

Jacek GNILKA

Gabriel MURA

NUMERYCZNA ANALIZA WYZNACZANIA PŁYWALNOŚCI POJAZDÓW GĄSIENICOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono charakterystykę prowadzenia analiz pływalności pojazdów gąsienicowych. Ponadto zaproponowano dwie metody, dzięki którym możliwe jest oszacowanie zachowania pojazdu w trakcie pokonywania przeszkód wodnych. Metody umożliwiające bardziej efektywne prace projektowo - konstrukcyjne, stanowią na etapie modelowania istotne wskazówki redukujące nakłady poniesione na nowe konstrukcje. Przedstawiono również sposoby prezentacji wyników analiz numerycznych, dzięki którym istnieje możliwość określenia właściwości hydrodynamicznych badanych pojazdów.

Słowa kluczowe: amfibia, pojazdy gąsienicowe, pływalność.

1. WSTĘP

Podstawowe parametry, które decydują o walorach bojowych pojazdów gąsienicowych to ich siła ognia, opancerzenie oraz zdolności manewrowe, do których można zaliczyć zdolność pokonywania przeszkód wodnych na terenie środkowoeuropejskim. Możliwość pływania pojazdów lądowych jest atutem wynikającym z faktu, iż występowanie przeszkód wodnych szacuje się średnio na co 11 km, co stanowi poważne utrudnienie w pokonywaniu odległości przez pojazdy specjalne w warunkach bojowych. Ponadto przeszkody wodne przyjmują różny charakter. Są to nie tylko stawy czy jeziora, ale najczęściej rzeki z wartkimi prądami [1]. Pojazdy pływające charakteryzują się dobrą pływalnością wtedy, gdy masa cieczy wypartej przez całkowitą wyporność pojazdu jest większa, co najmniej o 20-25% od całkowitej jego masy. Pojazd pływający posiada stateczność wówczas, gdy jego środek ciężkości S i środek wyporu Σ leżą na jednej linii prostej prostopadłej do lustra wody. Ponadto pojazd ma dobrą stateczność poprzeczną pływania, gdy jego metacentrum M leży powyżej środka ciężkości S . Stateczność jest tym większa, im większe jest ramię metacentrum (momentu prostującego) m , a najlepszą stateczność osiąga, się gdy środek ciężkości S jest poniżej środka wyporu Σ [1,2,3,4]. Ramię metacentrum dla pływających pojazdów gąsienicowych nie powinno być mniejsze od 0,4 - 0,5 m. Przy zachowaniu takiej wartości ramienia metacentrum jest zapewniony powrót pojazdu do stanu równowagi, na wypadek oddziaływania sił zewnętrznych, które spowodowałyby przechył w granicach do 20° . Na rysunku 1 zobrazowano powyższe informacje na temat pływalności.

Wyporność pływającego pojazdu gaśnicowego możemy wyznaczyć korzystając z równania (1) opartego na prawie Archimedesesa [1]:

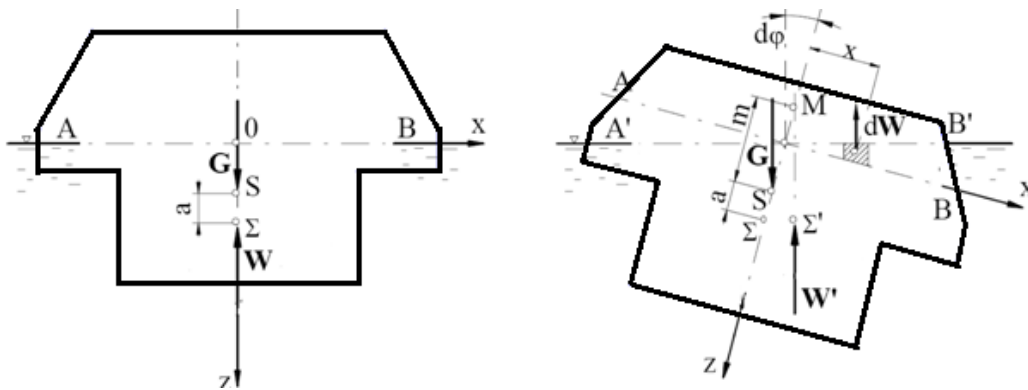
$$W = \rho \cdot V_{pg} \quad (1)$$

gdzie:

W - wyporność pojazdu gaśnicowego [N],

ρ - gęstość wody [daN/m³],

V_p - objętość części zanurzonej pojazdu [m³].



