

## ANALIZA CECH HYDRO-AERODYNAMICZNYCH BEZZAŁOGOWEGO POJAZDU NAWODNO-POWIETRZNEGO Z WYKORZYSTANIEM EFEKTU PRZYPOWIERZCHNIOWEGO

MIROSLAW K. GERIGK

*Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska, Gdańsk*  
*e-mail: mger@pg.edu.pl*

W artykule przedstawiono problematykę badań dotyczących opracowania demonstratora technologii bezzałogowego pojazdu nawodno-powietrznego z wykorzystaniem efektu przypowierzchniowego. Opisano podstawowe problemy badawcze związane z analizą cech hydro-aerodynamicznych pojazdu. Opisano przedmiot badań, bezzałogowy pojazd nawodno-powietrzny typu USV-UAV-WIG. Opisano metodę badań. Przeprowadzono wstępną analizę osiągnięć i zachowania się pojazdu USV-UAV-WIG w warunkach zbliżonych do rzeczywistych z wykorzystaniem metody numerycznej mechaniki płynów CFD. Podano wyniki badań. W końcowej części artykułu podano kierunki dalszych badań i wnioski końcowe z dotychczasowych badań.

*Słowa kluczowe:* bezzałogowy pojazd nawodno-powietrzny typu USV-UAV-WIG, charakterystyki hydro-aerodynamiczne pojazdu USV-UAV-WIG, mechanika ruchu pojazdu USV-UAV-WIG, dynamika pojazdu USV-UAV-WIG

### 1. Wprowadzenie

Celem badań jest opracowanie demonstratora technologii bezzałogowej platformy nawodno-powietrznej typu USV-UAV-WIG (ang. *Unmanned Surface Vehicle-Unmanned Aerial Vehicle-Wing in Ground Vehicle*) wykorzystującej efekt przypowierzchniowy wspierającej działania morskich oddziałów wojska o poziomie gotowości technologicznej PGT VI.

Do celów szczegółowych proponowanych badań można zaliczyć:

- opracowanie demonstratora nowego wzoru sprzętu, który zwiększałby potencjał obronny i bezpieczeństwo państwa,
- aktywizację polskich ośrodków badawczych oraz pracowników nauki do badań i kontynuacji prac ukierunkowanych na praktyczne wykorzystanie wyników projektu, w celu przeprowadzenia badań rozwojowych zmierzających do powstania prototypu pojazdu (PGT IX).

Do podstawowych zadań stawianych platformie można zaliczyć:

- realizację zadań nad obszarami wodnymi i nad lądem w pobliżu linii brzegowej,
- przenoszenie ładunku lub/i wyposażenia pokładowego o zadanej masie,
- możliwość startu z wody i wodowania,
- zdolność do wykonywania lotu na minimalnej wysokości z wykorzystaniem efektu przypowierzchniowego.

Istnieje powiązanie celów badań z celami innych programów badawczych i projektów, które były przedmiotem analizy przez Konsorcjum Politechniki Gdańskiej (PG), Wojskowej Akademii Technicznej (WAT) i Instytutu Technicznego Wojsk Technicznych (ITWL) w ramach przygotowań do projektu. Można wymienić następujące programy i projekty, które związane są z tematyką prowadzonych przez Konsorcjum PG-WAT-ITWL badań [1]:

- Agencja DARPA (na zlecenie US Navy) – ekranoplany do szybkiego transportu oceanicznego oddziałów wojskowych i sprzętu, prowadzenia działań ratowniczo-poszukiwawczych, desantowych, itp.
- Organizacja ds. Badań i Technologii NATO (RTO NATO) – „Inteligentne Systemy Autonomiczne”.
- „Priorytetowe Kierunki Badań w Resorcie Obrony Narodowej na lata 2017-2026”.

## **2. Krytyczna ocena stanu wiedzy na temat wybranych zastosowań jednostek wykorzystujących efekt przypowierzchniowy**

Statki powietrzne wykorzystujące efekt przypowierzchniowy nazywa się często ekranoplanami. Dotychczas wszystkie poważne przedsięwzięcia dotyczące ekranoplanów pozostały w fazie projektów jednostek załogowych, w większości eksperymentalnych, a jedynie nieliczne znalazły się na wyposażeniu wojsk. Nad ekranoplanami o zastosowaniu militarnym i cywilnym pracowało w ZSRR przede wszystkim biuro konstrukcyjne Aleksiejewa, w którym zaprojektowano ponad 40 różnych ekranoplanów, z czego zbudowano ponad 30 sztuk. Na wyposażenie floty przyjęto 3 ekranoplany desantowe A-90 Orłionok o masie startowej 140 ton. Prace nad ekranoplanami w ZSRR przerwano głównie z powodu rozpadu państwa i braku środków pieniężnych. Wybrane elementy wiedzy związanej z badaniami i projektowaniem ekranoplanów wojskowych ZSRR przedstawiono w literaturze [2], [3].

Według informacji prasowych, np. RIA Nowosti z 2017 r., w Rosji podjęto decyzję o wznowieniu budowy ekranoplanów wojskowych. Dotyczy to oceanicznego transportowo-pasażerskiego ekranoplanu A-050 „Czajka-2” o masie startowej 54 ton i prędkości maksymalnej 450 km/h. Ponadto, rozważa się budowę ekranoplanu A-080 „Czajka-3” o masie startowej 100 ton. Przewiduje się, że ekranoplan ten będzie uzbrojony w wyrzutnie rakiet przeciwokrętowych [1].

