

# Rewizja przybliżonej metody szacowania oporu całkowitego kadłuba płynącego w przechyle

Revision of a approximate method of the prediction the bare hull resistance under heel

ARTUR KARCZEWSKI  
KATARZYNA MALINOWSKA  
HANNA PRUSZKO\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.1.7>

Na tle innych obiektów pływających jacht żaglowy wyróżnia się m.in. tym, że choć jest zaprojektowany jako pojazd poruszający się w pozycji wyprostowanej, to jednak znaczną część czasu żegluje w przechyle. Dlatego tak ważne jest poznanie zachodzących wtedy zjawisk, zwłaszcza związanych z oporem hydrodynamicznym. W artykule zaprezentowano porównanie oparte na weryfikacji wybranej, przybliżonej metody oszacowania zmian oporu całkowitego gołego kadłuba w wyniku jego przechylania się, polegającej na sprawdzeniu wykonanym metodą numeryczną (CFD) i eksperymentalną (przez badania modelowe). Obliczenia uproszczone oparto na metodach opracowanych w ramach serii Delft (The Delft Systematic Yacht Hull Series, DSYHS). W artykule przedstawiono wyniki oszacowań dla wybranego jachtu żaglowego.

**SŁOWA KLUCZOWE:** jacht, opór kadłuba, metody przybliżone, regresja, CFD, badania modelowe

*Unlike other floating structures yachts sail in heel most of their life, however, resistance in design process is estimated in upright condition. Thus, it is crucial to investigate into phenomena related to change of hull resistance due to heel. This article presents assessment of influence of yacht's heel on bare hull resistance using approximate method. Results were compared to towing tank experiments and numerical computation (CFD). Calculations were performed using formulae developed based on The Delft Systematic Yacht Hull Series. Article presents results of analysis for specific sailing yacht.*

**KEYWORDS:** yacht, hull resistance, approximate methods, regression, Computational Fluid Dynamic (CFD), towing tank experiments

Obserwując zmiany zachodzące w dzisiejszym jachtingu, dotyczące kształtu kadłuba oraz spodziewanych osiągnięć, nasuwa się pytanie, czy badania prowadzone w ramach serii Delft nad hydrodynamiką jachtów ża-

glowych są nadal aktualne. Od lat 70. ub.w. w ramach systematycznych badań wzbogacano wiedzę w zakresie prognozowania oporu jachtów. Począwszy od oporu na wodzie spokojnej, przez opór na wodzie zafalowanej, a kończąc na zagadnieniach związanych z żeglowaniem w przechyle. Przez lata badacze zaangażowani w przedsięwzięcie przedstawiali w kolejnych publikacjach coraz bardziej udoskonalone formuły, mające wspomóc projektantów w predykcji oporu jachtu i jego zachowania się podczas żeglugi. Ostatnie znaczące publikacje pojawiły się w 2010 r. [1] i dotyczyły wpływu przechyłu na opór gołego kadłuba.

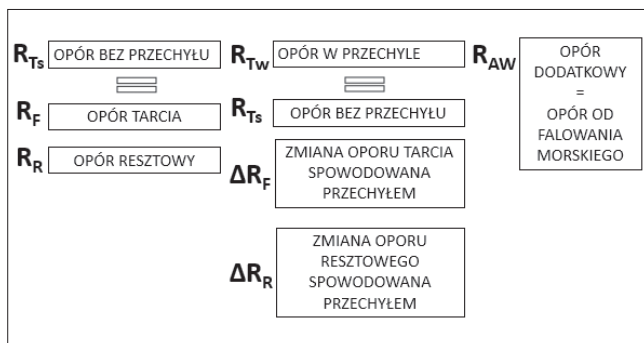
Mimo zaprzestania prac nad rozwojem serii wyniki badań weszły na stałe do kanonu podstaw projektowania jachtów [2]. Rozwój jachtingu także nie zwolnił – nadal poszukiwane są nowe rozwiązania w dziedzinie kształtu kadłuba, jego geometrii i osiągnięć. Równocześnie w zakresie hydromechaniki okrętu nastąpił gwałtowny rozwój cyfrowych technik numerycznych CFD (*computational fluid dynamic*) – zarówno w warstwie sprzętowej, jak i programowej. Jednakże czas potrzebny do obliczenia pojedynczej symulacji CFD wciąż jest zbyt długi, aby jej użyć do szybkich oszacowań w procesie wstępnego projektowania. Podobnie jest z badaniami modelowymi. Dzięki zastosowaniu frezarek numerycznych i druku 3D znacząco skrócono czas wykonania modelu basenowego i częściowo wyeliminowano potrzebę zaangażowania wykwalifikowanego personelu. Nadal jednak są to eksperymenty drogie, wymagające specjalnego oprzyrządowania, a przez to – ograniczone do prób na kształcie finalnym. Pożądane są zatem metody obliczania oporu oparte na prostej strukturze algebraicznej, wspomagające początkowe etapy projektowania.

