Biuletyn WAT
Vol. LXIII, Nr 4, 2014

Algorytm opisujący rozkład ciśnienia od niekontaktowego wybuchu miny morskiej

RADOSŁAW KICIŃSKI, BOGDAN SZTUROMSKI

Akademia Marynarki Wojennej, 81-103 Gdynia, Śmidowicza 69,
radzio1407@gmail.com, b.szturomski@amw.gdynia.pl

Streszczenie. Celem pracy było opracowanie algorytmu obliczeniowego opisującego rozkład ciśnienia fali uderzeniowej w przestrzeni wywołany niekontaktowym wybuchem ładunku TNT oraz wykonanie procedury w języku programowania Fortran, opisującej powyższy rozkład ciśnienia w formie dyskretnej na zwilżonej powierzchni kadłuba okrętu. Symulacje przeprowadzono przy użyciu programu Abaqus. W pracy zaprezentowano również opisy przebiegów ciśnień według różnych autorów oraz przedstawiono je na wykresach. Sformułowano także wnioski przemawiające za skutecznością używania algorytmu.
Słowa kluczowe: wybuch podwodny, fala uderzeniowa, CAE, TNT, okręt podwodny typu Kobben
DOI: 10.5604/12345865.1131459

1. Zagrożenia minowe na morzu

Na akwenach całego świata prowadzone są działania wojenne, dochodzi do aktów terrorystycznych oraz piractwa, wobec czego okręty wojenne, statki handlowe i inne obiekty morskie narażone są na oddziaływania spowodowane niekontaktowymi wybuchami podwodnymi min morskich różnego typu.

Mina morska to ładunek materiału wybuchowego wraz z urządzeniami zabezpieczającymi, reagującymi i zapalającymi umieszczony w kadłubie wodoszczelnym służącym do rażenia podwodnej części kadłuba okrętu. Wśród wielu podziałów i klasyfikacji min zasadniczy podział dotyczy miejsca miny w ośrodku wodnym i sposobu oddziaływania na jednostkę pływającą.

Należy również rozróżnić niekontaktowość wybuchu podwodnego z punktu widzenia mechaniki oraz broni podwodnej. Przykładowo wybuch torpedy o ładunku materiału wybuchowego wynoszącym około 250 kg, z zapalnikiem niekontaktowym, którego promień wykrywania wynosi od 7-10 m, spowoduje powstanie pęcherza gazowego o promieniu równym promieniowi wykrywania, co według [2] czyni go wybuchem kontaktowym.

W tabeli 1 przedstawiono charakterystykę niektórych typów min różnych państw, aby uwidocznić wielkość zagrożenia.

Tabela 1

Zestawienie wybranych min państw europejskich [12]

Państwo	Nazwa	Głębokość stawiania [m]	Masa MW [kg]
Miny stacjonarno-kotwiczne			
Francja	H 30	1-500	300
Hiszpania	MO-90	5-340	300
Rosja	AMG-1	13-100	262
	GM	10-200	300
	Lira	25-250	250
	M-08	6-110	115
Miny stacjonarno-denne			
Francja	MCC 23	150	530
	TSM 3530	100	1000
Niemcy	FG 1	60	535
	DM 61	60	450
Rosja	AMD-1000	4-200	782
	MDM-1	12-120	1120
	MDM-5	8-300	1350
Szwecja	BGM 100 Rockan	5-100	105
Wielka Brytania	M Mk 2	9-36	462
	Sea Urban	5-200	600
	MN 102 Murena	5-300	630

