

UNDERWATER SHOCK WAVE– EMPIRICAL RELATIONS

Beata Wojciechowska

Gdynia Maritime University
Faculty of Marine Engineering
ul. Morska 83-87, 81-225 Gdynia, Poland
tel.: +48 58 6901 331, fax.: +48 58 6901 399
email: bearud@am.gdynia.pl

Abstract

Underwater explosions, contrary to regular explosions, have not been so frequently considered in the literature. One of the basic parameters indispensable to impulsing load calculation is the pressure and its change in time at the front of shock wave, which caused by the underwater explosion. Basic equation referring to this problem were presented by R.H. Cole in the forties of the previous century. During this time they arouse great interest. Experiments were carried out many different countries with improvements.

What are the absolute and percentage differences of the other empirical dependences in relation to Cole equations and does it effect on the structural strength calculations of the elements of the structure such as ship plating?

The comparison of the selected dependences was made in this paper. Pressure change in time at the front of shock wave and pressure distributions along centre line of object are also presented.

In the result of the cumulative diagram analysis the pressure difference following from individual dependences and their impact on the structure load were discussed. R.H. Cole output equations are frequently set for TNT. When using by other explosive materials appropriate conversions are made.

Keywords: explosion, shock wave, pressure

PODWODNA FALA UDERZENIOWA – ZALEŻNOŚCI EMPIRYCZNE

Streszczenie

Wybuchy podwodne w odróżnieniu od powietrznych choć niemniej ważne doczekały się znacznie mniejszej ilości opracowań. Jednym z podstawowych parametrów niezbędnych do obliczeń obciążeń impulsowych jest wielkość ciśnienia oraz jego zmiana w czasie na czole fali uderzeniowej wywołanej wybuchem podwodnym. Podstawowe wzory w tym zakresie zostały przedstawione w latach czterdziestych ubiegłego wieku przez R.H. Cole'a i wzbudziły szerokie zainteresowanie. Doświadczenia powtarzano w innych państwach, wprowadzano poprawki nie unikając reklamy.

Powstaje pytanie: Jakie są różnice bezwzględne i procentowe innych zależności empirycznych w stosunku do wzorów Cole'a i czy ma to istotne znaczenie przy obliczeniach wytrzymałościowych konstrukcji lub jej elementów jak np. blach poszycia kadłuba okrętu?

W pracy dokonano zestawienia odpowiednich zależności, przedstawiono zmiany ciśnienia na czole fali uderzeniowej w czasie oraz rozkłady ciśnienia wzdłuż osi obiektu.

W wyniku analizy wykresu zbiorczego omówiono różnice ciśnień wynikające z poszczególnych zależności oraz ich wpływ na obciążenie konstrukcji. Wyjściowe wzory R.H. Cole'a najczęściej stosowane zostały ustalone dla trójnitrotoluenu. Przy zastosowaniu innych materiałów wybuchowych są stosowane odpowiednie przeliczniki.

Słowa kluczowe: wybuch, fala uderzeniowa, ciśnienie

1. Wstęp

Wybuchy podwodne mają duże znaczenie strategiczne, gospodarcze przy pracach podwodnych oraz technologiczne przy tłoczeniu półwyrobów. Ze względu na złożony charakter procesu wybuchu jego dokładna analiza wymaga jednoczesnego uwzględnienia wielu czynników takich jak: przebieg detonacji wybuchu, ściśliwość i lepkość ośrodka, powstawanie i przemieszczanie się

fali uderzeniowej, zjawisko dyssypacji energii, ruchu pęcherza gazowego w cieczy i zjawiska wtórnych pulsacji, oddziaływania przegrody. Zależności wzajemnego oddziaływania przegrody i fali uderzeniowej, odbicia, przenikania i przecinania się fal, kawitacji itd.

Jednoczesne uwzględnienie wszystkich czynników jest praktycznie niemożliwe, prowadzi do stosowania szeregu założeń upraszczających przy rozważaniach teoretycznych. Opis zjawiska wymaga dużej ilości wzorów czysto empirycznych. Przy korzystaniu ze wzorów teoretycznych należy zwrócić uwagę na założenia upraszczające przy wyprowadzaniu wzorów teoretycznych, zakres stosowalności wzorów empirycznych wynikający z warunków i zakresu prowadzonych badań, wiąże się z tym dokładność obliczeń w porównaniu z rzeczywistym przebiegiem zjawiska.