Rys.1. Równowaga ciała pływającego na powierzchni swobodnej [1]

Kiedy już oddziaływujące na pojazd siły zewnętrzne powodują przechył, na pojazd zaczyna oddziaływać moment prostujący, który powstaje w wyniku przesunięcia się środka wyporu. Poniżej przedstawiono równanie (2) określające moment prostujący [1]:

$$M_p = G \cdot m \cdot \sin\varphi \quad (2)$$

$$r = m + a = \frac{J_y}{V_p} \quad (3)$$

$$J_y = \frac{l \cdot b^3}{12} \quad (4)$$

gdzie:

M_p - moment prostujący [Nm],

G - siła ciężkości pojazdu [N],

r - promień metacentryczny [m],

a - odległość środka ciężkości S od środka wyporu Σ [m],

φ - kąt przechyłu [°],

J_y - moment bezwładności powierzchni przekroju [m⁴],

l - długość powierzchni przekroju [m],

b - szerokość powierzchni przekroju [m].

Zależność momentu prostującego w funkcji kąta przechyłu dla różnych pojazdów gaśnicowych przedstawiono na rysunku 2.

Kryterium równowagi dla wychyleń wzdłużnych jest znacznie większe, gdyż większy jest promień krzywizny, po której porusza się środek wyporu Σ w czasie pochylenia wzdłużnych, dlatego metacentrum wzdłużne jest zawsze większe od metacentrum poprzecznego. Od pływających pojazdów gaśnicowych wymaga się coraz to wyższych prędkości pływania, a niektóre jednostki rozwijają już prędkość do 47 km/h. Aby pojazd poruszał się na wodzie z założoną prędkością, należy do niego przyłożyć siłę równą oporom hydrodynamicznym o zwrocie zgodnym z kierunkiem płynięcia. Siłę oporu określa się wg równania (5):

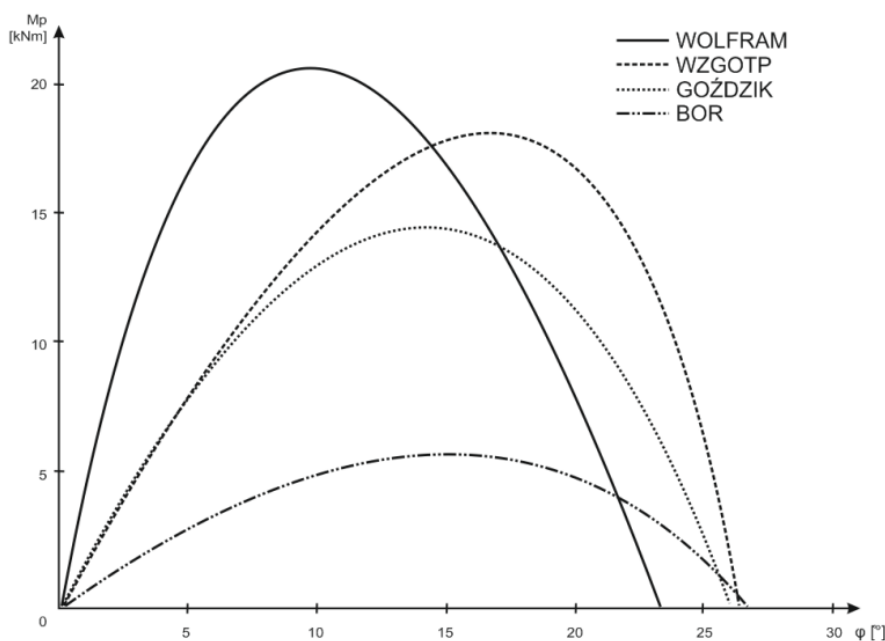
$$P_x = C_x \rho \frac{v^2}{2} \cdot A \quad (5)$$

gdzie:

C_x - bezwymiarowy współczynnik oporu,

v - prędkość pływania [m/s],

A - powierzchnia przekroju poprzecznego zanurzonej części pojazdu [m²].