W sierpniu 2021 roku w prasie amerykańskiej opublikowano informację, że prace nad ekranoplanami na zlecenie US Navy ma podjąć podlegająca Pentagonowi agencja DARPA. Prace te mają koncentrować się nad ekranoplanami przeznaczonymi do szybkiego transportu oceanicznego oddziałów wojskowych i sprzętu, prowadzenia działań ratowniczo-poszukiwawczych, desantowych czy prowadzenia długich patroli w Arktyce. Prace te mają też dotyczyć ekranoplanów stanowiących mobilne bazy dla obiektów bezzałogowych [1].

Aktualnie żadna armia na świecie nie posiada na wyposażeniu „dronów” wykorzystujących efekt przypowierzchniowy. Proponowane w przedmiotowym projekcie rozwiązanie stanowi znakomitą alternatywę dla wspierania działania na obszarach morskich w odniesieniu do dotychczas stosowanych rozwiązań, takich jak m.in. transport łodziami lub poduszkowcami.

## **3. Metoda badań i problemy badawcze związane z opracowaniem bezzałogowej platformy nawodno-powietrznej wykorzystującej efekt przypowierzchniowy**

Metoda badawcza związana z opracowaniem bezzałogowej platformy nawodno-powietrznej wykorzystującej efekt przypowierzchniowy polega ogólnie na [4]-[6]:

- definicji misji i opracowaniu scenariuszy (sekwencji zdarzeń) związanych z realizacją misji platformy,
- analizie osiągnięć i dynamiki platformy,
- analizie ryzyka i bezpieczeństwa platformy dla zdefiniowanych scenariuszy misji,
- opracowaniu systemu symulacji i realizacji misji, w tym procedury sterowania platformą podczas misji w zależności od stopnia autonomiczności platformy.

Obecny etap prac związanych z opracowaniem bezzałogowej platformy nawodno-powietrznej wykorzystującej efekt przypowierzchniowy jest ukierunkowany na analizę osiągow i zachowania się platformy w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

Do zbioru podstawowych założeń związanych z opracowaniem platformy, stawianych przed platformą, można zaliczyć [1]:

- realizację zadań nad obszarami wodnymi i nad lądem w pobliżu linii brzegowej,
- przenoszenie ładunku lub/i wyposażenia pokładowego o zadanej masie,
- możliwość startu z wody i wodowania,
- zdolność do wykonywania lotu na minimalnej wysokości z wykorzystaniem efektu przypowierzchniowego,
- umożliwienie testowania nowych technologii i rozwiązań konstrukcyjnych w celu kontynuacji projektu.

Do najistotniejszych zadań badawczych związanych z opracowaniem platformy, które stanowią poważne wyzwanie dla zespołów specjalistów reprezentujących Konsorcjum, należy zaliczyć:

- opracowanie geometrii (kształtu kadłuba) platformy w zakresie elementów aerodynamicznych, w tym powierzchni nośnych, które zapewnią platformie odpowiednie właściwości lotne, aerodynamiczne,
- opracowanie geometrii platformy w zakresie elementów hydrodynamicznych zanurzonej części kadłuba, które decydują o nadaniu platformie odpowiednich właściwości morskich w czasie jej startu z wody i przy lądowaniu na wodzie,
- dobór materiałów konstrukcyjnych, systemów pokładowych (napędowego, zasilania w energię, sensorycznego, sterowania) i wyposażenia platformy,
- oszacowanie masy i położenia środka masy platformy, dla stanów załadowania zbliżonych do rzeczywistych,
- analizę obciążeń oraz wytrzymałości konstrukcji platformy,
- analizę pływalności i stateczności platformy na powierzchni wody,
- analizę właściwości oporowo-napędowych platformy we wszystkich fazach jej ruchu, w tym analizę: oporu, mocy zapotrzebowanej i efektywnej, napędu głównego i systemu napędowego, sprawności napędowej,
- analizę właściwości hydro-aerodynamicznych platformy, z uwzględnieniem efektu przypowierzchniowego, w fazach: startu platformy z wody, podczas lotu na zadanej wysokości oraz w czasie lądowania na wodzie,
- analizę właściwości aerodynamicznych platformy, z uwzględnieniem efektu przypowierzchniowego, podczas lotu dla zmiennej trajektorii lotu (zmiana kursu),
- analizę wpływu falowania (stanu morza) na efekt przypowierzchniowy i zachowanie się platformy,
- analizę dynamiki platformy oraz opracowanie i kalibrację systemu sterowania,
- budowę demonstratora platformy,
- badania demonstratora platformy w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

Przy opracowywaniu demonstratora platformy zostaną zastosowane różne metody badawcze i projektowe oraz innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne, w tym między innymi [1]:

- symulacja komputerowa na etapie analizy właściwości aerodynamicznych i hydrodynamicznych platformy,
- symulacja komputerowa podczas analizy konstrukcji i wytrzymałości platformy,
- badania hydrodynamiczne, aerodynamiczne i konstrukcyjno-wytrzymałościowe na modelu fizycznym (skalowanym) platformy – badania stanowiskowe,

- opracowanie, budowa i badania stanowiskowe systemów pokładowych, w tym systemu napędowego i systemu sterowania,
- budowa demonstratora technologii,
- integracja systemów pokładowych demonstratora platformy,
- badania demonstratora platformy w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