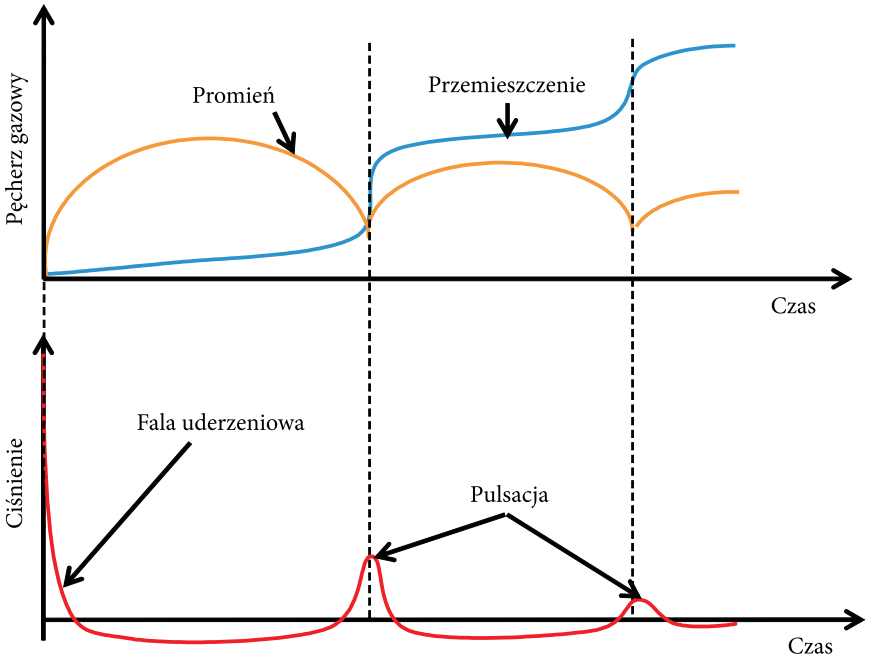
Jak wynika z powyższej tabeli, niektóre państwa posiadają miny o ładunku TNT bliskim 1000 kg. Przy tak dużym ładunku ciśnienie wybuchu jest w stanie zniszczyć praktycznie każdą konstrukcję morską w odległości nawet do 100 m od epicentrum [4].

2. Teoria wybuchu podwodnego

Wybuch podwodny jest gwałtownym naruszeniem równowagi układu w wyniku detonacji materiału wybuchowego w środowisku wodnym. Podczas eksplozji materiał wybuchowy o stałej konsystencji przekształca się w produkt gazowy o objętości równej objętości materiału wybuchowego, temperaturze rzędu $T \approx 3300$ K i ciśnieniu sięgającym $p \approx 14\,000$ MPa. Przy tak dużym ciśnieniu powstaje pęcherz gazowy oraz sferyczna fala uderzeniowa, która rozprzestrzenia się w ośrodku [2].

Pęcherz gazowy to mieszanina gazów powybuchowych wypełniających objętość materiału wybuchowego przed detonacją. Detonacja jest procesem bardzo gwałtownym. Wskutek rozprężania pęcherz rozszerza się do pewnego promienia, a następnie jest tłumiony przez ciśnienie hydrostatyczne wody, co powoduje tzw. pulsację. Czas trwania pulsacji zależy od masy ładunku oraz głębokości detonacji. Pulsacja trwa do czasu wypłynięcia pęcherza na powierzchnię. Czas drugiej pulsacji wynosi około 70%, a trzeciej około 50% pierwszej pulsacji [2].

Detonacja i każda pulsacja powoduje powstanie fali ciśnienia, zwanej też falą uderzeniową. Rozszerzający się pęcherz gazowy oddziałuje na otaczającą go warstwę wody, tworząc sferyczną falę uderzeniową (rys. 1). Fala ta w początkowej fazie przemieszcza się z prędkością rzędu $v \approx 5000 \div 8000$ m/s. Następnie cząsteczki



Rys. 1. Schemat wybuchu podwodnego oraz przemieszczania się fali uderzeniowej [4]

wody działają na warstwy wody sąsiadującej, tracąc na prędkości, i przemieszczają się dalej w wodzie z prędkością dźwięku, która wynosi około $c_o \approx 1500$ m/s. Profil fali ciśnienia oraz jej wartość opisywano przez wielu badaczy. Głównym z nich jest R.H. Cole, którego publikacje stanowią podstawy większości badań na ten temat. Problem opisywany jest również przez innych autorów [1, 2, 3, 5, 6, 7].

Wzory Cole'a przedstawiono poniżej. Zostały one ustalone w wyniku pomiarów wybuchu ładunku TNT o masie 70÷136 kg. Profil fali ciśnienia przedstawiono według następującego wzoru:

$$p(t) = 52{,}3\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^{1{,}13} \cdot e^{-\frac{t}{\theta}} \text{ [Pa]}, \tag{1}$$

$$\theta = 0{,}093\sqrt[3]{m}\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^{-0{,}22} \text{ [s]}, \tag{2}$$

gdzie: m — masa ładunku [kg];
r — odległość [m];
$p_{\max}$ — ciśnienie [MPa];
θ — stała czasowa [ms];
t — czas [ms].

