



Szacowanie stabilności modułu pontonowego mostu kasetowego

AGNIESZKA DEREWOŃKO, TADEUSZ NIEZGODA,
GRZEGORZ SŁAWIŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. System pontonowego mostu kasetowego umożliwia zestawienie przeprawy przez przeszkodę wodną dla ludzi i sprzętu. Przeprawa powstaje jako dowolne złożenie powtarzalnych modułów pływających. Pojedynczy moduł mostu kasetowego stanowi szczelny prostopadłościan (kaseta) częściowo zanurzony w wodzie, którego siła wyporu jest zależna od ciężaru własnego. We wnętrzu kasety znajduje się powłoka, która może być pompowana gazem (powietrzem). W trakcie napełniania powłoki rosnące ciśnienie powoduje otwarcie dna kasety, a wzrastająca objętość powłoki skutkuje wzrostem siły wyporu. W pracy przedstawiono wstępne wyniki analiz, w których oceniono stabilność modułu kasetowego mostu pontonowego.

Słowa kluczowe: mechanika, stabilność, fala uderzeniowa

1. Wstęp

W stosowanych obecnie systemach pływających pojedyncze segmenty konstrukcji to metalowe obiekty o różnych wymiarach w postaci zamkniętej. Aby zapewnić odpowiednią wyporność, obiekty te muszą charakteryzować się fabryczną szczelnością. Ich cechą niepożądaną jest duża objętość transportowa, która wymaga zapewnienia bardzo licznych środków do przewozu sprzętu towarzyszącego i zespołów obsługujących. Przykładem są szczelne, metalowe segmenty Parku Pontonowego PP-64 eksploatowanego przez Siły Zbrojne RP [1]. Ze względu na znaczną masę własną i duże gabaryty, przez pojedynczy pojazd kołowy mogą być transportowane jedynie dwa segmenty PP-64. Załadunek i wyładunek pontonów oraz obsługa i montaż na wodzie wymagają licznej załogi o wysokiej specjalizacji

oraz odpowiedniego sprzętu. Brak odpowiedniej mobilności sprzętu sprawia, że jest nieprzydatny szczególnie w ciężkich warunkach terenowych ograniczających możliwości operacyjne. Eksploatacja konstrukcji tego typu jest bardzo droga, ponieważ pontony stalowe wymagają zapewnienia dużej przestrzeni składowania oraz zabezpieczeń antykorozyjnych.

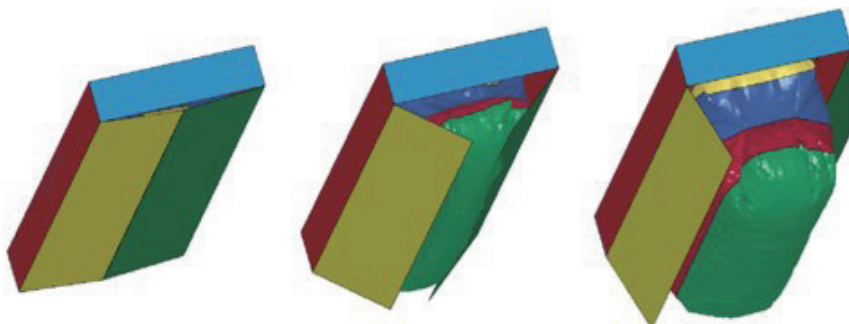
W pracy przedstawiono wstępne analizy numeryczne modułu mostu kasetowego o regulowanej wyporności, w którym elementem zapewniającym nośność jest napełniana sprężonym powietrzem elastyczna powłoka (ponton).

Elastyczne powłoki wykorzystywane są obecnie jako elementy konstrukcji poduszek, służących do podnoszenia, rozpierania, dociskania lub pozycjonowania przedmiotów przez służby ratownicze. Ich zaletą jest kombinacja ogromnej siły i wysokości podnoszenia przy jednoczesnym zapewnieniu stabilności podczas wykonywanej operacji [2].

Cechy konstrukcyjne pojedynczych modułów pływających zapewniają łatwy transport większej liczby modułów w małej przestrzeni ładunkowej, umożliwiając w warunkach bojowych nawet transport lotniczy. Powtarzalność oraz regulacja wyporności pojedynczego modułu umożliwia dowolne kształtowanie wymiarów i konfiguracji budowanych systemów pływających oraz przepraw pozornych.