Na podstawie analizy przeprowadzonej przez specjalistów Konsorcjum planowane badania podzielono na następujące etapy [1]:

- wykonanie projektu aero-hydrodynamicznego i konstrukcyjno-wytrzymałościowego bezzałogowej platformy nawodno-powietrznej wykorzystującej efekt przypowierzchniowy,
- wykonanie projektu i budowa demonstratora technologii platformy,
- badania demonstratora platformy w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

### 3.1. Projekt aero-hydrodynamiczny i konstrukcyjno-wytrzymałościowy platformy

Badania zostaną przeprowadzone z zastosowaniem metod analitycznych, numerycznych i doświadczalnych oraz doświadczeń Konsorcjum wynikających z analizy własności hydroaerodynamicznych platform nawodno-powietrznych oraz rozwiązań układów awionicznych systemów bezzałogowych. Wstępne badania numeryczne, przeprowadzone przez kadre Konsorcjum, wykazały znaczący wpływ efektu przypowierzchniowego na charakterystyki konstrukcji zwanych ekranoplanami. Istotnym aspektem jest fakt posiadania przez Konsorcjum odpowiedniej infrastruktury badawczej i wiedzy „Know-how” w zakresie badań doświadczalnych, wieloletniego doświadczenia w zakresie badań, projektowania i budowy, w tym [1]:

- bezzałogowych obiektów pionowego startu i lądowania;
- pływających i latających obiektów bezzałogowych,
- manewrujących obiektów powietrznych, także z programowaną trasą lotu.

### 3.2. Wykonanie projektu i budowa demonstratora technologii platformy

Badania będą związane z budową elementów konstrukcji oraz kadłuba platformy, które zostaną przebadane w czasie stanowiskowych badań wytrzymałościowych oraz w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Równolegle będą przebiegały badania, budowa i integracja elementów systemu awionicznego i sterowania platformą. Ponadto zostaną przeprowadzone badania i próby układu napędowego demonstratora platformy. Zwieńczeniem tego etapu prac będzie budowa demonstratora platformy połączona z integracją wszystkich systemów pokładowych i wyposażenia z kadłubem platformy. Konsorcjum posiada niezbędną infrastrukturę, aparaturę badawczą oraz sprzęt niezbędne do zrealizowania celów etapu.

Badania demonstratora technologii w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Ta część prac zostanie poświęcona:

- przeprowadzeniu badań demonstratora platformy: naziemnych, w czasie startu z wody, w locie i w czasie lądowania na wodzie,
- przeprowadzeniu prognozy zachowania konstrukcji platformy w czasie ruchu,
- analizie ruchu platformy w różnych warunkach operacyjnych,
- przeprowadzeniu prognozy zachowania platformy z uwagi na warunki wewnętrzne i zewnętrzne związane z obciążeniami platformy.

Rezultatami badań będzie demonstrator technologii (PGT VI) wraz z dokumentacją z przeprowadzonych badań.

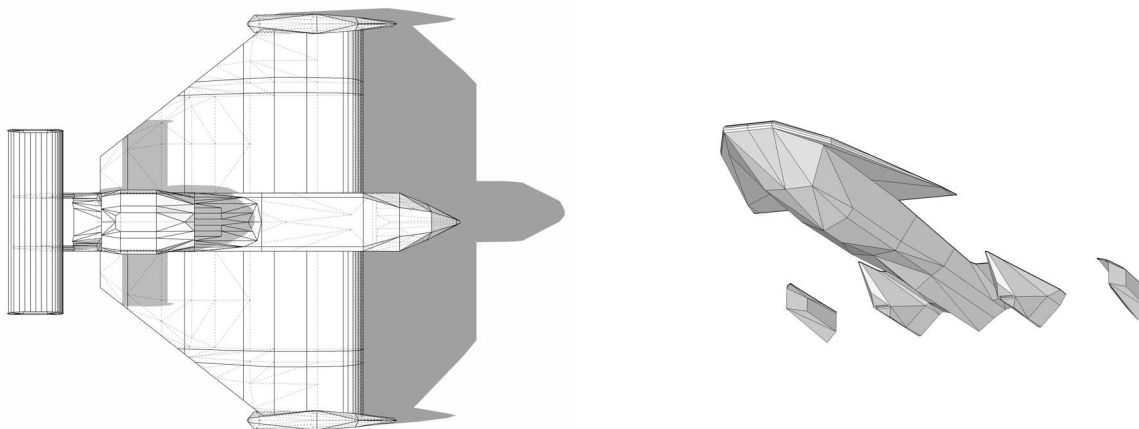
## 4. Przedmiot badań

### 4.1. Definicja kształtu platformy

W trakcie badań przygotowawczych do projektu zdecydowano się na definicję kształtu kadłuba platformy o następujących cechach:

- 1) definicja geometrii kadłuba platformy w części nadwodnej (aerodynamicznej) – została oparta na kształcie kadłuba według koncepcji Lipisch'a, płata o skosie odwrotnym, w celu zapewnienia odpowiedniego efektu przypowierzchniowego (ang. *WIG Wing in Ground Effect*), umożliwiającego powstanie poduszki powietrznej pomiędzy aerodynamicznymi płytami nośnymi a swobodną powierzchnią wody [1], [7],
- 2) definicja geometrii kadłuba w części podwodnej (hydrodynamicznej) – została oparta na kształcie kadłuba w części podwodnej według koncepcji wielokadłubowej w celu zapewnienia odpowiednich właściwości morskich w czasie startu i lądowania platformy [7], [8].