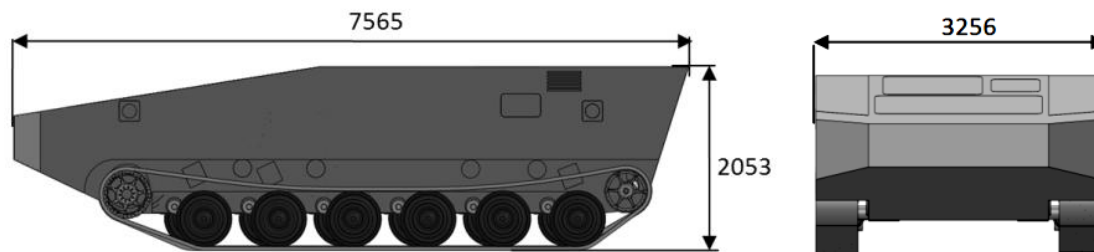


Rys. 2. Zależność momentu prostującego od kąta przechyłu wybranych pojazdów pływających [1]

Współczesne techniki obliczeniowe umożliwiają symulację zachowania się pojazdu gaśnicowego na wodzie. Oprogramowania przeznaczone do obliczeń pozwalających określić własności hydrodynamiczne umożliwiają eliminację błędów konstrukcyjnych oraz poprawę pływalności pojazdu specjalnego przed wykonaniem prototypu. W oparciu o metodę elementów skończonych oraz techniki CFD (ang. Computational Fluid Dynamics) istnieje możliwość definiowania warunków fizycznych, w których porusza się pojazd, takich jak morskie fale czy też prąd rzeczny. Jednak do najprostszej analizy stateczności pływania wystarczą jedynie popularne środowiska CAD.

2. ANALIZA PŁYWALNOŚCI Z WYKORZYSTANIEM ŚRODOWISKA CAD

Pierwszy ze sposobów wyznaczania stateczności pływania oparty jest o metody analityczne. Opisywana metoda bazuje na dwóch modelach wozów zbudowanych w klasycznym środowisku 3D CAD.



Rys. 3. Model geometryczny analizowanego gaśnicowego pojazdu pływającego

2.1. Założenia upraszczające i wyznaczenie parametrów inercyjnych

Dzięki zamodelowaniu konstrukcji ze szczególnym uwzględnieniem elementów wyposażenia oraz ich rzeczywistymi masami, możliwe jest wyznaczenie parametrów inercyjnych pojazdu pływającego. Wartości tych parametrów można odczytać za pomocą wbudowanych funkcji pokazujących rozmieszczenie środka ciężkości oraz wartość masy pojazdu.

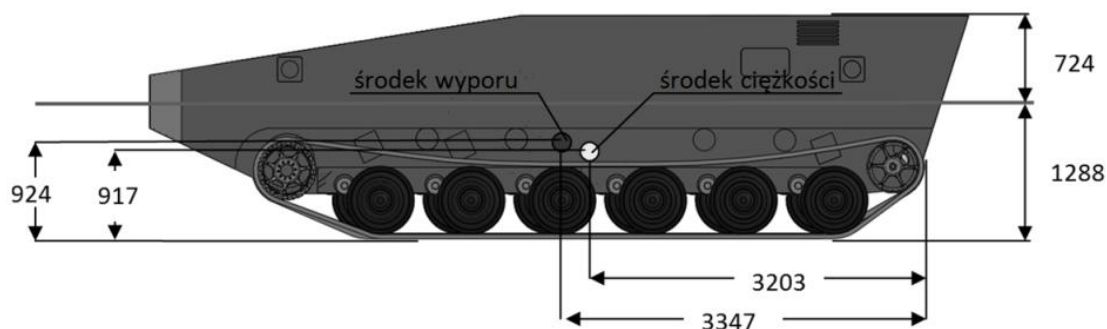
Kolejnym krokiem jest budowa modelu służącego do określenia wyporności pojazdu, poprzez operacje prowadzące do zmodyfikowania modelu w taki sposób, aby uzyskać jednolitą bryłę w celu wyznaczenia objętości cieczy wypartej przez zanurzony pojazd.

Uproszczenie modelu gaśnicowego pojazdu w taki sposób, aby wnętrze pojazdu było wypełnione, natomiast jego elementy konstrukcji zewnętrznej (burty, koła, zawieszenie i gaśnice) powinny być uproszczone do podstawowych wymiarów gabarytowych. Elementy wypornościowe z komorami powietrznymi (np. koła) również powinny być wykonane w sposób bryłowy.

