

Nr 98/2017, 148–156
ISSN 1644-1818
e-ISSN 2451-2486

BADANIE WPŁYWU NAPOWIETRZANIA KADŁUBA ŁODZI Z NAPĘDEM ELEKTRYCZNYM NA ZUŻYCIĘ ENERGII

RESEARCHING THE IMPACT OF ELECTRIC BOAT HULL AERATION ENERGY CONSUMPTION

Andrzej Łebkowski

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81–87, 81-581 Gdynia, Wydział Elektryczny,
Katedra Automatyki Okrętowej, e-mail: a.lebkowski@we.am.gdynia.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań systemu napowietrzania kadłuba dla łodzi z napędem elektrycznym. Zaprezentowano przykłady jednostek morskich, w których zastosowano technologie, służące do minimalizacji zużycia energii oraz emisji CO₂. Omówiono także aktualnie znane sposoby redukcji zużycia paliwa dla jednostek pływających.

Słowa kluczowe: napowietrzanie kadłuba, redukcja zużycia energii, statek elektryczny, napęd elektryczny.

Abstract: The paper presents the results of research on the hull aeration system for an electric powered boat. The examples of marine vessels with such technology is used for minimization of energy use and CO₂ emissions are shown. The currently known methods for lowering the fuel consumption in watercraft are discussed.

Keywords: hull aeration (air bubble lubricated hull, air cavity), reduce energy consumption, electric ship, electric powertrain.

1. WSTĘP

Transport morski obsługuje około 75% obrotu towarowego na świecie. Budowane jednostki wykorzystywane do przewozu towarów są coraz większe i rozwijają większe prędkości. Jednocześnie dąży się do ograniczenia zużycia paliwa, a tym samym do redukcji emisji spalin generowanych do atmosfery przez układy napędowe. Równoległe do komercyjnego przewozu towarów i ludzi istnieje spory rynek pływających jednostek rekreacyjnych, dla których ograniczenie zużycia paliwa i emisji szkodliwych gazów nie jest bez znaczenia.

Część aktualnie projektowanych jednostek pływających, wykorzystywanych w transporcie i rekreacji, budowanych jest z myślą o zastosowaniu napędu elektrycznego. Z tego względu zbadanie i wdrożenie każdej metody związanej z ograniczeniem zużycia energii elektrycznej ma istotne znaczenie.

Jedna z potencjalnych technologii, która może być zastosowana zarówno w transporcie komercyjnym, jak i rekreacyjnym, opiera się na idei, którą w 1897 roku zaproponował Andrew J. Culbertson (patent US608757A) [Culbertson 1897]. Idea ta związana jest z wtłaczaniem pod kadłub jednostki pływającej – powietrza. Pomimo że pomysł powstał wiele lat temu, z uwagi na trudności technologiczne, nie był on masowo stosowany w okrętownictwie.

Metody związane z wtłaczaniem powietrza pod kadłub statku można podzielić na cztery kategorie:

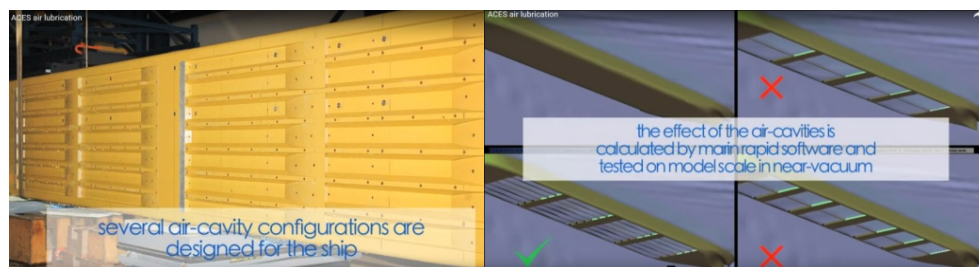
- z zastosowaniem pęcherzyków powietrza (*ang. Bubble Drag Reduction (BDR)*);
- z użyciem warstwy powietrza przy powierzchni kadłuba (*ang. Air Layer Drag Reduction (ALDR)*);
- związana z występowaniem zjawiska wędrującej kawitacji pęcherzykowej (*ang. Partial Cavity Drag Reduction (PCDR)*);
- wielofalowa kawitacja (*ang. Multi Wave Partial Cavity Drag Reduction (MWPCDR)*) [Ceccio i Mäkiharju 2012].