Na rysunku 1 przedstawiono wizualizacje analizowanych koncepcji kształtu kadłuba platformy USV-UAV-WIG z uwagi na kształt kadłuba aerodynamicznego według koncepcji Lipisch'a oraz kształt kadłuba hydrodynamicznego według koncepcji wielokadłubowej [7], [8].



Rys. 1. Wizualizacje wybranych i analizowanych koncepcji kształtu kadłuba platformy USV-UAV-WIG z uwagi na kształt kadłuba aerodynamicznego według koncepcji Lipisch'a oraz kształt kadłuba hydrodynamicznego według koncepcji wielokadłubowej [7], [8]

### 4.2. Przedmiot badań

Przedmiotem badań jest bezzałogowa platforma typu USV-UAV-WIG wykorzystująca efekt przypowierzchniowy. Do głównych założeń projektu platformy należy zaliczyć [1]:

- start z wody,
- lot nad powierzchnią wody na wysokości do 3 m (wykonanie misji) z wykorzystaniem efektu przypowierzchniowego,
- lądowanie na wodzie,
- prędkość maksymalna 100 km/h,
- zasięg lotu do 15 km,
- maksymalna masa 250 kg,
- ładowność 20% masy platformy.

Zapotrzebowanie na tego typu platformy wynika z potrzeb szybkiego wsparcia działań wojsk na akwenach morskich, w tym do przerzutu zaopatrzenia. Znakomitym rozwiązaniem w tym



Rys. 2. Wizualizacje wybranych koncepcji platformy typu USV-UAV-WIG [8]

aspekcie okazuje się być bezzałogowa platforma nawodno-powietrzna wykorzystująca efekt przypowierzchniowy tzw. efekt ekranu (ang. WiG – *Wing in Ground Effect*). Odpowiednie wykorzystanie tego efektu w połączeniu z modułową budową jednostki pływająco-latającej stanowi kluczowe rozwiązanie szybkiego wsparcia działań wojsk na obszarach morskich.

Pokonanie barier technologicznych i technicznych będzie skutkowało powstaniem demonstratora bezzałogowej platformy nawodno-powietrznej wykorzystującej efekt przypowierzchniowy wspierającej działania wojsk na akwenach morskich o maksymalnej masie startowej 250 kg, zasięgu 15 km oraz maksymalnej prędkości lotu 100 km/h. Integracja systemów i urządzeń na platformie i z platformą posłuży podniesieniu poziomu bezpieczeństwa państwa. Obiekt będzie poruszał się na małych wysokościach do 3 m, przez co będzie trudny do wykrycia.

## 5. Wstępna analiza cech hydro-aerodynamicznych bezzałogowej platformy nawodno-powietrznej z wykorzystaniem efektu przypowierzchniowego

Zasadnicza część badań nad opracowaniem platformy będzie dotyczyła określenia parametrów i charakterystyk platformy we wszystkich fazach jej ruchu, od startu, poprzez lot, do lądowania. W czasie startu platforma będzie się przemieszczała na swobodnej powierzchni wody do osiągnięcia prędkości ruchu odpowiadającego punktowi unoszenia, gdy siły hydrodynamiczne na zanurzonej części kadłuba platformy oraz aerodynamiczne siły nośne wygenerowane na płatach nośnych kadłuba pozwolą na pokonanie sił grawitacyjnych i innych, takich jak siły oddziaływania swobodnej powierzchni wody i falowania. Osiągnięcie tego punktu skutkuje rozpoczęciem fazy lotu platformy na wysokości do 3 m nad poziomem wody. Lądowanie platformy odbywa się na wodzie. W czasie badań zostanie określony krytyczny stan morza umożliwiający eksploatację platformy, czyli jej start, lot i lądowanie. Wstępnie założono, że będzie to stan morza 2-3<sup>o</sup>B. Rozważa się przystosowanie konstrukcji platformy do wykonywania startu wspomaganego, co umożliwi zastosowanie platformy przy wyższych stanach morza. Obecne prace dotyczą opracowania demonstratora platformy, który będzie umożliwiał poruszanie się z prędkością przelotową 100 km/h, przy masie platformy 250 kg i ładowności 20% masy platformy. Platforma będzie wyposażona w system sterowania, umożliwiający zdalne, a w fazie rozwojowej projektu autonomiczne naprowadzanie platformy na pozycję. Przewiduje się możliwość preprogramowania działań platformy w celu osiągnięcia trybu pół-autonomicznego pracy platformy na poziomie 1-2, w skali autonomiczności od 1 do 5. Badania i budowa demonstratora platformy są planowane na okres 36 miesięcy i zostaną przeprowadzone z wykorzystaniem zaawansowanych metod badawczych, projektowych i wykonawczych.

W czasie wstępnych badań nad wpływem efektu przypowierzchniowego na siły aerodynamiczne uwaga Konsorcjum była skierowana na dokładnym opisie zjawisk, w tym na [1], [7]-[9]:

- wpływie bliskości swobodnej powierzchni na siły aerodynamiczne,
- wpływ rozpiętości płata znajdującego się w pobliżu powierzchni na siły aerodynamiczne,
- wpływ cięciwy płata znajdującego się w pobliżu powierzchni,
- efekt złożony – zwiększony stosunek  $L/D$  w pobliżu powierzchni,
- warunki równowagi, stateczność poprzeczna i wzdłużna obiektu poruszającego się w pobliżu swobodnej powierzchni wody,
- wymuszenia hydro-aerodynamiczne.