Wzory Cole'a zostały przedstawione w 1948 roku. Od tego czasu były poprawiane przez różnych autorów. Zestawienie oraz porównanie opisów profili ciśnień można znaleźć w pracy [4]. Obecnie najczęściej stosowanym opisem wybuchu podwodnego jest ten zaproponowany przez Geersa i Huntera:

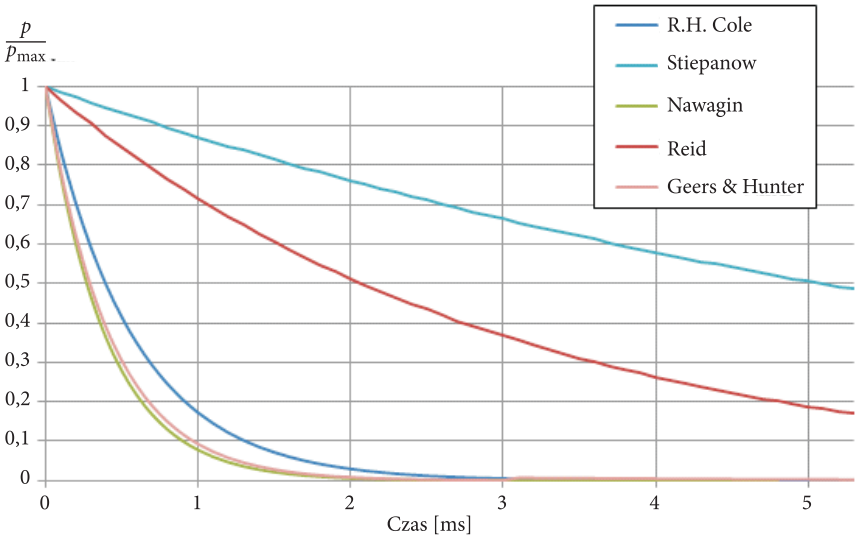
$$p_{\max}(\mathrm{t}) = P_c\left(\frac{a_c}{r}\right)^{1+A} \cdot e^{-\frac{t}{\theta}} \text{ [Pa]}, \tag{3}$$

$$\theta = v_c\left(\frac{a_c}{r}\right)^{B} \text{ [s]}, \tag{4}$$

gdzie (dla ładunku TNT):
a_c — promień ładunku [m];
r — odległość [m];
t — czas [ms];
$P_c = 1{,}42$; $v_c = 0{,}992$; $A = 0{,}13$; $B = 0{,}18$.

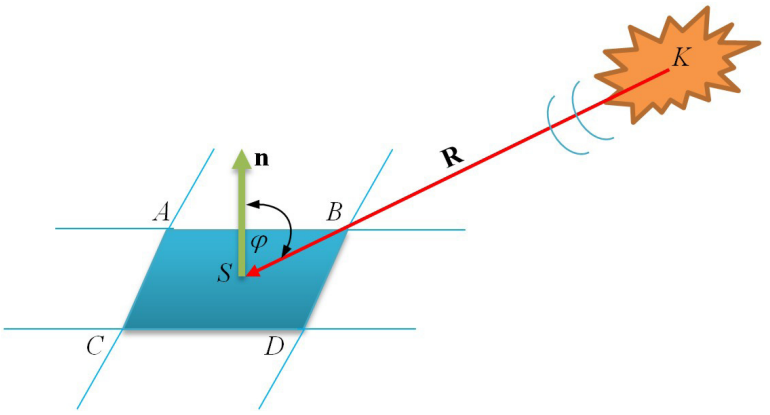
Szerszy opis oraz porównanie różnych profili fali ciśnienia można znaleźć w pracy [4]. Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi fali ciśnienia opisywane przez różnych autorów. Jak widać, niektóre opisy odbiegają znacząco od opisu proponowanego przez Cole'a . Wynika to z faktu, że różni badacze wykonywali swoje pomiary w odmiennych warunkach. W pracy oparto się na wzorze ustalonym przez

Geersa i Huntera, ponieważ jest to jeden z najnowszych opisów oraz jest najbardziej zbliżony do wzorów Cole'a.