Przedstawione metody są odwzorowaniem wielu konstrukcji chronionych prawem patentowym: 1931 – Fleetwings Inc. *Boat hull and method of reducing the water friction thereupon* US1894256A [Fleetwings Inc., 1931]; 1938 – Charles Sartori, *High-speed boat* US2231296A [Sartori 1938]; 1965 – Exxon Research Engineering Co., *Frictional resistance reduction using non-newtonian fluid* US3289623A [Exxon Research Engineering Co. 1965]; 1967 – Marius Georges, Henri Girodin, *Bubble hulls* US3518956A [Georges i Girodin 1967]; 1992 – Glen L. Bobst, *Air bubble lubricated boat hull* US5456201 [Bobst 1992]; 2010 – Mitsubishi Heavy Industries Ltd., *Air bubble recovery device of ship* US8424475B2 [Mitsubishi Heavy Industries Ltd. 2010] i innych.

Technologia bazująca na tej idei polega na dostarczeniu powietrza pod kadłub statku. Dzięki czemu zmniejszają się opory hydrodynamiczne, co przekłada się na zmniejszone zużycie paliwa i redukcję emisji CO₂ do atmosfery.

W 2007 roku duńska firma DK Group zaprojektowała i wdrożyła system do napowietrzania dna statku w celu zmniejszenia oporów hydrodynamicznych. DK Group, prowadząc badania nad rozwojem tej technologii pod nazwą *Air Cavity Systems*, uzyskała przy sprzyjających warunkach pogodowych (spokojne morze) zmniejszone zużycie paliwa na poziomie 10–15%. Technologia napowietrzania kadłuba w ujęciu firmy DK Group polega na wpompowaniu pod kadłub statku, za pomocą specjalnych sprężarek, powietrza do zaprojektowanych w dnie komór. Pęcherzyki powietrza, przesuwając się wzdłuż dna kadłuba statku, tworzą dywan powietrzny, który stanowi kontakt dla części powierzchni kadłuba statku z ośrodkiem wodnym. W związku z faktem, iż opory tarcia z powietrzem są znacznie mniejsze niż z wodą, efektem jest zmniejszone zapotrzebowanie na moc potrzebną

do przemieszczania się jednostki. DK Group na podstawie prowadzonych badań zaproponowała, aby dla dużych statków zastosować około 30 komór kawitacyjnych, natomiast dla mniejszych jednostek – 8 komór [DK Group installs Air Cavity System 2012; ACES air lubrication 2011]. Kształt opracowanych komór przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Kształt komór kawitacyjnych według projektu DK GROUP
[ACES air lubrication 2011]

Fig. 1. The shape of cavitation chambers as designed by DK GROUP
[ACES air lubrication 2011]

W 2010 roku Mitsubishi Heavy Industries Ltd. zaproponowała zastosowanie systemu napowietrzania kadłuba statku „Mitsubishi Air Lubrication Systems” (MALS) [Mizokami i in. 2010; Kawabuchi i in. 2011; Kawakita, Sato i Okimoto 2015]. Dzięki zastosowanej technologii, uzyskano sumaryczną oszczędność paliwa rzędu 13% (20% zmniejszenie oporów hydrodynamicznych – 7% ilość paliwa wymagana do zasilania systemu).