2. Opis problemu

Pontonowy most kasetowy składany jest z pojedynczych, powtarzalnych modułów pływających, których zasadniczymi częściami są kasetka i elastyczna powłoka. W pozycji zamkniętej powłoka złożona jest wewnątrz kasety, której górna część stanowi jednocześnie powierzchnię jezdnią dla przemieszczających się po niej pojazdów. Dolną część kasety tworzy dwudzielne dno (drzwi) otwierane przez powiększającą swoją objętość podczas napełniania powietrzem powłokę (rys. 1). Otwarte drzwi zabezpieczają z boku powłokę przed uszkodzeniem, a w zastosowaniach wojskowych stanowią dodatkową osłonę balistyczną.



Rys. 1. Schemat działania modułu mostu kasetowego

Wymiary podstawowych części modułu, tzn. kasety i powłoki, określono analitycznie na podstawie wymaganej wyporności i nośności dla tego typu konstrukcji [5]. W obliczeniach posłużono się algorytmami stosowanymi w okrętownictwie. Oznacza to, że moduł pod wpływem momentu prostującego powstającego w wyniku działania sił ciężkości i wyporu powinien wrócić do pozycji wyjściowej po wychyleniu o kąt 7 do 10°.

Analizy numeryczne pozwoliły zweryfikować przeprowadzone obliczenia analityczne oraz oszacować wpływ efektów dynamicznych związanych z wyporem wody oraz obciążeniem masą pojazdu. W analizach zastosowano, oparty na metodzie elementów skończonych, program LS-DYNA bazujący na sformułowaniu „explicit” do rozwiązywania zagadnień szybkozmiennych.

Ośmiowęzłowe, trójwymiarowe, z jednym punktem całkowania elementy skończone zostały wykorzystane do przygotowania modelu dyskretnego wody. Przypisano im równanie stanu opisane funkcją Gruneisena, która definiuje ciśnienie ściskanego materiału [4] zgodnie z równaniem:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E, \quad (1)$$

natomiast materiału rozciąganego

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu)E, \quad (2)$$

gdzie E to energia wewnętrzna właściwa, C jest prędkością dźwięku w ośrodku niezaburzonym, S_1, S_2, S_3 są parametrami równania Gruneisena, γ_0 to tzw. gamma Gruneisena, a jest współczynnikiem korekcji γ_0 pierwszego rzędu oraz $\mu = (\rho / \rho_0) - 1$.

Niezbędne parametry równania Gruneisena przyjęto na podstawie literatury [3] i zestawiono w tabeli 1.

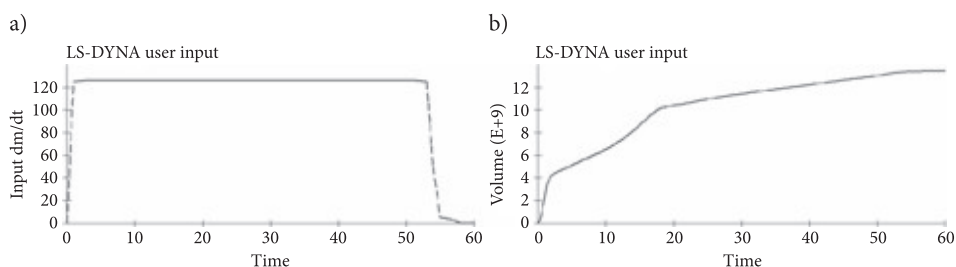
TABELA 1

Parametry równania stanu Gruneisena dla modelu MES wody [3]

Gęstość	Prędkość dźwięku w ośrodku niezaburzonym	Parametry równania Gruneisena			Gamma Gruneisena
		S_1 (-)	S_2 (-)	S_3 (-)	γ_0 (-)
ρ (kg/m ³)	C (mm/ms)				
1000	2417	1,41	-	-	1

We wstępnym modelu, metalową kasetę o wymiarach $6,25 \times 2 \times 0,5 \text{ m}^3$ (długość \times szerokość \times wysokość) potraktowano jak ciało sztywne utworzone z elementów powłokowych. Przyjęto, że jedynie górna powierzchnia kasety, pełniąca funkcję jezdnią, wykonana jest ze stali. Pozostałe ściany kasety wykonane są z metalu lekkiego, tj. stopu aluminium.