W artykule przedstawiono rewizję metody szacowania oporu jachtu przechylonego, zaproponowaną przez Keuninga i Katgerta w publikacji [1] z 2010 r. Wybraną metodę poddano weryfikacji przez badania na basenie numerycznym (CFD) i fizycznym, bazując na geometrii i danych współczesnego jachtu żaglowego [3]. Badania przeprowadzono na Wydziale Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej we współpracy z Centrum Badawczo-Rozwojowym Delphia Yachts w Olecku.

\* Mgr inż. Artur Karczewski (artkarcz@pg.gda.pl), mgr inż. Katarzyna Malinowska – Gdańsk University of Technology, Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology, Department of Ship Design and Subsea Robotics; mgr inż. Hanna Pruszko (hanna.pruszko1@pg.edu.pl) – Gdańsk University of Technology, Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology, Department of Ship Manufacturing Technology, Quality Systems and Materials Science

## Dekompozycja oporu gołego kadłuba

Wypracowaną dekompozycję oporu gołego kadłuba zaprezentowano na rys. 1.



Rys. 1. Dekompozycja oporu gołego kadłuba

Całkowity opór kadłuba został podzielony na trzy składowe:

- opór na wodzie spokojnej,
- opór w przechyle,
- opór od falowania morskiego.

Przyjęty podział umożliwia wyizolowanie danej grupy i rozpatrywanie jej jako osobnego przypadku w sensie hydrodynamicznym. Wyjściową wartością dla wszystkich oszacowań jest opór na wodzie spokojnej, który można wyrazić jako sumę oporu resztowego  $R_R$  ( $F_N$ ), zależnego od liczby Froude'a, i oporu tarcia  $R_F$  ( $R_N$ ), zależnego od liczby Reynoldsa:

$$R_T(F_N, R_N) = R_R(F_N) + R_F(R_N) \quad (1)$$

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

$$R_F = \frac{1}{2} \rho C_F S_W v^2 \quad (2)$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość ośrodka [ $\text{kg/m}^3$ ],  $C_F$  – bezwymiarowy współczynnik oporu tarcia ekwiwalentnej płaskiej płyty [–],  $S_W$  – powierzchnia zwilżona kadłuba [ $\text{m}^2$ ],  $v$  – prędkość jachtu [ $\text{m/s}$ ].

Łatwo zauważyć, że w przypadku zmiany powierzchni zwilżonej kadłuba, co następuje podczas żeglowania w przechyle, opór lepkości również ulega zmianie. Pozwoliło to na określenie zasady obliczania oporu całkowitego gołego kadłuba w przechyle zgodnie z regułą:

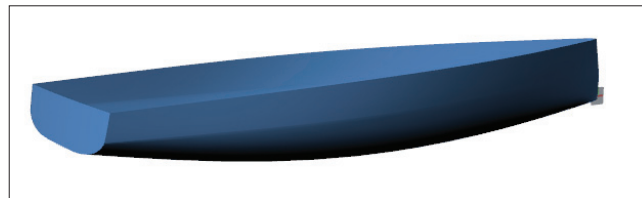
$$R_{T\varphi} = R_{F\varphi} + R_R + \Delta R_{R\varphi} \quad (3)$$

gdzie:  $R_{F\varphi}$  – opór tarcia w przechyle obliczony dla powierzchni zwilżonej kadłuba przechylonego [ $\text{N}$ ],  $R_R$  – opór resztowy gołego kadłuba wyprostowanego na wodzie spokojnej [ $\text{N}$ ],  $\Delta R_{R\varphi}$  – zmiana oporu resztowego spowodowana przechylem [ $\text{N}$ ].

Formuły dotyczące obliczania wartości oporu resztowego  $R_R$  i jego zmian w przechyle  $\Delta R_{R\varphi}$  są w omawianym przypadku rezultatem systematycznych badań kadłubów jachtów żaglowych w ramach serii Delft Systematic Yacht Hull Series – DSYHS [1].