Rys. 2. Przebiegi czasowe ciśnień wg różnych autorów opisujące wybuch 70 kg TNT w odległości 25 m [4]

Wartość ciśnienia zmienia się w zależności od kąta padania. Zmienia się również czas, po jakim impuls ciśnienia dotrze w dane miejsce. W obliczeniach MES należy więc uwzględnić kąt padania na poszczególny element. Do uwzględniania kąta padania fali na dany element (rys. 3) niezbędne jest wyznaczenie dwóch wektorów: wektora normalnego do elementu **n** oraz wektora fali ciśnienia **R**, którego początek znajduje się w epicentrum wybuchu *K*, a koniec w środku elementu *S*.



Rys. 3. Element obciążony falą ciśnienia

Jeżeli element powłokowy wyznaczony jest w przestrzeni przez cztery węzły o współrzędnych[4]:

$$A\left(x_a;y_a;z_a\right),\ B\left(x_b;y_b;z_b\right),\ C\left(x_c;y_c;z_c\right),\ D\left(x_d;y_d;z_d\right), \tag{5}$$

to współrzędne środka elementu $S\left(x_s;y_s;z_s\right)$ oblicza się jako średnią danych współrzędnych:

$$\begin{aligned} x_s &= \frac{x_a+x_b+x_c+x_d}{4}, \\ y_s &= \frac{y_a+y_b+y_c+y_d}{4}, \\ z_s &= \frac{z_a+z_b+z_c+z_d}{4}. \end{aligned} \tag{6}$$

Przyjmując, że epicentrum wybuchu znajduje się w punkcie $K\left(x_k;y_k;z_k\right)$, wówczas składowe wektora **R** wynoszą:

$$R_x = x_s - x_k, \quad R_y = y_s - y_k, \quad R_z = z_s - z_k. \tag{7}$$

Współrzędne wektora normalnego **n** do rozpatrywanego elementu otrzymuje się poprzez pomnożenie dwóch wektorów, np. **AB** i **CB**, zbudowanych na bokach elementów, których składowe wynoszą:

$$\begin{aligned} AB_x &= x_a - x_b, \quad CB_x = x_c - x_b, \\ AB_y &= y_a - y_b, \quad CB_y = y_c - y_b, \\ AB_z &= z_a - z_b, \quad CB_z = z_c - z_b, \end{aligned} \tag{8}$$

wówczas $\mathbf{n} = \mathbf{AB} \times \mathbf{CB}$:

$$\begin{aligned} n_x &= AB_y \cdot CB_z - AB_z \cdot CB_y, \\ n_y &= AB_z \cdot CB_x - AB_x \cdot CB_z, \\ n_z &= AB_x \cdot CB_y - AB_y \cdot CB_x. \end{aligned} \tag{9}$$

Cosinus kąta φ między wektorami **n** i **R** wyznacza się z definicji iloczynu skalarnego:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{R} = \left|\mathbf{n}\right| \cdot \left|\mathbf{R}\right| \cdot \cos\varphi, \tag{10}$$

więc:

$$\cos\varphi = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{R}}{\left|\mathbf{n}\right| \cdot \left|\mathbf{R}\right|} = \frac{n_x \cdot R_x + n_y \cdot R_y + n_z \cdot R_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} \cdot \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}}. \tag{11}$$

Ostatecznie wartość ciśnienia na elemencie wynosi

$$p_{\text{elementu}}(t) = p_{\max}(t) \cdot \cos\varphi \ [\text{Pa}]. \tag{12}$$

3. Algorytm obliczeniowy

Obecne symulacje komputerowe wykorzystują bardzo duże zasoby procesora do obliczeń związanych z wybuchami podwodnymi. Przyczyną tego jest złożoność zjawiska i samego modelu. W większości przypadków wykorzystuje się modele zarówno badanych obiektów, jak i wody je otaczającej. Powoduje to znaczne zwiększenie liczby elementów MES i wydłużenie czasu obliczeń. Dużym ułatwieniem byłoby pominięcie siatki wody otaczającej, zachowując jednak właściwości fizyczne zjawiska.