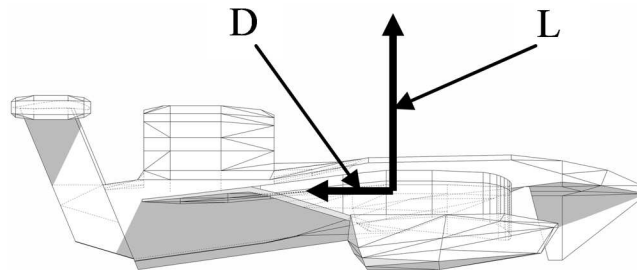
Poniżej przedstawiono wybrane problemy związane z opisem efektu przypowierzchniowego na siły aerodynamiczne.

### 5.1. Wpływ bliskości swobodnej powierzchni

Określenie „wing in ground effect” jest używane w odniesieniu do aerodynamicznych charakterystyk, jakie obiekt – rozumiany jako płat – posiada, poruszając się w pobliżu swobodnej powierzchni wody lub lądu. W czasie ruchu ciała w pobliżu swobodnej powierzchni wody występują dwa zasadnicze zjawiska [7]-[9]:

- 1) wpływ rozpiętości płata znajdującego się w pobliżu powierzchni – obniżenie oporu płata  $D$ ,
- 2) wpływ cięciwy płata znajdującego się w pobliżu powierzchni – wzrost siły nośnej  $L$ .

Stosunek  $L/D$  określa się mianem efektywności płata. Większa wartość tego stosunku oznacza większą efektywność. Można powiedzieć, że płat poruszający się w pobliżu swobodnej powierzchni wody ma większą efektywność niż płat poruszający się swobodnie w oddaleniu od tej powierzchni. Siła oporu  $D$  i siła nośna  $L$  są składowymi siłami aerodynamicznymi działającymi na płat w czasie jego ruchu nad powierzchnią. Siła oporu  $D$  działa równoległe do kierunku ruchu ciała, siła nośna  $L$  prostopadle do kierunku ruchu (rys. 3).



Rys. 3. Umowny układ sił działających na płat poruszający się w pobliżu swobodnej powierzchni wody [8]

### 5.2. Wpływ rozpiętości płata znajdującego się w pobliżu powierzchni

Opór płata składa się z dwóch zasadniczych komponentów:

- oporu tarcia,
- oporu indukowanego.

Opór tarcia jest spowodowany tarciem cząsteczek powietrza opływających płat i dlatego zależy od jego powierzchni, chropowatości tej powierzchni i liczby Reynoldsa. Opór indukowany określa się jako opór powstały na skutek generowania siły nośnej.

Obrazując ruch płata w pobliżu swobodnej powierzchni wody za pomocą obszaru podwyższonego ciśnienia powietrza pod i obszaru obniżonego ciśnienia powietrza nad płatem, widzimy, że różnica ciśnień działających na powierzchnię ciała powoduje powstanie siły nośnej  $L$ . W przypadku, gdy płat porusza się w pobliżu swobodnej powierzchni wody, wiry wierzchołkowe nie mogą rozwinąć się do takich rozmiarów jak w przypadku płata poruszającego się w obszarze

przepływu niezakłóconego. Wynika to z faktu, że w pobliżu powierzchni płat pracuje w obszarze powietrza ulegającego mniejszym zakłóceniom z uwagi na tworzenie się wirów wierzchołkowych. Opór indukowany płata poruszającego się w pobliżu swobodnej powierzchni wody jest mniejszy w stosunku do oporu płata poruszającego się w znacznej odległości od tej powierzchni. Powierzchnia efektywna płata poruszającego się w pobliżu powierzchni jest większa. Siła nośna  $L$  indukowana przez płat jest także większa.

### 5.3. Wpływ cięciwy płata znajdującego się w pobliżu powierzchni

Innym zjawiskiem, które należy rozpatrzyć, jest wpływ cięciwy płata na jego zachowanie się w pobliżu swobodnej powierzchni wody. Ogólnie uważa się, że wpływ cięciwy płata poruszającego się w pobliżu powierzchni na wartość siły nośnej  $L$  jest dominujący. Wpływ cięciwy płata znajdującego się w pobliżu powierzchni jest związany ze zjawiskiem wzrostu siły nośnej na płacie. Pod płatem formuje się obszar powietrza o podwyższonej wartości ciśnienia z uwagi na fakt, że powietrze w tym rejonie płata jest praktycznie wciskane pod płat. Zatem rośnie napór powietrza na płat od spodu. Zjawisko naporu powietrza od spodu płata nazywa się „efektem spiętrzenia” lub „efektem naporu” (ang. *ram effect*).