## Obiekt badań

Obiektem badań był 43-stopowy współczesny jacht turystyczny, którego projekt jest opracowywany w stoczni Delphia Yacht z Olecka [3]. Na rys. 2 zaprezentowano model cyfrowy kadłuba jachtu, dostarczony przez producenta w ramach prowadzonych badań.

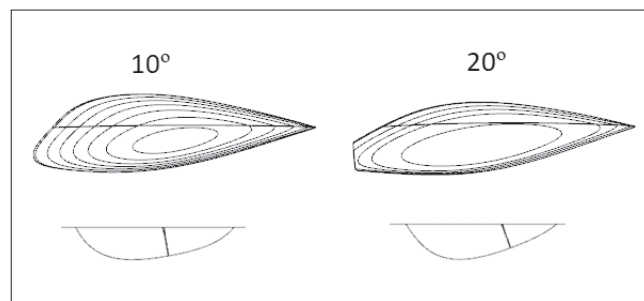


Rys. 2. Model bryły kadłuba

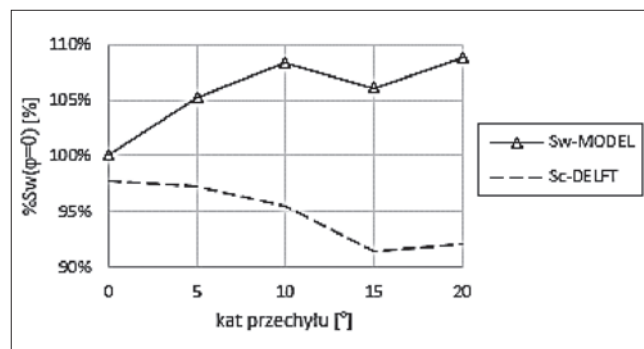
Analizując ten szkic, można zauważyć, jak bardzo w ostatnich latach zmieniła się bryła kadłuba jachtu, jeżeli za punkt odniesienia przyjmiemy się wyjściowe kształty serii Delft. Szerokość kadłuba w części rufowej jest zbliżona do szerokości na owrężu, a na kadłubie widać wyraźną linię przełamania przekrojów poprzecznych powyżej obła. Pojawiły się prawie pionowe burty i dziobnica, która w ekstremalnych przypadkach odchyła się ku rufie – tzw. odwrotny dziób.

## Zmiany w przechyle

Geometria podwodzia zmienia się w przechyle. Wodnice stają się asymetryczne, zmieniają się kształt przekrojów poprzecznych, długość linii wodnej i zanurzenie. Na rys. 3 pokazano przykładowe zmiany kształtu wodnic dla kątów przechyle 10° i 20°.



Rys. 3. Zmiany wodnic w przechyle



Rys. 4. Zmiana pola powierzchni zwilżonej kadłuba podczas przechyle

W 1998 r. Keuning i Sonnenberg w publikacji [4] zaprezentowali formułę na wielkość powierzchni zwilżonej kadłuba w przechyle ( $Sc$ -DELFT). Jej poprawność została później potwierdzona w 2010 r. w [1], z wyraźnym zaznaczeniem, że swoim zakresem obejmuje również ówczesne

kształty kadłuba. Po prześledzeniu zmian zachodzących w podwodziu jednostki modelowej podczas przechylenia i po przyjęciu jako wartości 100% powierzchni zwilżonej w pozycji wyprostowanej okazuje się, że w badanym przypadku tendencja jest odwrotna (Sw-MODEL) – zamiast spadku wraz ze wzrostem kąta przechyłu następuje wzrost otrzymywanych wartości. Zmiany ilościowe jako procent wyjściowej wartości dla powierzchni zwilżonej pokazano na rys. 4. Jest to kolejny argument wskazujący na celowość przeprowadzenia niniejszej weryfikacji.