Woda podobnie jak powietrze jest ośrodkiem jednorodnym i mechanizm powstawania i propagacji fali uderzeniowej jest w obu przypadkach podobny. Przy wybuchu w powietrzu gęstość produktów wybuchu w początkowej fazie jest około 1000 razy większa od gęstości ośrodka, w wodzie natomiast jest porównywalna z gęstością ośrodka.

Podczas detonacji pod wodą materiał wybuchowy (stały) przekształca się w produkt gazowy o tej samej objętości i bardzo dużym ciśnieniu, wysokiej temperaturze. Nadciśnienie na granicy woda – ładunek dla trotylu osiąga wartość rzędu 15000 MPa, gęstość wody dochodzi do 1400 kg/m³, a temperatura do 863 K.

Pod działaniem ciśnienia wewnętrznego gaz rozszerza się i tworzy się pęcherz gazowy (kula), który charakteryzują dwa parametry: promień maksymalny osiągany w czasie pierwszej pulsacji oraz czas trwania pierwszej pulsacji. Oba parametry są zależne od rodzaju materiału wybuchowego oraz od głębokości na jakiej nastąpiła detonacja:

$$R_{MAX} = 1,53 \cdot \sqrt[3]{\frac{G}{1+0,1 \cdot H}} \quad [m], \quad (1)$$

$$t_p = 0,3 \cdot \frac{\sqrt[3]{G}}{1+0,1 \cdot H} \quad [s], \quad (2)$$

gdzie:

G– masa materiału wybuchowego [kg],

H– głębokość na jakiej nastąpił wybuch [m].

Ciśnienie fali uderzeniowej bardzo duże w pierwszym momencie szybko maleje w czasie. Wtedy pęcherz gazowy rozszerza się aż do uzyskania maksymalnego promienia, zależnego od ciśnienia hydrostatycznego wody, a ciśnienie gazu zmniejsza się do wartości mniejszej od ciśnienia hydrostatycznego. Po osiągnięciu maksymalnego promienia i minimalnego ciśnienia pęcherz gazowy wskutek oddziaływania ciśnienia sąsiadującej wody zmniejsza się, a jego ciśnienie wzrasta. Zjawisko to powtarza się kilkakrotnie zanim pęcherz nie wypłynie na powierzchnię wody. W ten sposób powstają dodatkowe impulsy ciśnienia których wartości wynoszą 10 – 15% poprzedniego impulsu. Podczas każdego takiego impulsu kula gazowa przemieszcza się w kierunku powierzchni wody.

Jeżeli wybuch następuje w pobliżu dna lub powierzchni wody wprowadza się odpowiednią poprawkę. Czas trwania drugiej pulsacji wynosi 70 % pierwszej, a trzeciej 50 % pierwszej. Rozszerzająca się kula gazowa oddziałuje na sąsiednie warstwy wody i na skutek jej, dużej gęstości i małej ściśliwości tworzy się kulista wodna fala uderzeniowa. Cząsteczki wody osiągają kolejno odpowiednią prędkość zorientowaną promieniowo od środka wybuchu. prędkość ta jest proporcjonalna do ciśnienia.

Obciążenie przekazywane przez pulsujący pęcherz gazowy jest obciążeniem wtórnym o znacznie mniejszej intensywności od impulsu fali uderzeniowej i w związku z tym zwykle pomijane w obliczeniach. Zdarzają się jednak przypadki gdy częstość drgań własnych kadłuba statku i pulsacji pęcherza pokrywa się co w rezultacie prowadzi do eliminacji jednostki.

2. Podstawowe zależności empiryczne

2.1. Wzory R.H. Cole'a

Ciśnienie maksymalne na czole fali uderzeniowej można obliczyć ze wzoru R.H. Cole'a:

$$p_{\max} = 52,3 \left(\frac{\sqrt[3]{G}}{R} \right)^{1,13} \quad [\text{MPa}], \quad (3)$$

gdzie:

G – masa ładunku trójnitrotoluenu [kg],

R – odległość od środka wybuchu do danego punktu belki (kadłuba okrętu) [m],

w odległości $5 R_0 < R < 1000 R_0$. Można je stosować również z mniejszą dokładnością dla $R > 1000 R_0$ [2, 4, 11].

Rysunki 1 – 4a przedstawiają graficzną prezentację spadku ciśnienia w czasie, rysunki 1 – 4b przedstawiają rozkład ciśnienia wzdłuż osi belki i obwiednie jego wartości maksymalnych. Przebieg nadciśnienia na czole fali uderzeniowej można aproksymować krzywą wykładniczą:

$$p(t) = p_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{\Theta}}, \quad (4)$$

gdzie:

t – czas [s],

Θ – stała czasowa [s].