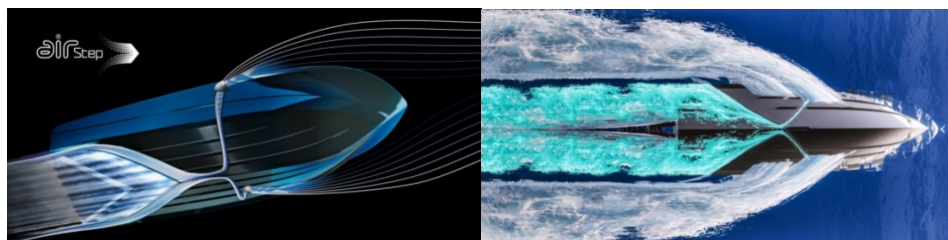


Rys. 2. System napowietrzania MALS [Mizokami i in. 2010; Kawabuchi i in. 2011;
Kawakita, Sato i Okimoto 2015]

Fig. 2. MALS system [Mizokami i in. 2010; Kawabuchi i in. 2011;
Kawakita, Sato i Okimoto 2015]

Metodę napowietrzania kadłuba zastosowano także dla jachtów i łodzi turystycznych. W 2012 roku firma Beneteau opracowała system napowietrzania kadłuba statku dla jachtów motorowych *Air Step Hull* [AIR STEP 2016]. Dzięki

opracowanemu rozwiązaniu jednostka porusza się szybciej, jednocześnie zapewniając większy komfort, zwrotność oraz mniejsze zużycie paliwa do 30%.



Rys. 3. System napowietrzania Air Step Hull [AIR STEP 2016]

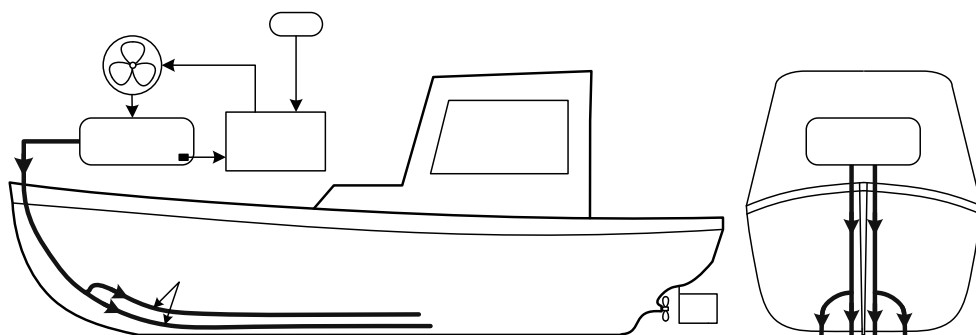
Fig. 3. Air Step Hull aeration system [AIR STEP 2016]

W 2010 roku firma NYK LOGISTICS & Megacarrier zapowiedziała budowę do 2030 roku superekologicznej jednostki, która będzie w stanie zmniejszyć o 70% zużycie paliwa oraz emisję CO₂. Firma przewiduje m.in. zastosowanie technologii odnawialnych źródeł energii w postaci paneli solarnych o powierzchni 31 000 m², którymi ma być pokryty statek w części nawodnej. Panele będą zdolne do wyprodukowania mocy szczytowej o wartości 9 MW. Na pokładzie statku ma być zainstalowanych także osiem wysuwanych żagli o powierzchni 4000 m², które będą miały możliwość optymalnego ustawienia się do wiatru. Do produkcji energii elektrycznej planuje się też zastosowanie ogniw paliwowych wodorowych i LNG [NIPPON TUSEN KAISMA 2016]. Założeniem projektu jest minimalizacja zużycia energii przez urządzenia pokładowe oraz stosowanie urządzeń z maksymalnie możliwą sprawnością. Sieć elektroenergetyczna ma być połączona z wykorzystaniem nadprzewodzących chłodzonych kabli, oferujących bezstratne przesyłanie energii o dużo większej wartości niż za pośrednictwem przewodów miedzianych. Do napędu jednostki mają być wykorzystane supernowoczesne wysokosprawne pędniki elektryczne: dwufunkcyjne wysuwane pędniki dziobowe, pracujące przy małych prędkościach jednostki jako stery strumieniowe oraz podczas żeglugi jako napęd dziobowy, a także przeciwbieżne, tunelowo-gondolowe rufowe. Masa statku ma być zredukowana poprzez zastosowanie specjalnej konstrukcji i lekkich materiałów kompozytowych, z których ma być wykonane poszycie statku, zapewniające minimalne opory hydrodynamiczne, które dodatkowo zostaną zmniejszone poprzez zastosowanie systemu napowietrzania dna (zmniejszenie oporów o ok. 10%). W osiągnięciu tak doskonałych parametrów pomagają także zintegrowany system nawigacyjny, mający na celu wyznaczenie optymalnej trasy przejścia z określeniem optymalnej prędkości statku. Statek ma również mieć możliwość regulacji przegłębienia (trymu) w celu optymalizacji oporów hydrodynamicznych kadłuba. Oprócz systemów ograniczających zużycie energii statek umożliwi modułowe odłączanie części sekcji kadłuba w celu szybszego rozładunku i załadunku [NIPPON TUSEN KAISMA 2016].