Na podstawie powyższych rozważań skonstruowano algorytm obliczeniowy, który umożliwił wykluczenie elementów otaczającego płynu, co znacznie skróci czas obliczeń. Algorytm zaprogramowano według wzoru zaproponowanego przez Geersa i Huntera. Podobne próby były już realizowane przez profesora Stanisława Dobrocińskiego z Akademii Marynarki Wojennej. Opierały się one jednak na wzorze opracowanym przez R.H. Cole'a i na starszych rozwiązaniach MES. Rozwiązanie to jest przedstawione w pracach [8, 9, 10]

Algorytm skonstruowano tak, aby wyznaczał ciśnienie na poszczególnych elementach w każdym kroku czasowym. Zastosowano odpowiednie warunki pomijające elementy, do których fala uderzeniowa nie dotarła. Ma to na celu redukcję czasu obliczeń poprzez zmniejszenie liczby elementów w pętli. Algorytm wczytuje dane podane w tabeli 2. Trzeba wprowadzić masę, zanurzenie i gęstość ładunku, współrzędne węzłów, etykiety elementów i prędkość rozchodzenia się fali (prędkość dźwięku w danym ośrodku). Dla założonego algorytmu należy przyjąć, że epicentrum wybuchu znajduje się w punkcie 0,0,0. W każdym kroku czasowym algorytm wyznacza wartości ciśnień, stałych czasowych oraz współrzędne frontu fali (rys. 4). Całość wykonuje się w pętli od t_p do t_k z krokiem czasowym Δt. Krok czasowy musi być tak dobrany, aby odzwierciedlić przebieg funkcji spadku ciśnienia.