Wyznaczone parametry pozwalają na wyznaczenie zapasu pływalności pojazdu, poprzez wyznaczenie gęstości pojazdu. Wiadomo, że przy wyznaczaniu pływalności amfibii nie można uwzględniać pełnej objętości pojazdu, lecz jedynie objętość maksymalnego zanurzenia, zgodną z dopuszczalnym maksymalnym zanurzeniem zdefiniowanym w założeniach technicznych.

2.2. Wyznaczanie środka wyporu

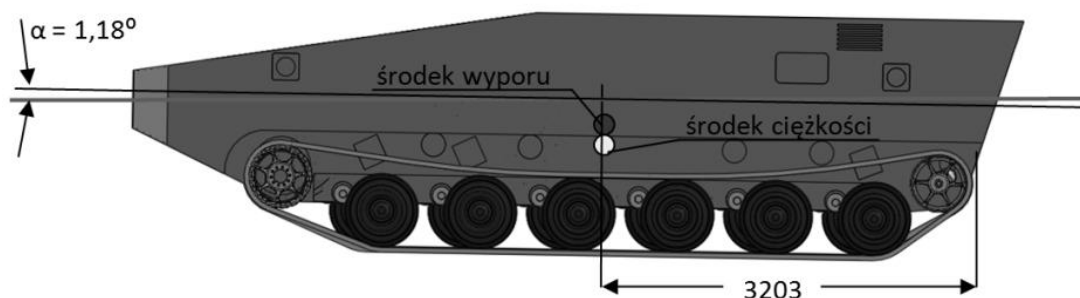
Po wyznaczeniu parametrów inercyjnych i objętości maksymalnego zanurzenia należy przystąpić do wyznaczania położenia środka wyporu. W tym celu w uproszczonym modelu części pojazdu pływającego należy wprowadzić płaszczyznę, która w analizie odzwierciedlać będzie lustro wody, tj. funkcją płaszczyzny jest podział modelu - bryły pojazdu na część zanurzaną oraz znajdującą się nad powierzchnią wody. Położenie to można wyznaczyć na podstawie zapasu pływalności. W sposób iteracyjny należy sprawdzać czy położenie płaszczyzny dzielącej jest prawidłowe, wybierając część pojazdu, która znajduje się pod płaszczyzną i określając jej masę. Jeżeli na tym etapie masa wypartej wody jest równa masie pojazdu, to możemy przejść do odczytania położenia środka wyporu. W przeciwnym razie należy skorygować położenie powierzchni i powtórzyć operacje do momentu uzyskaniażądanego wyniku. Na rysunku 4 przedstawiono położenie środka ciężkości i środka wyporu pojazdu w analizie pływalności wzdłużnej.



Rys. 4. Położenie środka ciężkości i środka wyporu pojazdu pływającego

W sytuacji pokazanej na rysunku 4, powstanie moment sił, działający na konstrukcję w taki sposób, aby środek wyporu oraz środek ciężkości znalazły się w jednej linii prostopadłej do lustra wody. Dlatego kolejnym etapem jest zmodyfikowanie położenia płaszczyzny przecinającej w modelu o taki kąt, dla którego wspomniane punkty będą leżały w linii prostopadłej do tej płaszczyzny. Na rysunku 5 przedstawiono położenie pojazdu względem lustra wody.

W taki sam sposób możliwe jest przeprowadzenie analizy stateczności na przekroju poprzecznym konstrukcji.