2. OPIS PROWADZONYCH BADAŃ

Celem prowadzonych badań było poszukiwanie odpowiedzi na pytanie, czy system napowietrzania kadłuba jednostki pływającej z napędem elektrycznym jest w stanie zmniejszyć zużycie energii niezbędnej do jej przemieszczania.

W celu udzielenia odpowiedzi na powyższe pytanie do łodzi o kształcie kadłuba zbliżonym do kształtów kadłuba rzeczywistego statku (wyoblenia), o wyporności ok. 4000 kg, zamontowano wzdłuż stępki oraz niewielkiej odległości od niej – przewody z tworzywa sztucznego z otworami (rys. 4 i 5). Przewody podłączono do zbiornika sprężarki powietrza, do którego podłączony został również czujnik ciśnienia przekazujący informacje do układu sterującego pracą elektrycznego silnika napędowego sprężarki. Do układu sterującego podłączono także sygnał z GPS, informujący o aktualnej prędkości łodzi.



Rys. 4. Struktura systemu napowietrzania kadłuba łodzi z napędem elektrycznym

Fig. 4. The structure of hull aeration system for an electric boat

Badany system napowietrzania działa na podstawie zasady utrzymywania stałego ciśnienia w zbiorniku z powietrzem, na poziomie zapewniającym stabilny wylot powietrza z otworów na całej długości przewodów zanurzonych w wodzie. Podczas badań nie analizowano wpływu zmian ciśnienia w zbiorniku powietrza na zmiany oporu hydrodynamicznego.

W trakcie badań łódź poruszała się po wodach Zatoki Gdańskiej z ustaloną prędkością, dla której z wykorzystaniem rejestratora parametrów ruchu pojazdu z napędem elektrycznym dokonywano zapisu parametrów [Łebkowski 2017]. Następnie przemieszczając się po tej samej trasie i przy tych samych warunkach hydrometeorologicznych, włączono system napowietrzania kadłuba, rejestrując parametry ruchu łodzi.