### Program badań

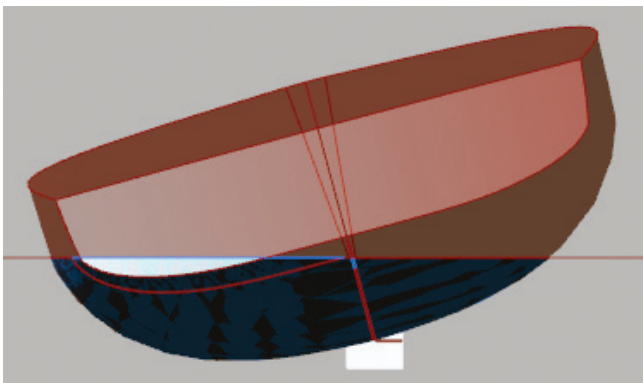
Program badań obejmował porównanie wyników otrzymanych metodą przybliżoną z rezultatami symulacji numerycznych i eksperymentu fizycznego. Analizowano przypadek żeglugi przy kącie przechyłu równym  $10^\circ$ , dla prędkości postępowej w zakresie od 4 do 9 węzłów, na wodzie spokojnej. W kolejnych punktach opisano weryfikowaną metodę uproszczoną i jej implementację obliczeniową, warunki symulacji numerycznych oraz badania modelowe.

■ **Implementacja metody przybliżonej.** W przypadku metod przybliżonych przyjęto następujący schemat działania:

- W pierwszym kroku opór całkowity gołego kadłuba obliczano metodami oznaczonymi jako Delft I i Delft II według [5], bazującymi na publikacjach [6, 7].
- Dysponując trójwymiarowym modelem kadłuba, zaadaptowanym do cyfrowego środowiska modelowania kształtów okrętowych, wymuszono przechył modelu (rys. 5) i określono dane geometryczne potrzebne do obliczenia oporu lepkości (poła powierzchni zwilżonej) i poprawki na opór resztowy, zgodnie z formułą:

$$\frac{\Delta R_{R\varphi}}{\nabla \cdot \rho \cdot g} = b_0 + b_1 \cdot \left( \frac{B_{wl}}{T_c} - \frac{B_{wl\varphi}}{T_{c\varphi}} \right) + b_2 \cdot (C_m - C_{m\varphi}) + b_3 \cdot \frac{L_{wl\varphi}}{L_{wl}} \quad (4)$$

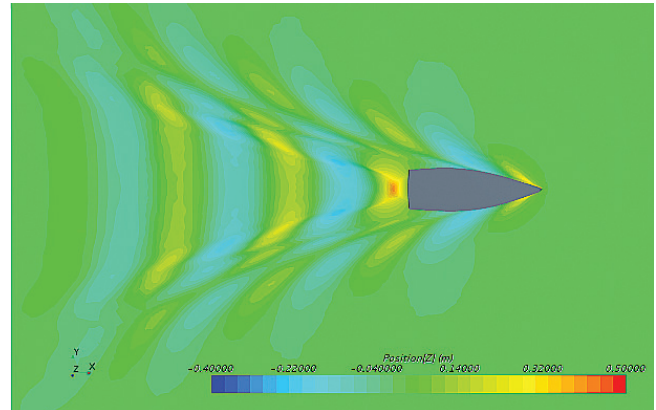
gdzie:  $b_{0..3}$  – współczynniki regresyjne zależne od wartości liczby Froude'a,  $\Delta R_{R\varphi}$  – poprawka oporu resztowego gołego kadłuba [N],  $\nabla$  – objętość wyporności [ $m^3$ ],  $\rho$  – gęstość ośrodka [ $kg/m^3$ ],  $g$  – przyspieszenie ziemskie ( $9,81 m/s^2$ ),  $L_{wl}$  – długość na linii wodnej [m],  $B_{wl}$  – szerokość na linii wodnej [m],  $T_c$  – zanurzenie kadłuba [m],  $C_m$  – współczynnik pełnotliwości owręza (dolny indeks  $\varphi$  oznacza dane dla przechyłu).



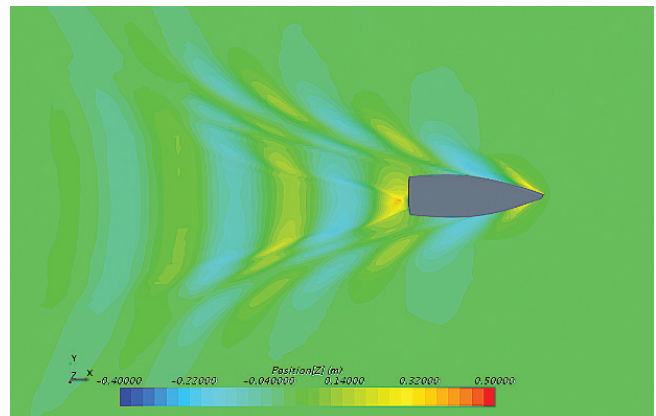
Rys. 5. Model kadłuba przechylonego – widok od rufy

■ **Symulacje numeryczne – CFD.** Do numerycznego prognozowania oporu jachtu w przechyle na wodzie spokojnej wykorzystano program STAR CCM+, w którym została zaimplementowana metoda objętości skończonych (*finite volume method*). Kod pozwolił na zasymulowanie modelu przepływu trójwymiarowego, niestacjonarnego, turbulentnego, dwufazowego.