Rys. 5. Określenie położenia lustra wody w stosunku do pojazdu

3. ANALIZA PŁYWALNOŚCI Z WYKORZYSTANIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

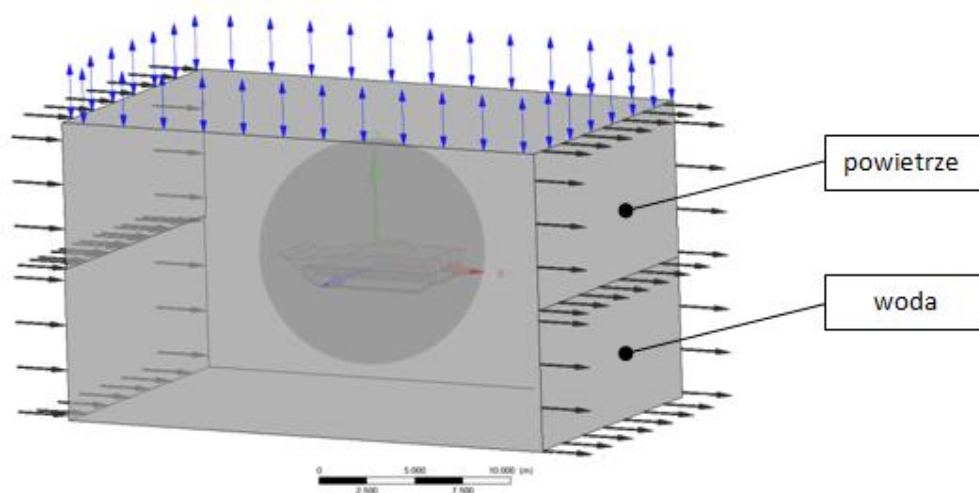
W oparciu o metodę elementów skończonych oraz techniki komputerowej mechaniki płynów możliwe jest przeprowadzenie symulacji modelu pojazdu poruszającego się w ośrodku powietrze-woda.

Model pojazdu stanowi w tym przypadku bryłę o sześciu stopniach swobody, która zostaje umieszczona w mieszaninie wody i powietrza o skończonej objętości. Dzięki zdefiniowaniu parametrów, takich jak środek masy oraz składowe tensora masowego momentu bezwładności, możliwe jest przeprowadzenie symulacji typu transient - stanu nieustalonego, gdzie po pewnym czasie układ stabilizuje się, dzięki czemu możliwe jest określenie pozycji amfibii na powierzchni wody. Symulacja umożliwia również obserwację zachowania się pojazdu w czasie płynięcia z określoną prędkością, podczas wzburzonej wody czy też w rwącej rzece.

3.1. Budowa modelu numerycznego oraz symulacje

Pierwszym etapem w budowie modelu numerycznego, podobnie jak w poprzedniej metodzie, jest opracowanie uproszczonego modelu fizycznego kadłuba pojazdu. Następnie należy utworzyć otoczenie pojazdu, którym zostaną przypisane właściwości wody i powietrza. Kolejnym etapem jest dyskretyzacja modelu, czyli podział na elementy skończone, któremu zostają poddane obszary zdefiniowane jako woda oraz powietrze. Budowa siatki elementów skończonych jest procesem tym bardziej skomplikowanym, im bardziej złożony jest model pojazdu pływającego. Następnie w preprocesorze definiowane są założenia symulacji, czyli warunki brzegowe oraz początkowe. Graficzne przedstawienie zdefiniowanych warunków symulacji zostało przedstawione na rysunku 6, gdzie jednokierunkowe strzałki oznaczają zdefiniowany ruch cieczy, natomiast dwukierunkowe strzałki obszar otwarty.

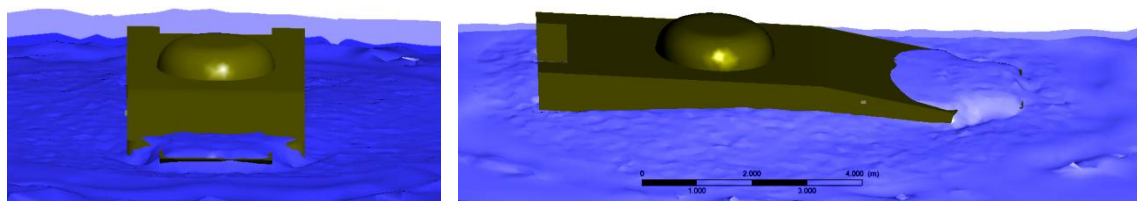
Metoda elementów skończonych jest metodą przybliżoną oraz jej działanie opiera się o procesy iteracyjne, przez co czas trwania obliczeń jest uzależniony od poziomu skomplikowania warunków symulacji oraz dokładności dyskretyzacji modelu. Przedstawiona w niniejszym artykule symulacja jest wykonana w programie Ansys CFX.