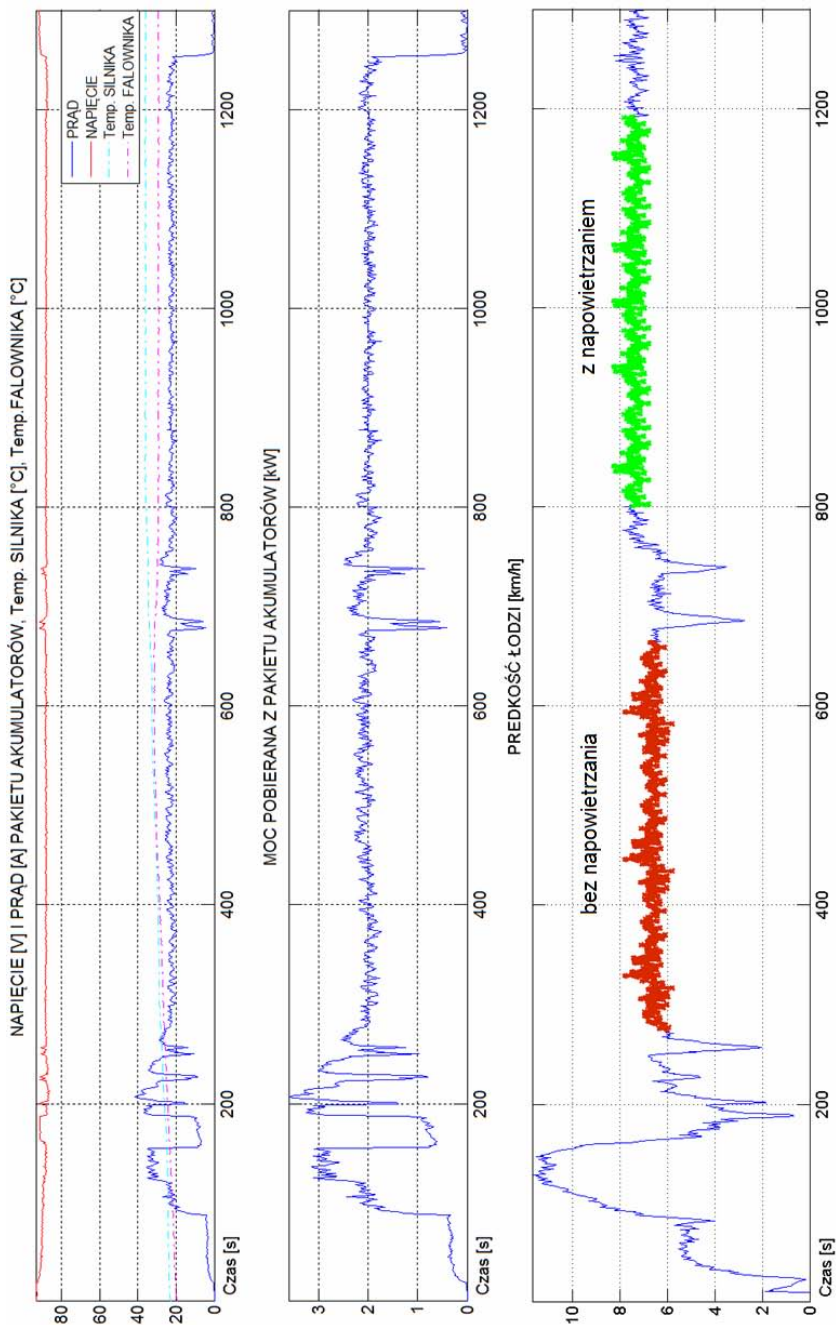
Rys. 5. Łódź elektryczna z zamontowanym systemem napowietrzania kadłuba

Fig. 5. The electric boat with the aeration system fitted

W skład opracowanego w Akademii Morskiej w Gdyni elektrycznego układu napędowego łodzi wchodzi: silnik synchroniczny o mocy 15 kW; falownik; pakiet ośmiu akumulatorów trakcyjnych Trojan T-1275 o pojemności 150 Ah. Opracowany układ napędowy umożliwia eksploatację łodzi: z prędkością około 5 km/h, co zapewnia zasięg około 150 km, z prędkością 6 km/h – zasięg około 75 km, z prędkością 8 km/h – zasięg około 70 km, z prędkością 10 km/h – zasięg około 65 km, z prędkością 12 km/h – zasięg około 60 km.