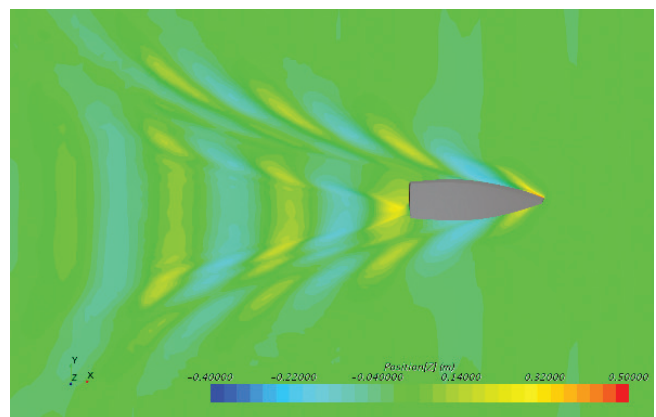
Na rys. 6–8 porównano układy falowe powstałe dla prędkości 8 węzłów rozwijanej przez jacht bez przechyłu oraz z przechylem równym  $10^\circ$  i  $20^\circ$ .



Rys. 6. Układ falowy dla prędkości  $v = 8$  węzłów



Rys. 7. Układ falowy dla prędkości  $v = 8$  węzłów i przechyłu  $10^\circ$



Rys. 8. Układ falowy dla prędkości  $v = 8$  węzłów i przechyłu  $20^\circ$

Widoczne jest stopniowe zmniejszanie się fali rufowej dla pogłębiającego się przechyłu. Prawdopodobnie wynika to ze zwężania się wodnicy w część rufowej. Można też zauważyć przesuwanie się tej części układu falowego, która powstaje za pawężą w stronę prawej burty ze względu na zwiększającą się asymetrię wodnicy.

■ **Badania modelowe.** Badaniom eksperymentalnym poddano geometrycznie podobny model jachtu, wykonany w skali 1:6,5. Badania przeprowadzono na basenie holowniczym Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej (rys. 9). Zadano stały moment przechylający  $M_p = 2,1 \text{ Nm}$ . Zakres badań obejmował pomiar oporu, wynurzenia oraz zmian kątów przegłębienia i przechyłu w warunkach wody spokojnej, w zakresie prędkości holowania  $v_M = 0,8 \div 1,8 \text{ m/s}$  ( $v_S = 2,1 \div 4,6 \text{ m/s}$  dla jednostki rzeczywistej). Model holowano przy pomocy specjalnego uchwytu, umożliwiającego swobodne ruchy pionowe i kątowe w osi poprzecznej i wzdłużnej. Uchwyt związany z modelem poprzez czujnik siły w miejscu wzdłużnego położenia środka wyporu modelu. Opór całkowity modelu  $R_{TM}$  został przeliczony na skalę statku metodą Froude'a.



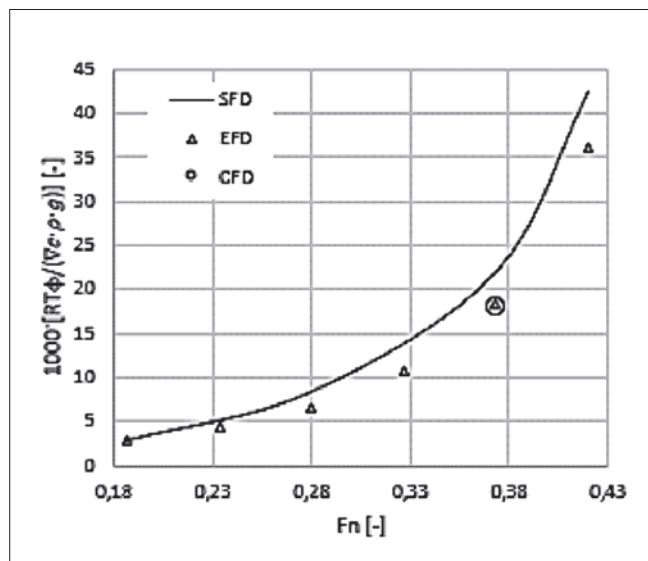
Rys. 9. Model podwieszony na wózku holowniczym

## Wyniki

Na potrzeby prezentacji wyników przyjęto następujące oznaczenia w zależności od zastosowanej metody:

- wyniki metody przybliżonej – SFD,
- wyniki symulacji numerycznych – CFD,
- rezultaty testów na basenie modelowym – EFD.