Rys. 6. Definicja warunków brzegowych w preprocesorze

3.2. Wyniki analizy numerycznej

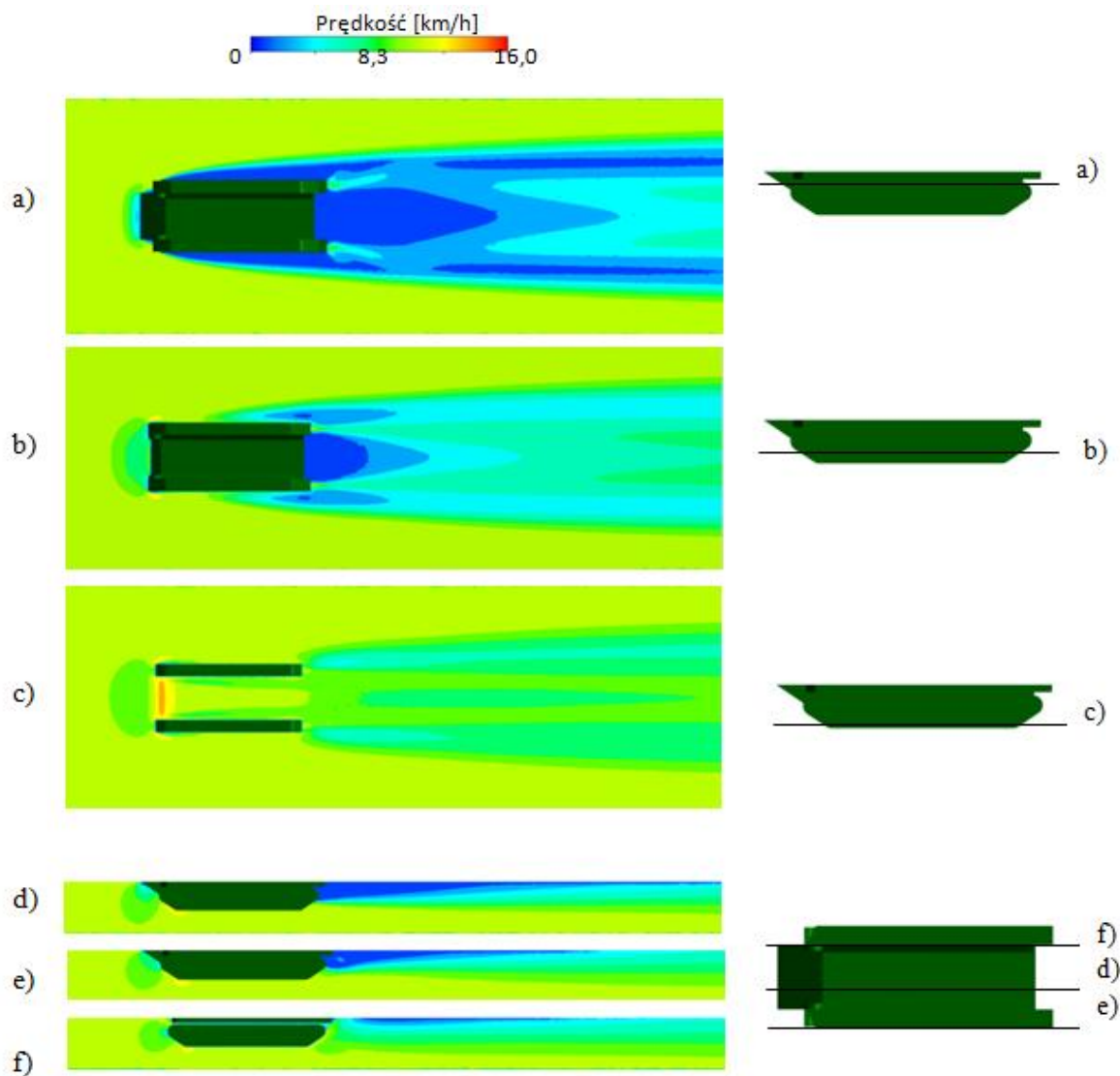
Dzięki interakcji modelu ciała stałego z cieczą wynikiem symulacji jest zachowanie się modelu pojazdu jak i również cieczy. Dzięki temu inżynierowie mogą nie tylko przewidzieć jak pływający pojazd będzie się zachowywał podczas pokonywania przeszkód wodnych, ale również są w stanie wyznaczyć parametry hydrodynamiczne, dzięki którym możliwe jest określenie mocy potrzebnej do napędzenia pojazdu. Na rysunku 7 został przedstawiony wynik analizy w postaci wizualizacji pojazdu pływającego oraz lustra wody.