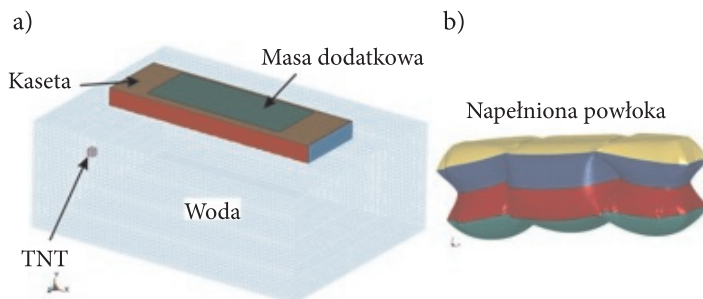
Model napełnianej trójkomorowej powłoki (rys. 3b) jest utworzony z czterowęzłowych elementów powłokowych z dwoma punktami całkowania po grubości. Opcja Airbag, rozwiązanie oparte na zdefiniowaniu powierzchni otaczającej kontrolowaną objętość, została wykorzystana do symulacji napełniania powłoki. Wydatek masowy powietrza w funkcji czasu (kg/ms), przedstawiony na rysunku 2a, powoduje powiększanie objętości powłoki, jak pokazano na rysunku 2b.



Rys. 2. Wydatek masowy (a) oraz zmiana objętości powłoki w funkcji czasu (b)

W obliczeniach wstępnych założono, że elastyczny materiał powłoki jest izotropowy, co umożliwiło wprowadzenie tylko jednej wartości modułu Younga równej 200 GPa i współczynnika Poissona o wartości 0,3.

Rozważono dwa przypadki: modułu nieobciążonego oraz obciążonego równomiernie rozłożoną na powierzchni jezdni masą równą 1 tonie (rys. 3a). Zgodnie z wymaganiami, bezpieczeństwo mostów pontonowych i tratw zależy m.in. od rezerwy powierzchni pływającej i stabilności. Ponieważ wiążą się one z konfiguracją i użytkowaniem sprzętu oraz warunkami hydrodynamicznymi, trudno jest określić



Rys. 3. Moduł mostu obciążony dodatkową masą (a) oraz napełniona powłoka (b)

dokładne zasady. Dlatego, dodatkowo, dla obu przypadków przeanalizowano również wpływ fali uderzeniowej wywołanej detonacją podwodnego ładunku wybuchowego o masie 13 kg umieszczonego niesymetrycznie, w odległości 1,3 m od konstrukcji (rys. 3a), na stabilność modułu.

W analizach nie uwzględniono oddziaływania współpracujących modułów. Przyjęto, odbierając odpowiednie stopnie swobody wybranym punktom powierzchni jezdnej, że niemożliwy jest obrót swobodnie umieszczonego na wodzie modułu wokół osi prostopadłej do jego płaszczyzny jezdnej.

Ciśnienie wywoływane wybuchem zostało opisane równaniem stanu JWL (Jones-Wilkins-Lee) jako funkcja wykładnicza w postaci:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}, \quad (3)$$

gdzie $V = \frac{\rho}{\rho_0}$, E to energia wewnętrzna właściwa, A , B , R_1 , R_2 i ω oznaczają parametry równania wyznaczone w trakcie badań eksperymentalnych [4].

Stałe przyjęte w równaniu JWL dla TNT (trotyl), przedstawione w tabeli 2, uzyskano z literatury [3]. W obliczeniach uwzględniono zagadnienia kontaktowe.