### 5.4. Efekt złożony – zwiększony stosunek $L/D$

Wpływ rozpiętości płata znajdującego się w pobliżu powierzchni i wpływ jego cięciwy na konfigurację płata jest taki, że należy dążyć do zwiększenia stosunku  $L/D$ , gdzie  $L$  – siła nośna,  $D$  – opór. Typowy obiekt znajduje się w równowadze, jeśli jego ciężar jest równy sile nośnej  $L$ , a napór na jego pędnikach jest równy oporowi obiektu. Dlatego stosunek  $L/D$  jest miarą wartości ciężaru, który może być przeniesiony przez odpowiadającą temu ciężarowi wartość naporu pędników. Im większy jest stosunek  $L/D$ , tym większa jest efektywność płata. Jest oczywistym, że efekt oddziaływania powierzchni w przypadku obiektów (płatów) poruszających się w pobliżu swobodnej powierzchni wody zależy od odległości pomiędzy dolną powierzchnią płata a swobodną powierzchnią wody. Ten efekt można wstępnie ocenić, stosując wykres opracowany przez Weiselberger'a w roku 1930 [7]. W rzeczywistości wpływ powierzchni na obiekt występuje zawsze. Możliwa jest ocena, kiedy ruch obiektu w pobliżu powierzchni jest efektywny, a kiedy efektywność takiego ruchu jest zbyt niska.

### 5.5. Warunki równowagi, stateczność poprzeczna i wzdłużna obiektu poruszającego się w pobliżu swobodnej powierzchni wody

Problem stateczności poprzecznej, a szczególnie stateczności podłużnej, należy do najtrudniejszych problemów związanych z badaniami zachowania się obiektów poruszających się w pobliżu swobodnej powierzchni wody. Problem dotyczący stateczności podłużnej polega głównie na nagłym zwiększaniu się kąta natarcia płata po osiągnięciu efektu oddziaływania powierzchni, czyli po wejściu w fazę lotu nad powierzchnią. W celu uniknięcia problemów związanych z równowagą i zachowaniem płata w różnych etapach i fazach jego ruchu, należy powyższym zagadnieniom poświęcić dużo uwagi.

### 5.6. Wymuszenia hydro-aerodynamiczne

Podczas badania ruchu platformy (płat) w pobliżu swobodnej powierzchni wody powinniśmy wyznaczyć następujące charakterystyki, siły i momenty hydro-aerodynamiczne:

- 1 opór platformy na wodzie  $R$  [N] – w różnych fazach ruchu,
- 2 wypór hydrodynamiczny platformy  $R_H$  [N] – w różnych fazach ruchu,
- 3 siła nośna na płatach platformy  $L$  [N] – w różnych fazach ruchu,
- 4 opór płatów nośnych platformy  $D$  [N] – w różnych fazach ruchu,



- 5 kołysanie podłużne platformy względem jej środka ciężkości  $\theta$  [deg] – w różnych fazach ruchu,
- 6 moment kołysań podłużnych platformy względem jej środka ciężkości  $M_\theta$  [Nm] – w różnych fazach ruchu,
- 7 kołysanie poprzeczne platformy względem środka ciężkości  $\varphi$  [deg] – w różnych fazach ruchu,
- 8 moment kołysań poprzecznych platformy względem środka ciężkości  $M_\varphi$  [Nm] – w różnych fazach ruchu,
- 9 niestacjonarność siły nośnej  $L$  i galopowanie pionowe platformy,
- 10 operacyjny kąt natarcia platformy  $\alpha$  [deg].

Ponadto należy zdefiniować następujące punkty odniesienia:

- środek ciężkości platformy,
- aerodynamiczny środek kołysań podłużnych platformy,
- aerodynamiczny środek wysokości lotu platformy względem powierzchni.

## 6. Wyniki dotychczasowych badań

Wyniki dotychczasowych badań związane są z pracami badawczymi i projektowymi w następującym zakresie:

- opracowanie geometrii platformy,
- dobór materiałów konstrukcyjnych, systemów pokładowych i wyposażenia platformy,
- oszacowanie masy i położenia środka masy platformy,
- analiza właściwości hydro-aerodynamicznych platformy, z uwzględnieniem efektu przypowierzchniowego,
- analiza obciążeń platformy, z uwzględnieniem efektu przypowierzchniowego,
- analiza konstrukcyjno-wytrzymałościowa platformy, z uwzględnieniem efektu przypowierzchniowego.