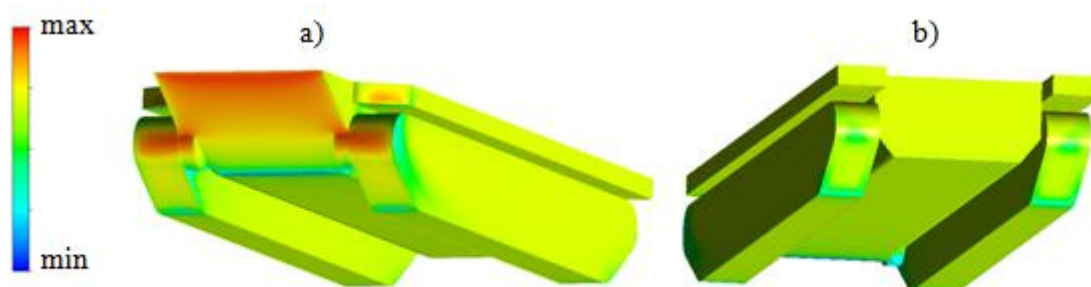
Rys. 7. Wizualizacja analizy pływającego pojazdu gąsienicowego

Dzięki postprocesorowi możliwe jest przedstawienie wyników w różnej postaci, począwszy od animacji, poprzez grafiki oraz przekroje, na których istnieje możliwość wyświetlania barwnych map określających zmieniające się parametry na danym obszarze.

Na rysunku 8 został przedstawiony wynik w postaci rozkładu prędkości cieczy opływającej pojazd. Dzięki przekrojom na różnych wysokościach pojazdu możliwe jest zobrazowanie pola prędkości cieczy, którego zmiana, poprzez modyfikację kształtu konstrukcji, może wpłynąć na zmniejszenie oporów ruchu.



Rys. 8. Rozkład prędkości cieczy wokół pływającego pojazdu

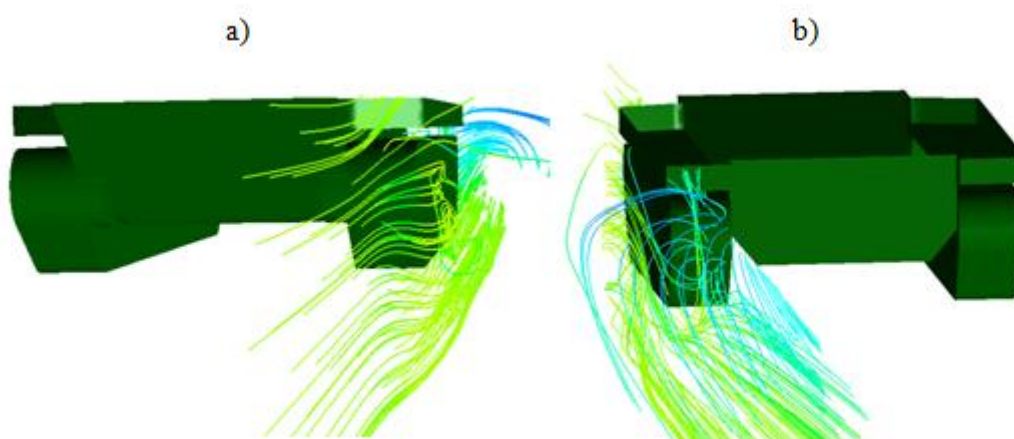


Rys. 9. Rozkład ciśnienia cieczy działającej na podwozie pojazdu

a) widok z przodu pojazdu, b) widok z tyłu pojazdu

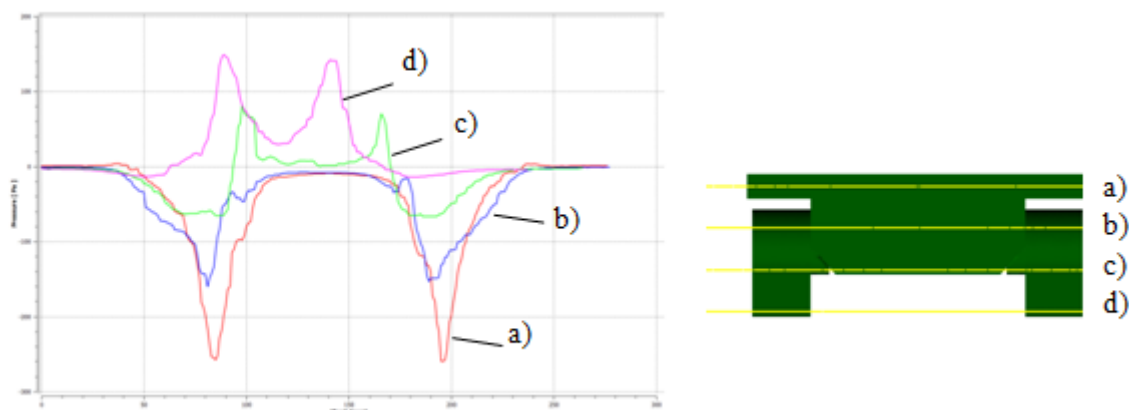
Również rozkład ciśnienia na części powierzchni modelu znajdującego się pod wodą daje istotne informacje dotyczące hydrodynamiki pojazdu (Rys. 9).