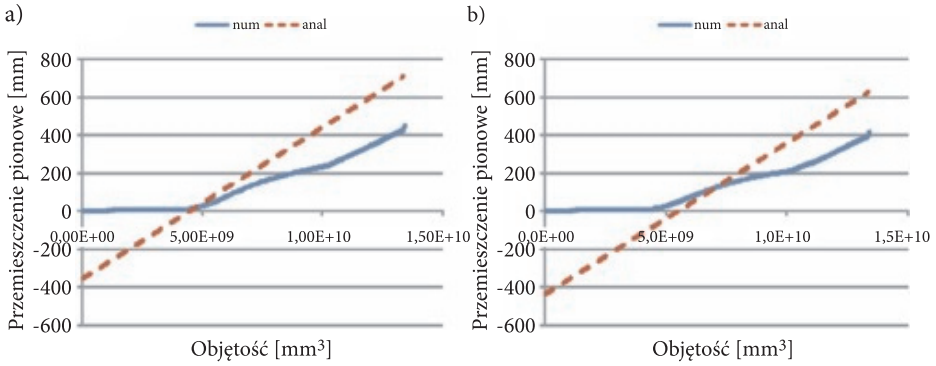
TABELA 2

Stałe równania JWL dla TNT [3]

Gęstość	Prędkość detonacji	Ciśnienie w punkcie Chapman-Jouget	Właściwa energia wewnętrzna	$V = \frac{\rho}{\rho_0}$
ρ (kg/m ³)	D (mm/ms)	p_{CJ} (GPa)	E (J/mm ³)	V
1630	7840	26	4,3	1
Parametry				
A (GPa)	B (GPa)	R_1 (-)	R_2 (-)	ω (-)
371	3,73	4,15	0,95	0,3

3. Rezultaty

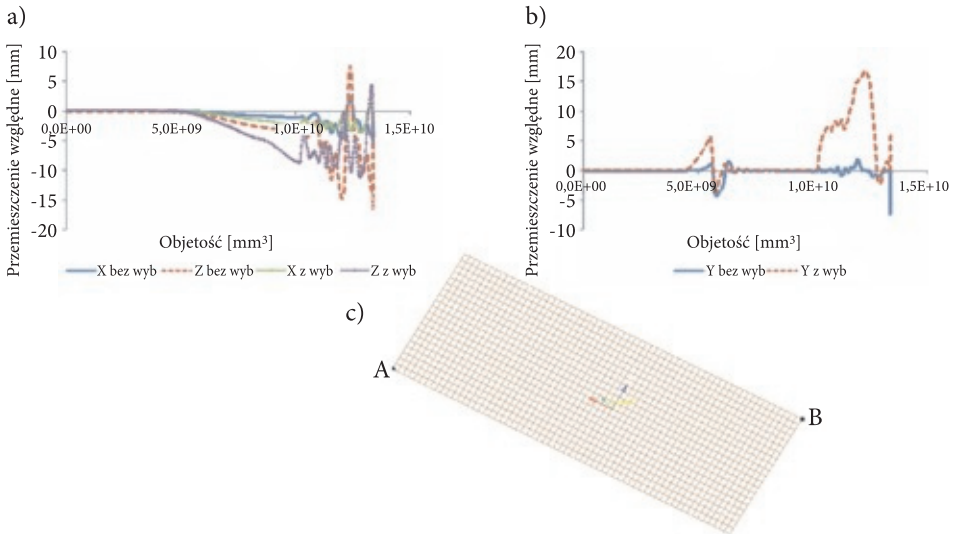
Weryfikacji obliczeń analitycznych [5] i analiz numerycznych dokonano, zestawiając wartość pionowego przemieszczenia górnej powierzchni kasety (jezdni) w funkcji zmiany objętości powłoki. Na rysunku 4 przedstawiono wykresy wykonane dla modułu nieobciążonego (4a) i dla modułu z dodatkową masą (4b).



Rys. 4. Pionowe przemieszczenie górnej powierzchni kasety bez obciążenia (a) oraz z obciążeniem dodatkowym (b)

Równanie stanu przypisane do elementów skończonych, które tworzą model wody, nie zostało zastosowane w przypadku obliczeń analitycznych. Z tego względu oszacowane wartości przemieszczenia pionowego górnej płaszczyzny jezdni są większe niż uzyskane z analiz numerycznych.

Napełnianie powłoki powoduje falowanie powierzchni wody, która nie może stanowić punktu odniesienia w ocenie stabilności modułu. Porównano zatem względne przemieszczenia dwóch skrajnych węzłów (A i B na rys. 5c) górnej powierzchni kasety modułu z obciążeniem dodatkową masą w układzie współrzędnych przedstawionym na rysunku 5c.