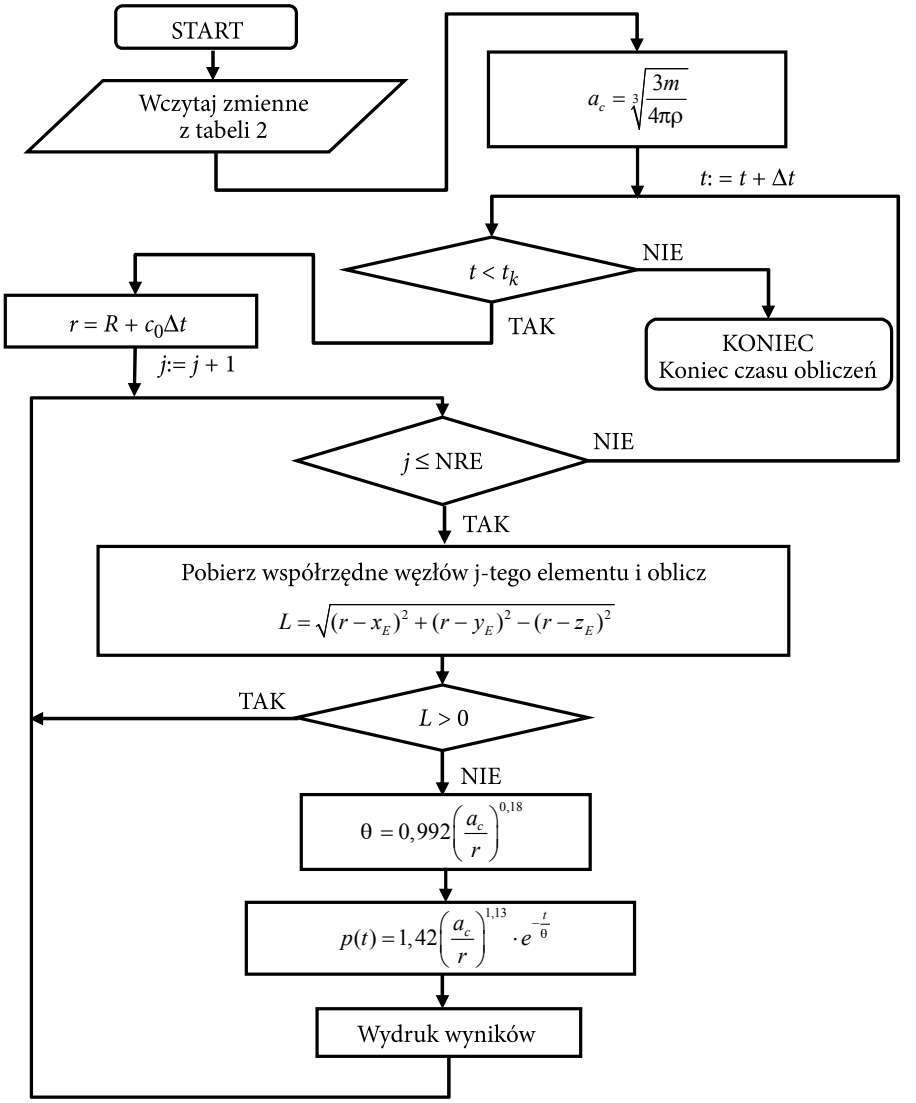
Tabela 2

Tabela zmiennych algorytmu

Masa ładunku	Gęstość ładunku	Odległość od epicentrum	Głębokość detonacji	Krok czasowy	Prędkość dźwięku	Liczba elementów	Współrzędne węzłów	Etykiety elementów
m	ρ	R	H	Δt	c_0	NRE	x_E, y_E, z_E	$j = 1, 2, 3\ldots$

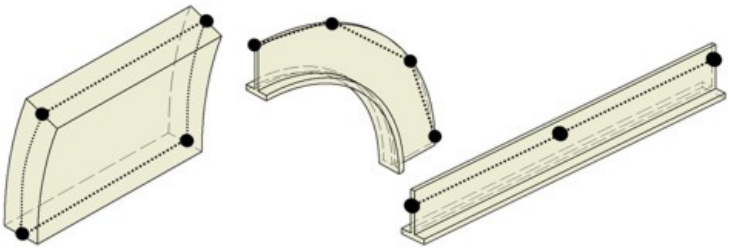
Następnie działanie algorytmu przetestowano na modelu okrętu podwodnego typu Kobben, którego geometrię odzwierciedlono w programie Abaqus/CAE. Do symulacji wykorzystano odpowiednie elementy powłokowe oraz belkowe celem zmniejszenia

elementów MES (rys. 5). Ostatecznie model zawierał 67 766 węzłów, 75 258 elementów, w tym 68 767 powłokowych oraz 5403 elementy belkowe (rys. 6 i 7).



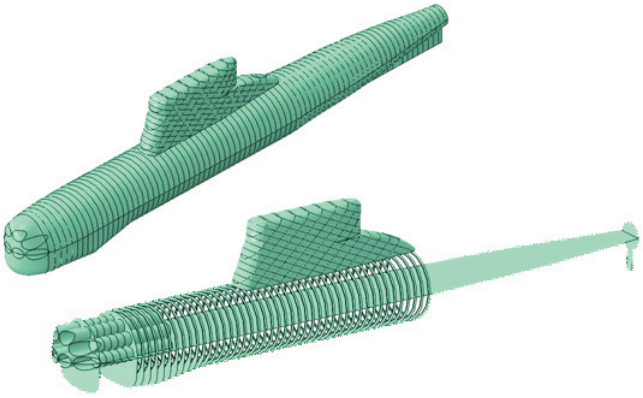
Rys. 4. Algorytm obliczeniowy rozkładu wartości ciśnienia

Ze względu na fakt, że geometrię wykonano z kilku części, należało zweryfikować poprawność zastosowanych łączeń. W początkowej fazie rozpoznano, że zastosowane więzy nie spełniają swojej funkcji, co wykazano przez analizę drgań własnych. Niektóre postacie drgań wykazały nieciągłości w modelu. Przedstawia to rysunek 8.