3. WYNIKI PROWADZONYCH BADAŃ

Prędkość maksymalna użytej do badań łodzi z napędem elektrycznym wynosi 12 km/h. W trakcie badań ustalono prędkość na poziomie 6 km/h, rejestrując napięcie i prąd pobierane z pakietu akumulatorów, a także prędkość z systemu GPS. Testy prowadzone były na odcinku czterech kabli (740 m). Średnia prędkość, jaką uzyskano na odcinku testowym, wyniosła 6,66 km/h, przy średniej wartości zużycia energii na przemieszczanie się łodzi na poziomie 2,04 kWh. Po włączeniu systemu napowietrzania kadłuba łodzi uzyskano średnią prędkość na poziomie 7,38 km/h oraz średnią wartość energii pobranej z akumulatorów na przemieszczanie się łodzi na poziomie 2,00 kWh. Podczas prowadzonej próby otrzymano wzrost prędkości jednostki o 9,86%, przy zachowaniu praktycznie takiej samej wartości mocy układu napędowego. Wyniki prób powtarzano kilkakrotnie, otrzymując redukcję oporów hydrodynamicznych kadłuba na poziomie 9÷10%.



Rys. 6. Przebieg zarejestrowanych wielkości podczas testów systemu napowietrzania kadłuba łodzi z napędem elektrycznym
Fig. 6. The plot of parameters recorded during the tests of an electric boat hull aeration system

Dla badanej łodzi redukcja oporów hydrodynamicznych na poziomie 10% przekłada się na zwiększenie zasięgu z: 150 km na 165 km przy prędkości 5 km/h; 75 km na 82,5 km przy prędkości 6 km/h; 70 km na 77 km przy prędkości 8 km/h; 65 km na 71,5 km przy prędkości 10 km/h oraz 60 km na 66 km przy prędkości 12 km/h.

Wyniki badań systemu napowietrzania kadłuba łodzi z napędem elektrycznym przedstawiono na rysunku 6.

Podczas badań nie analizowano, o ile i czy w ogóle generowane pęcherzyki powietrza mają wpływ na emisję dźwięków oraz w jaki sposób zjawisko to wpływa na środowisko naturalne i przebywające w nim organizmy.

Niestety, zaprezentowana metoda nie jest pozbawiona wad, które wiążą się głównie z koniecznością zużycia energii na wytworzenie ciśnienia niezbędnego na wtłoczenie i utrzymywanie powietrza pod kadłubem statku.

4. PODSUMOWANIE

Zmieniające się przepisy, związane z wprowadzaniem coraz to ostrzejszych norm dotyczących emisji CO₂ przez układy napędowe statków, wymuszają konieczność poszukiwania nowych technologii związanych z redukcją zużycia energii. Jedną z takich technologii jest system napowietrzania kadłuba statku, którego różne odmiany, koncepcje i realizacje można odnaleźć w literaturze przedmiotu podanej poniżej. Badania na świecie potwierdziły, że dzięki zastosowanej technologii można uzyskać redukcję oporów hydrodynamicznych nawet do 20%, a także, iż jest to metoda przyjazna dla środowiska naturalnego.

Prowadzone badania systemu napowietrzania kadłuba łodzi z napędem elektrycznym także potwierdziły skuteczność zastosowania tej metody. Uzyskano zmniejszenie oporów hydrodynamicznych na poziomie 10%, co przełożyło się na zwiększenie zasięgu, zwiększenie prędkości, zmniejszenie zapotrzebowania na zużycie energii związanej z przemieszczaniem się jednostki. Różnica pomiędzy uzyskanym wynikiem redukcji zużycia energii o 10% z podawaną w literaturze przedmiotu wartością 20% wynika z innego sposobu montażu rurek, a także z mniejszej intensywności napowietrzania kadłuba.