Wyniki wszystkich oszacowań przedstawiono na wykresie zbiorczym (rys. 10).



Rys. 10. Wykres zbiorczy uzyskanych wyników

Na podstawie wartości otrzymanych dla wybranego zakresu prędkości obliczono błąd względny, wyrażony w procentach, odniesiony do wartości oszacowania oporu całkowitego według metod przybliżonej SFD, którą poddano rewizji. Wyniki zamieszczono w tabelicy.

TABLICA. Porównanie oszacowań przeprowadzonych według różnych metod

$v$ , kn	$F_N$	SFD $1000 \cdot \frac{RT\phi}{v_c \cdot \rho \cdot g}$	SFD vs. EFD	SFD vs. CFD	EFD vs. CFD
4,0	0,19	2,8	-0,2%	-	-
6,0	0,28	8,3	-21,0%	-	-
8,0	0,37	22,0	-16,7%	-18,1%	-1,8%
9,0	0,42	42,6	-15,2%	-	-

## Podsumowanie

Przy niewielkiej prędkości różnica pomiędzy metodą przybliżoną SFD a badaniami modelowymi EFD jest w zakresie błędu pomiarowego, natomiast wraz ze wzrostem prędkości rośnie do kilkunastu, a nawet do 21%, przy czym wszystkie wartości dla SFD są większe niż w eksperymencie. Podobną tendencję przedstawiono w artykule Heutza [8], według którego przeszacowanie rosło również wraz z prędkością.

Ekspertyzy numeryczny i fizyczny dały bardzo zbliżone rezultaty, różniące się zaledwie o ok. 2%. Taka zbieżność potwierdza poprawność metody numerycznej CFD. Symulacje zostały jednak przeprowadzone wyłącznie dla jednej prędkości, przyjętej jako prędkość projektowa. W dalszych pracach należałoby wykonać obliczenia dla całego zakresu prędkości.

Podsumowując, można stwierdzić, że wystąpiły pewne rozbieżności pomiędzy wartościami oporu kadłuba przechylonego, otrzymanymi na bazie formuły Delft, a wartościami eksperymentalnymi dla współczesnego jachtu. Należy przy tym zauważyć, że w literaturze przedmiotu różnice rzędu ok. 20% uznaje się za dość wysoką zbieżność [5]. Próbki był jednak tylko jeden przykładowy kształt, więc dalsze prace należałoby przeprowadzić dla całej grupy kształtów bliźniaczych, zgodnie z metodą przyjętą w DSYHS.

**Prace badawcze zostały zrealizowane na bazie modelu udostępnionego przez Centrum Badawczo-Rozwojowe Delphia Yachts w Oleku.**

## LITERATURA

1. Keuning J., Kargert M. "The influence of heel on the bare hull resistance of a sailing yacht". Delft University of Technology, Ship Hydromechanics Laboratory, Delft, 2010.
2. Larsson L., Eliasson R., Orych M. "Podstawy projektowania jachtów". Gdynia: Alma-Press, 2014.
3. Kijewski J. „Delphia zapowiada nowe jachty”. <https://www.jachting.com> (dostęp: 15.10.2017 r.).
4. Keuning J., Sonnenberg U. "Approximation of the Hydrodynamic Forces on a Sailing Yacht based on the Delft Systematic Yacht Hull Series". *International HISWA Symposium on Yacht Design and Construction*, Amsterdam, 1998.
5. Bentley, User Manual MAXSURF Resistance, Bentley System, 2016.
6. Gerritsma J. i in. "The Delft Systematic Yacht Hull Series II experiments". *10th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis, 1991.
7. Gerritsma J. i in. "Sailing Yacht Performance in Calm Water and in Waves". *12th International Symposium on Yacht Design and Construction*, Delft, 1992.
8. Huetz L., Alessandrini B. "Systematic study of the hydrodynamic forces on a sailing yacht hull using parametric design and CFD". *30th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Rotterdam, 2011.