Rys. 5. Względne przemieszczenia dwóch skrajnych węzłów górnej powierzchni kasety modułu z dodatkową masą

Przeprowadzenie dodatkowych analiz z uwzględnieniem detonacji ładunku umożliwiło zbadanie wpływu powstałej fali uderzeniowej na stabilność modułu. Na rysunku 5a zaprezentowano wykresy względnych przemieszczeń X i Z (w płaszczyźnie wody) węzłów, natomiast na rysunku 5b względnego przemieszczenia Y.

4. Przykład zastosowania

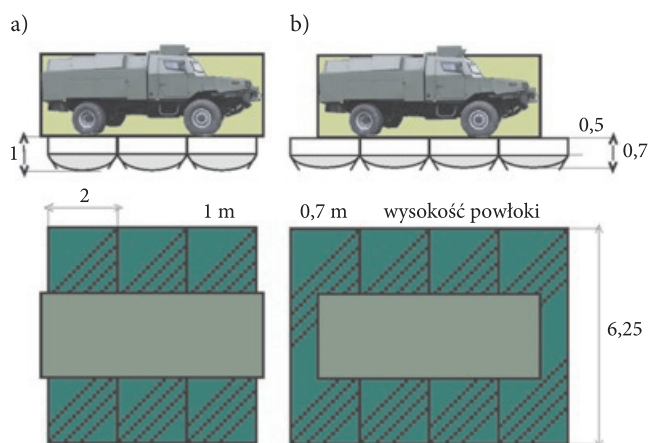
Przydatność prezentowanego rozwiązania wykazano w odniesieniu do przeprawy transportera opancerzonego Żubr P [6]. Jego wymiary oraz masę przedstawiono w tabeli 3.

TABELA 3

Specyfikacja techniczna transportera opancerzonego Żubr P [6]

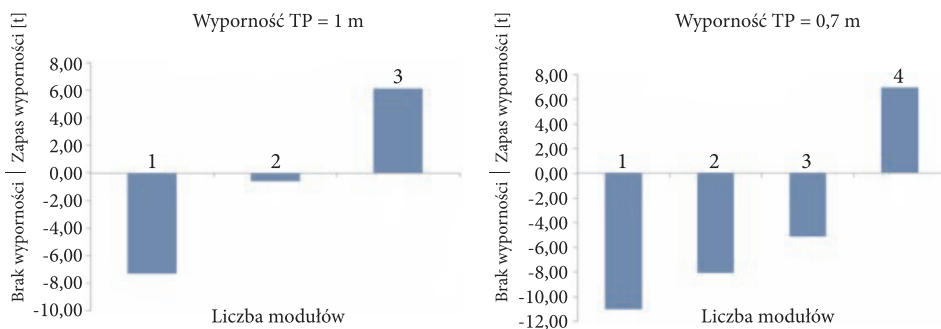
	Masa [kg]		Wymiary [mm]
DMC	14000	Rozstaw osi	3240 (3690)
Masa własna	12000	Rozstaw kół —	2040
Max. nacisk na oś przednią	5200	Długość całkowita	6450
Max. nacisk na oś tylną	9500	Szerokość całkowita	2450

Wymiary gabarytowe pojedynczego modułu uniemożliwiają dokonanie przeprawy pojazdu opancerzonego Żubr P. Rozstaw kół i osi transportera opancerzonego wymaga użycia w tym celu zestawu złożonego z co najmniej trzech modułów kasetowych (rys. 6a). Ze względu na całkowite wymiary oraz masę pojazdu wskazane jest zastosowanie przeprawy złożonej z czterech kaset (rys. 6b).



Rys. 6. Transporter opancerzony Żubr P na pontonowym moście kasetowym

W przypadku zestawu trzech modułów uzyskanie pożądanej siły wyporu wymaga napełnienia powłoki w pojedynczej kasecie do wysokości 1 m (rys. 7a). Dla zestawu czterech modułów wysokość ta może zostać ograniczona do 0,7 m (rys. 7b).