Znane są też inne technologie związane z możliwością konwersji jednostek morskich w bardziej przyjazne dla środowiska naturalnego (mniejsze zużycia paliwa). Należą do nich: odnawialne źródła energii – jako źródła energii napędowej, takie jak: panele słoneczne, żagle, ogniwa paliwowe; materiały nadprzewodzące, które można zastosować w okrętowych sieciach elektroenergetycznych oraz elektrycznych silnikach napędowych; systemy wtryskiwania wody lub podawania pary wodnej do powietrza dolotowego; układy napędowe zasilane LNG; agregaty prądotwórczych zasilane LNG; płuczki gazów spalinowych zapewniające redukcję emisji SO_x; odpowiednie konstrukcje pędników okrętowych oraz

wyprofilowane śruby napędowe (-4%); dysze Korta (-5%); farby kadłubowe zmniejszające tarcie hydrodynamiczne (-3–8%); zastosowanie recyrkulacji spalin wpływającej na obniżenie emisji NO_x; optymalizacja układu chłodzenia silnika głównego (-1,5%); eliminacja systemów balastowych (redukcja możliwości przenoszenia mikroorganizmów w inne rejony świata); zastosowanie kompozytowych materiałów do budowy konstrukcji statków [Kaushik 2016].

LITERATURA

- ACES air lubrication, 2011, www.youtube.com/watch?v=kDC11_kHxqE.
- AIR STEP[®], 2016, www.beneteau.com.
- Bobst, G.L., 1992, *Air Bubble Lubricated Boat Hull*, patent US5456201.
- Ceccio, S.L., Mäkiharju, S.A., 2012, *Air Lubrication Drag reduction on Great Lakes Ships*, University of Michigan, Department of Naval Architecture and Marine Engineering.
- Culbertson, A.J., 1897, *Pneumatic Prg Pelling Means For Vessels*, patent US608757A.
- DK Group installs Air Cavity System, 2012, www.maritimedanmark.dk/?Id=14067, 04.
- Exxon Research Engineering Co., 1965, *Frictional Resistance Reduction Using Non-Newtonian Fluid*, patent US3289623A.
- Fleetwings Inc., 1931, *Boat Hull and Method of Reducing the Water Friction Thereupon*, patent US1894256A.
- Georges, M., Girodin, H., 1967, *Bubble Hulls*, patent US3518956A.
- Gorbachev, Y., Amromin, E., 2012, *Ship Drag Reduction by Hull Ventilation From Laval to Near Future: challenges and successes*, ATMA.
- Kaushik, M., 2016, *14 Technologies to Make the Ultimate Green Ship*, Marine Insight.
- Kawabuchi, M., Kawakita, Ch., Mizokami, S., Higasa, S., Kodan, Y., Takano, S., 2011, *CFD Predictions of Bubbly Flow Around an Energy-Saving Ship with Mitsubishi Air Lubrication System*, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, vol. 48, no. 1.
- Kawakita, Ch., Sato, S., Okimoto, T., 2015, *Application of Simulation Technology to Mitsubishi Air Lubrication System*, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, vol. 52, no. 1.
- Kumagai, I., Takahashi, Y., Murai, Y., *Power-Saving Device for Air Bubble Generation Using a Hydrofoil to Reduce Ship Drag: Theory, Experiments, and Application to Ships*, Ocean Engineering, vol. 95, s.183–194.
- Łebkowski, A., 2017, *Electric Vehicle Data Recorder*, „Przegląd Elektrotechniczny”, R. 93, nr 2.
- Mitsubishi Heavy Industries Ltd., 2010, *Air Bubble Recovery Device of Ship*, patent US8424475B2.
- Mizokami, S., Kawakita, Ch., Kodan, Y., Takano, S., Higasa, S., Shigenaga, R., 2010, *Experimental Study of Air Lubrication Method and Verification of Effects on Actual Hull by Means of Sea Trial*, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, vol. 47, no. 3.
- NIPPON TUSEN KAISMA, 2016, www.nyk.com.
- Sartori, Ch., 1938, *High-Speed Boat*, patent US2231296A.
- Thill, C., Toxopeus, S., van Walree, F., 2005, *Project Energy-Saving Air-Lubricated Ships (PELS)*, 2nd International Symposium on Seawater Drag Reduction, Busan, Korea, May 23–26.