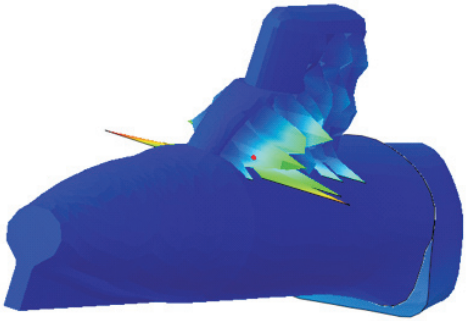


Rys. 5. Rodzaje elementów użytych w modelu

Rys. 6. Usztywnienia okrętu (lewa strona — powłokowe, prawa — belkowe) [4]

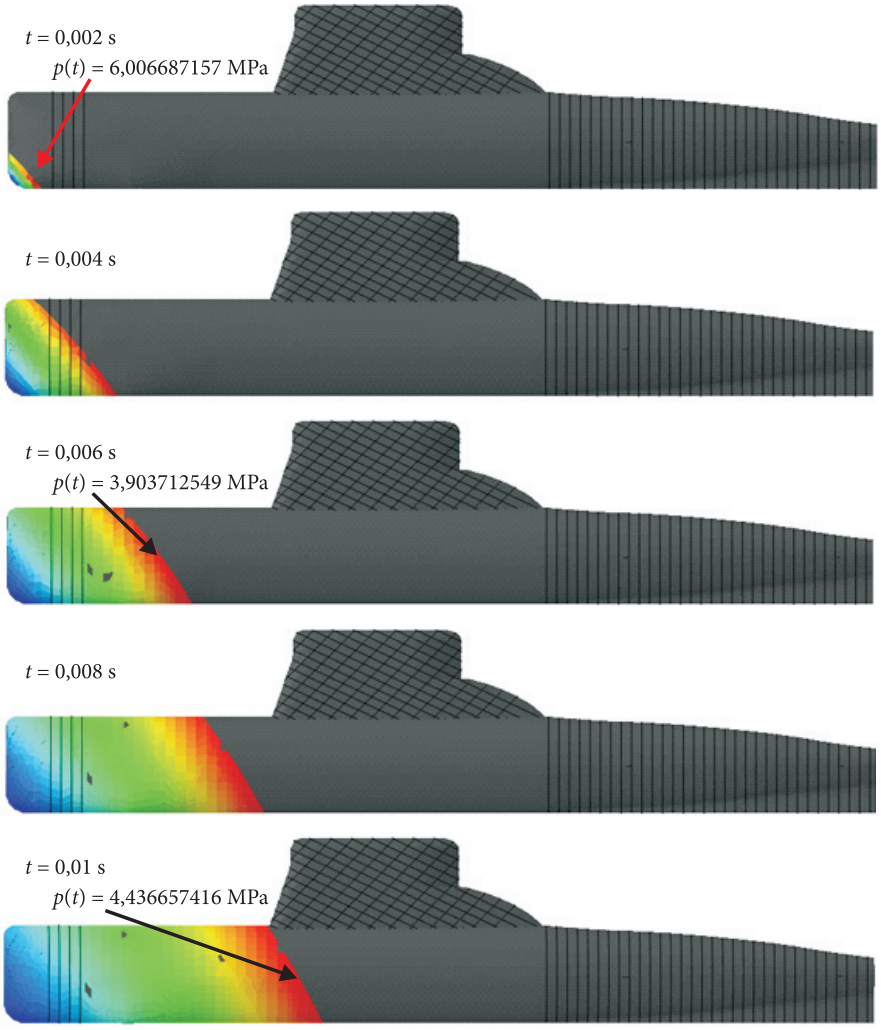


Rys. 7. Geometria okrętu podwodnego typu Kobben [4]



Rys. 8. 17 postać drgań własnych [4]

Rys. 9. Wybrane częstotliwości drgań własnych modelu [4]



Rys. 10. Rozkład ciśnienia od niekontaktowego wybuchu miny na kadłubie okrętu [4]

Następnie poprawiono wiązania przy wykorzystaniu odpowiednich komend w programie i przeprowadzono ponowną weryfikację. Wykazano, że w modelu nie występują nieciągłości i może on posłużyć do dalszych symulacji.

Wykonano symulację wybuchu 70 kg TNT w odległości 25 m od kadłuba. Poprawność działania algorytmu oceniono na podstawie analizy rozkładu na kadłubie okrętu wartości ciśnienia pochodzącego od niekontaktowego wybuchu miny. Wyniki analizy przedstawione na rysunku 10 wskazują na właściwy rozkład ciśnienia na symulowanym kadłubie okrętu.