Poprzez definicję linii strug cieczy można zaobserwować wirtualny ruch cieczy, który wskazuje na charakter opływu konstrukcji.



Rys. 10. Rozkład strug cieczy wokół lewej części układu gaśnicowego

Prezentowane wyniki numerycznych obliczeń nie tylko w sposób graficzny przedstawiają informację, poprzez wstawienie punktów lub linii istnieje możliwość odczytania z nich wartości liczbowych zmiennych, co zostało zilustrowane na rysunku 11.



Rys. 11. Wykres wartości ciśnienia odczytywanego z linii znajdujących się 0,5m za pojazdem

4. PODSUMOWANIE

Prezentowane w artykule metody wykorzystywane są do wstępnego oszacowania pływalności pojazdów gąsienicowych i innych pojazdów wodnych. Należy pamiętać, że prezentowane metody komputerowe działają z przybliżoną dokładnością, przez co istotnym zabiegiem jest konieczność przeprowadzenia weryfikacji obliczeń poprzez badania doświadczalne, tak jak w [5], [6].

Pierwsza z metod jest metodą szybką w realizacji, lecz obciążona dużym błędem i oferująca mniejszy zakres wyników, odnosi się w głównej mierze do badań statycznych.

Druga z metod jest pracochłonna oraz niesie ze sobą konieczność posiadania oprogramowania do obliczeń inżynierskich. Proces modelowania jest złożony oraz należy przewidzieć długi czas obliczeń skomplikowanych kształtów konstrukcji, ale dzięki temu poprzez dokładne odwzorowanie modelu można uzyskać wiele cennych informacji dotyczących zachowania się konstrukcji, lub jej poszczególnych elementów, które są opływane przez wodę. Wyniki obliczeń, poprzez postprocesor mogą być dowolnie poddawane obróbce, przez co istnieje możliwość wyłuskiwania z nich pożądaných informacji.

Dzięki możliwości ingerencji w proces obliczeniowy oraz definicję parametrów wejściowych, opracowane modele mogą posłużyć do optymalizacji zagadnienia pływalności analizowanych pojazdów.

5. LITERATURA

- [1] Kaglik K., Sokołowski, Wala: Pływalność opancerzonych transporterów gąsienicowych, Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe, (1) nr 1, 1990.
- [2] Jeżowiecka - Kabsch K., Szewczyk H.: Mechanika płynów, Wrocław 2001.
- [3] Sobieski W.: Wybrane zagadnienia z Mechaniki Płynów, Olsztyn 2001.
- [4] Barrass B., Derrett D. R.: Ship stability for Masters and Mates, Oxford 2006
- [5] Kotowski M., Barnat W.: Experimental and numerical buoyancy analysis of tracked military vehicle, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 19, No. 4 2012
- [6] Barnat W., Grygorowicz M., Kotowski M., Dybcio P.: Zastosowanie badań eksperymentalnych do walidacji numerycznej analizy pływania pojazdu wojskowego, Systems. Journal of Transdisciplinary Systems Science, 2012, Vol. 16, No. 3

Praca realizowana ze środków projektu badawczego nr 2011/01/N/ST8/04636

NUMERICAL ANALYSIS OF DETERMINING BUOYANCY OF TRACKED VEHICLES

Abstract: The paper presents the characteristics of carrying out analyses of buoyancy of tracked vehicles. In addition, two methods were proposed for assessing vehicle behaviour during negotiation of water obstacles. Methods that enable more effective design and engineering work help reduce cost of new structures at the modelling stage. Ways of presenting numerical analysis results providing the ability to determine hydrodynamic properties of the vehicles are also presented.

Keywords: amphibian, tracked vehicles, buoyancy