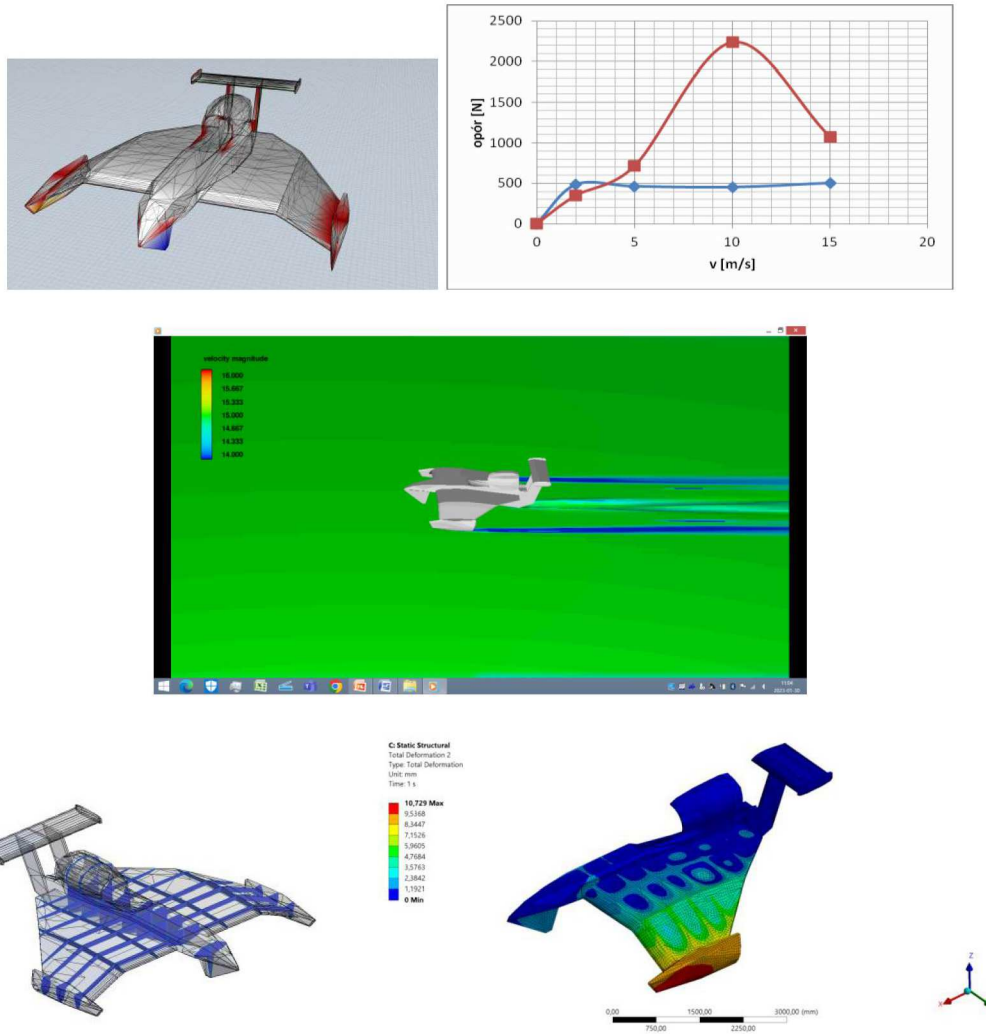
Na rysunku 4 przedstawiono wizualizację wybranych elementów analizy właściwości hydro-aerodynamicznych, oporu platformy oraz wybranych elementów dotyczących analizy konstrukcyjno-wytrzymałościowej platformy.

## 7. Podsumowanie

### 7.1. Dotychczasowe wyniki

Dotychczas przeprowadzono badania parametryczne z użyciem symulacji komputerowej w zakresie następujących zagadnień związanych z opracowaniem platformy:

- zdefiniowano geometrię (kształtu kadłuba) platformy, która znajduje się w fazie analizy i udoskonalania,
- w celu wstępnego oszacowania masy i położenia środka masy platformy dobrano wstępnie materiały konstrukcyjne, systemy pokładowe (napędowy) i wyposażenie platformy,
- trwają prace przygotowawcze do analizy obciążeń platformy,
- trwają prace przygotowawcze do analizy wytrzymałości konstrukcji,
- trwają prace przygotowawcze do analizy pływalności i stateczności,
- trwają prace przygotowawcze do analizy właściwości oporowo-napędowych,
- trwają prace związane z analizą właściwości hydro-aerodynamicznych platformy, z uwzględnieniem efektu przypowierzchniowego.



Rys. 4. Wizualizacja wybranych elementów analizy właściwości hydro-aerodynamicznych, oporu platformy oraz wybranych elementów dotyczących analizy konstrukcyjno-wytrzymałościowej platformy

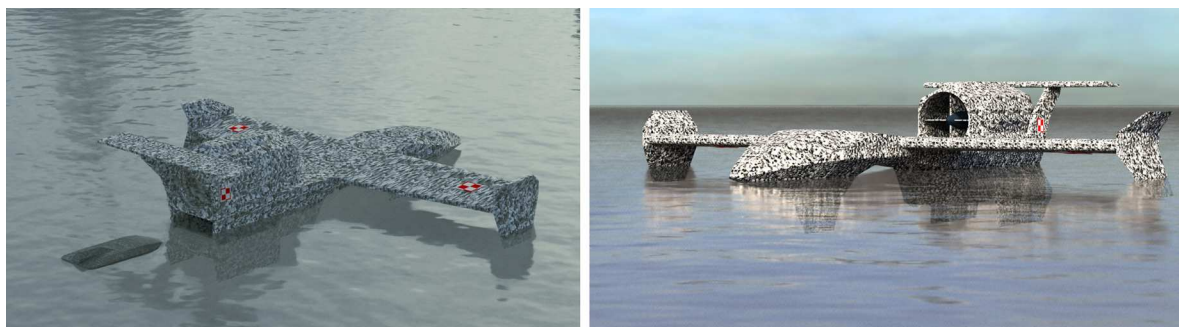
Po zakończeniu wszystkich prac w ramach etapu 1 projektu zostanie opracowany projekt techniczny platformy, który będzie podstawą opracowania projektu wykonawczego do budowy demonstratora platformy.

## 7.2. Kierunki dalszych badań

Istnieje możliwość zastosowania wyników projektu w obszarze obronności i bezpieczeństwa państwa:

- w morskich oddziałach Wojsk Specjalnych, Marynarce Wojennej, Straży Granicznej, Urzędzie Morskim, w oddziałach Policji,
- do zadań logistycznych, patrolowych, a docelowo do zadań rozpoznawczych, skrytych i bojowych.

W fazie rozwojowej przewiduje się wykorzystanie platformy do zadań rozpoznawczych z użyciem głowicy sensorycznej przenoszonej przez platformę przy współpracy z pojazdami typu AUV. Z uwagi na strategię i taktykę wojny przyszłości na morzu (wojna w Ukrainie, zmiany w NATO) można rozważyć zastosowanie dywizjonów wielofunkcyjnych platform podwodnych typu AUV i przypowierzchniowych typu USV-UAV-WIG.



