht. In that purpose shape of yacht was created in two computer programs: Delftship and in RhinoCeros, then resistance calculations for set speed range were made. Finally to compare results from all used methods tests on yacht were carried out. Results were presents as table and graph (resistance and speed reliance).

Keywords: *resistance, compare, Delftship, RhinoCeros, Holtrop method.*