4. Wnioski

W pracy wykazano przydatność zaproponowanego algorytmu. Można wykorzystywać go w każdej fazie budowy i eksploatacji okrętu, gdyż nie wymaga on dużego nakładu mocy obliczeniowej ani szczegółowego modelu CAE. Wykorzystanie algorytmu nie wymaga modelowania otaczającego płynu, co znacznie ułatwia wykonanie modelu, gdyż nie ma konieczności modelowania elementów akustycznych. Ułatwia także przeprowadzenie symulacji oraz skraca czas obliczeń.

Algorytm nie uwzględnia masy wody towarzyszącej, jest on przydatny w przypadku, gdy nie interesuje nas interakcja modelu z jego otoczeniem, a jedynie odporność udarowa konstrukcji. Nie uwzględnia on również pulsacji pęcherza gazowego, a także przemieszczeń pęcherza ku powierzchni. Znajduje zastosowanie wyłącznie dla pierwszego impulsu fali ciśnienia.

Praca będzie rozwijana w celu przeprowadzenia symulacji stanu deformacji i naprężenia w kadłubie okrętu podwodnego od niekontaktowego wybuchu miny. Praca będzie miała na celu uwidocznienie skutków podwodnej detonacji na konstrukcje morskie oraz ewentualnie ich zmniejszanie w przyszłości.

Artykuł opracowany na podstawie referatu z XXXII Seminarium KNS Wydziału Mechanicznego WAT, 15-17.05.2013 r.

Artykuł wpłynął do redakcji 29.11.2013 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 15.10.2014 r.

LITERATURA

[1] Cole R.H., *Underwater Explosions*, Princeton University Press, Princeton, 1948.

[2] Cudny K., Powierża Z., *Wybrane zagadnienia odporności udarowej okrętów*, Gdynia, 1978.

[3] Geers T.L., Hunter K.S., *An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble*, Boulder, 2002.

[4] Kiciński R., *Wyznaczanie rozkładu ciśnienia od niekontaktowego wybuchu miny na kadłubie okrętu typu Kobben* (praca inżynierska), AMW, Gdynia, 2013.

[5] Reid W.D., *The Response of Surface Ships to Underwater Explosions*, Defence Science and Technology Organisation, Melbourne, 1996.

[6] Stiepanow W.C., Sipilin P.M., Nawagin J.S., Pankratow W.P., *Tłoczenie Wybuchowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1968.

[7] Barnat W., *Wstęp do modelwoania wybuchu podwodnego pod pojazdem gąsienicowym*, Systems, Journal of Transdisciplinary System Science, vol. 16, no. 3, 2012.

[8] Dobrociński S., Szturomski B., Flis L., *Określenie obciążeń pojazdu morskiego od impulsu ciśnienia fali uderzeniowej*, III Konferencja Naukowo-Techniczna „Odporność udarowa konstrukcji", Rynia, 2002.

[9] Dobrociński S., Flis L., Szturomski B., *Wyznaczanie obciążenia zwilżonej części kadłuba pojazdu morskiego powodowanego niekontaktaktowym wybuchem podwodnym*, VII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Computer Aided Engineering", Wrocław–Polanica Zdrój, 2004.

[10] Dobrociński S., Szturomski B., Flis L., *Wyznaczenie ciśnienia obciążającego poszycie pojazdu morskiego wywołanego niekontaktowym wybuchem miny*, Zesz. Nauk. AMW, 43, 2 (150), 2003.

[11] Szturomski B., *Podstawy Metody Elementów Skończonych*, Wydawnictwo Akademickie AMW, Gdynia, 2011.

[12] Kuliś J., Frankowski D., *Miny morskie (1945-1998)*, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia, 1999.

R. KICIŃSKI, B. SZTUROMSKI

Algorithm describing pressure distribution of non-contact TNT explosion

Abstract. The aim of this study is to develop a computational algorithm, describing the shock wave pressure distribution in the space induced by non-contact TNT explosion. The procedure describes pressure distribution on a damp surface of the hull. Simulations have been carried out using Abaqus/CAE. The study also shows the pressure waveform descriptions provided by various authors and presents them in charts. The formulated conclusions convince efficiency of the algorithm application.
Keywords: Underwater explosion, shock wave, CAE, TNT, Kobben class submarine