Rys. 5. Wizualizacja platformy nawodno-powietrznej typu USV-UAV-WIG w wersji przybliżonej do operacyjnej

#### Podziękowania

*Poniższa praca powstała w ramach projektu badawczego: Umowa nr DOB SZAFIR/01/B/036/ 04/2021 o wykonanie i finansowanie projektu realizowanego na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa w ramach konkursu 4/SZAFIR/2021 pt. „Bezzałogowa platforma nawodno-powietrzna wykorzystująca efekt przypowierzchniowy wspierająca działania Wojsk Specjalnych na akwenach morskich”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.*



#### Bibliografia

1. Materiały wewnętrzne Konsorcjum PG-WAT-ITWL: Umowa nr DOB SZAFIR/01/B/036/04/2021 o wykonanie i finansowanie projektu realizowanego na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa w ramach konkursu 4/SZAFIR/2021 pt. „Bezzałogowa platforma nawodno-powietrzna wykorzystująca efekt przypowierzchniowy wspierająca działania Wojsk Specjalnych na akwenach morskich”
2. BELAWIN N.I., *Ekranoplany*, Wydawnictwo „Budownictwo okrętowe” (wydano w j. rosyjskim), UDK 629.12.011.17:629.7, Leningrad 1977
3. WAGANOW A.M., *Projektowanie jednostek szybkich*, Wydawnictwo „Budownictwo okrętowe” (wydano w j. rosyjskim), UDK 629.123.4.072.2.001.2 (075.8), Leningrad 1978
4. GERIGK M., *Kompleksowa metoda oceny bezpieczeństwa statku w stanie uszkodzonym z uwzględnieniem analizy ryzyka*, Monografie 101, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2010
5. GERIGK M.K., *Modelowanie cech hydromechanicznych dwustanowych bezzałogowych obiektów pływających*, Monografia naukowa z okazji 70 rocznicy urodzin Profesora Edmunda Wittbrodta pt. „Od metody elementów skończonych do mechatroniki”, Praca zbiorowa pod redakcją K.J. Kalińskiego i K. Lipińskiego, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2017, ISBN 978-83-7348-709-3, s. 143-154
6. GERIGK M.K., Modelling of performance of an AUV stealth vehicle. Design for operation, *Proceedings of IMAM 2017, 17th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean*, Lisbon, Portugal, 9-11 October 2017., Vol. 1, 365-369, 2018, Taylor & Francis Group, London. A Balkema Book, ISBN 978-0-8153-7993-5
7. Lloyd's Register Technical Association, *Development of Rules and Regulations for Wing in Ground Effect*, Craft Paper No. 4, Session 2001-2002
8. GERIGK M.K., Materiały wewnętrzne. Zakład Mechaniki i Obiektów Bezzałogowych, Instytut Mechaniki i Konstrukcji Maszyn, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2021

9. KORNEV N., MATVEEV K., *Complex numerical modeling of dynamics and crashes of wing-in-ground vehicles*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 2003-600, 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 6-9 January 2003, Reno, Nevada
10. MATVEEV K.I., Aero-hydrodynamic aspects of power-augmented ram wings, *Journal of Ship Research*, **57**, 2, 86-97, 2013

Literatura dodatkowa:

11. SE Technology web site, The WIG Page, [www.se-technology.com](http://www.se-technology.com)
12. BUCKLE A.K., *Air Cushion Vehicles*, Staff Association (1966/7)
13. Rozhdestvensky and Kubo
14. Royal Institute of Naval Architects, Conference on Wing in Ground Effect Craft, December 1997
15. WEISELBERGER C., *Über den Flugwiderstand in der Nake des Bodens*, 12, 1921, pp. 145-147
16. EDWIN P.E. VAN OPSTAL, *Longitudinal Stability of WIG Boats*, 2000
17. *The Anatomy of the Airplane*, Darrol Stinton 1998
18. Glossary of Aeronautical Terms of the British Standards Institution
19. International Maritime Organization, DE 45/6/2 Agenda Item 6
20. [www.flightship.net](http://www.flightship.net)
21. Joint Aviation Authorities, Joint Aviation Requirements 2002
22. International Maritime Organization, Code for Dynamically Supported Craft, 1977
23. International Maritime Organization, Code for Safety for High Speed Craft, 2000
24. Rules and Regulations for the Classification of Naval Ships
25. International Standards Organization, ISO/NP17894 (no published)

**Analysis of hydro-aerodynamic characteristics of an unmanned surface-air vehicle with the wing-in-ground effect taken into account**

The paper presents the issues of a research on the development of a technology demonstrator of an unmanned surface-air vehicle using the wing-in-ground WIG effect. Basic research problems related to the analysis of vehicle hydro-aerodynamic characteristics have been described. The subject of research, an unmanned surface-air vehicle of the USV-UAV-WIG type, is described. The research method is discussed. A preliminary analysis of the performance and behaviour of the USV-UAV-WIG vehicle in conditions close to real ones has been carried out using the CFD computational fluid dynamics method. The results have been presented in the final part of the article. Directions for further research and final conclusions from the research done so far are given.

Keywords: USV-UAV-WIG unmanned surface-air vehicle, hydro-aerodynamic characteristics, motion mechanics, dynamics