Rys. 7. Wyporności pontonowego mostu kasetowego z transporterem opancerzonym Żubr P dla zestawu trzech (a) oraz czterech (b) modułów

5. Podsumowanie

Odpowiednie ukształtowanie geometrii elastycznej powłoki pontonu modułu mostu pozwala osiągnąć pożądane rozkłady i wielkości siły wyporu, zapewniające nośność i stabilność pojedynczego modułu. Powtarzalność modułów, zunifikowane mechanizmy złącza, szybkozłącza do wypełniania sprężonym powietrzem pontonów w poszczególnych modułach oraz regulacja wyporności zestawionej przeprawy umożliwiają dowolne kształtowanie wymiarów i konfiguracji budowanych systemów pływających oraz przepraw pozornych. Zastosowanie wysokowytrzymałej tkaniny na powłokę pontonu umożliwia użycie jej w warunkach ekstremalnych, w tym w przypadkach występowania nieprzygotowanego podłoża, np. kamienistego dna rzeki. Ponadto, dodatkowe wykorzystanie wysoko wytrzymałych materiałów na konstrukcję warstwy wierzchniej kasy, stanowiącej jednocześnie jezdnię, wpłynie na zwiększenie odporności balistycznej modułu pontonowego mostu kasetowego.

Analityczne określenie wyporności modułu pozwala wstępnie oszacować jego zachowanie (np. zanurzenie powierzchni jezdni) w idealnych warunkach przy założonych parametrach konstrukcyjnych, takich jak wymiary i masa. Zastosowanie metody elementów skończonych umożliwia odwzorowanie zachowania pojedynczego modułu mostu pontonowego w rzeczywistych warunkach, tj. napełniania powłoki i otwierania drzwi kasy umieszczonej na wodzie. Przedstawione wyniki etapu wstępnego prac wykazały, że moduł, który nie jest częścią składową mostu, zachowuje stabilność przy jego samodzielnym wykorzystaniu. Duże przemieszczenia konstrukcji występują w ostatnim etapie napełniania powłoki i są spowodowane działaniem siły wyporu, której wartość przekracza ciężar własny modułu oraz przenoszonego

obciążenia. Odwzorowanie oddziaływania pozostałych modułów tworzących przeprawę ograniczy przemieszczenia w płaszczyźnie równoległej do wody.

Uzyskane rozwiązanie może pomóc w unowocześnieniu techniki inżynierskiej stosowanej w siłach zbrojnych. Nie mniej ważna jest możliwość zastosowania w obszarze obrony cywilnej w czasie klęsk żywiołowych oraz w przypadku potrzeb doraźnych, takich jak wykorzystywanie modułów jako tratw, promów, pomostów, kładek, przejść dla pieszych.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego rozwojowego nr O R00 0079 09, finansowanego w latach 2009-2011 przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Artykuł wpłynął do redakcji 26.05.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w listopadzie 2010 r.

LITERATURA

- [1] W. KRASOŃ, M. WIECZOREK, *Analiza numeryczna schematów mieszanych mostu pływającego PP-64 obciążonego według norm NATO*, SYSTEMS, Journal of Transdisciplinary Systems Science, Special Issue, 8, 1, 2003.
- [2] http://www.ratownictwo.com.pl/resqtec/nt132_pl0602a4_pliki/frame.htm
- [3] J.-H. KIM, H.-C. SHIN, *Application of the ALE technique for underwater explosion analysis of a submarine liquefied oxygen tank*, Ocean Engineering, vol. 35, no. 8-9, 2008, 812-822.
- [4] *LS-Dyna Theory Manual*, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, 2007.
- [5] A. DEREWOŃKO, T. NIEZGODA, K. KOSIUCZENKO, P. BOGUSZ, *Cassette Pontoon Bridge Of High Mobility*, IInd International Scientific Conference „Transport Problems”, Katowice-Kraków, 2010.
- [6] http://www.amz.pl/pl/pojazdy_wojskowe/transporter/zubr/zubr, 13.05.2010

A. DEREWOŃKO, T. NIEZGODA, G. SŁAWIŃSKI

Stability estimation of a single segment of a pontoon bridge

Abstract. The cassette pontoon bridge enables river crossing for people and equipment. The cassette pontoon bridge is considered as an object assembled as any composition of the single buoyant segments. The single buoyant segment is a tight cuboid (cassette) which is partially immersed. The cassette buoyancy depends on weight of a cassette. The air cushion which can be filled with pressured air is stored inside the cassette. The buoyancy is caused by the air pressure increasing during filling the air cushion. The paper aims mainly at estimating the stability of a single segment of the pontoon bridge.

Keywords: mechanics, stability, shock wave