Stałą czasową wyznacza się ze wzoru:

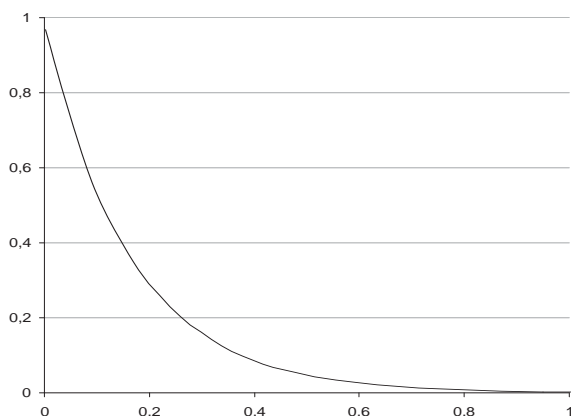
$$\Theta = 0,093 \cdot G^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{G^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{-0,22} \quad [\text{ms}]. \quad (5)$$

Zależność ustalona w wyniku pomiarów przy wybuchach ładunków trójnitrotoluenu o masie 70 g do 136 kg przy $H=3-10$ m.

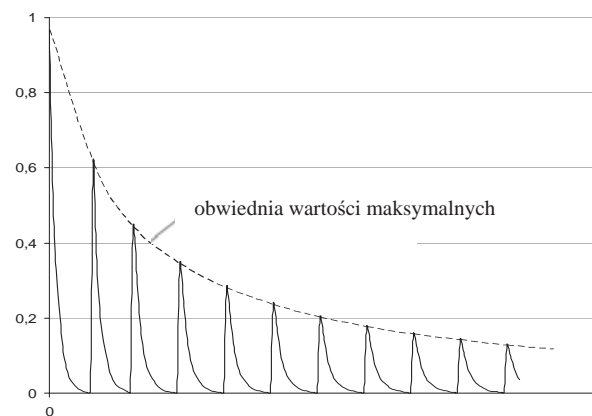
gdzie:

H [m] – głębokość zanurzenia.

a)



b)



Rys. 1. Zależność ciśnienia w czasie (a) i rozkład ciśnienia wzdłuż osi belki (b)

Fig. 1. Pressure dependence versus time (a) and pressure distribution along the centre line of beam (b)

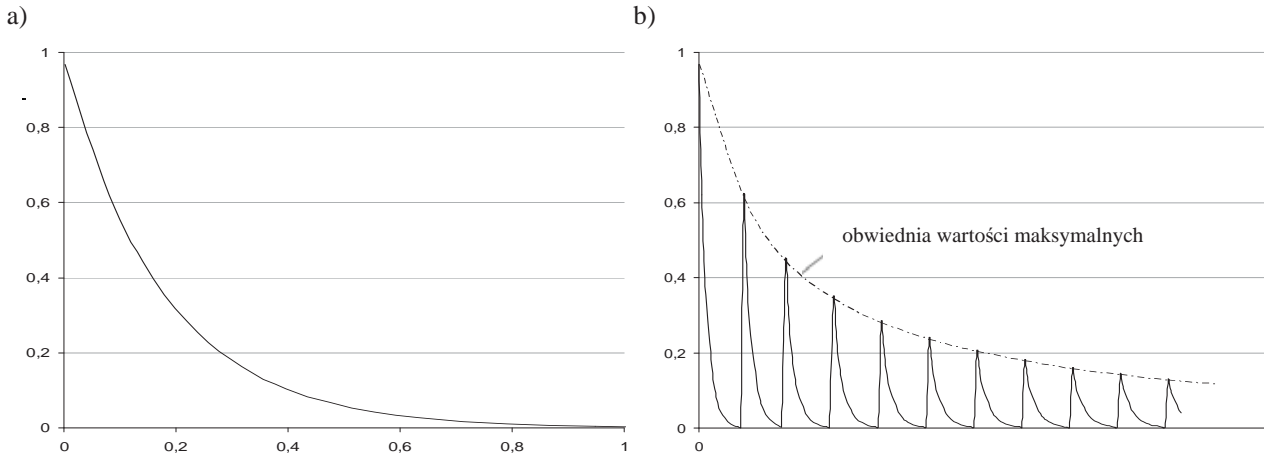
2.2. Wzory R.H. Cole'a z poprawkami Stiepanowa

Wg. Stiepanowa [12, 13] dla trójnitrotoluenu:

$$\left. \begin{array}{l} p_{\max} \\ p(t) \end{array} \right\} \text{ j.w.} \quad (6)$$

$$\Theta = 0,10 \cdot G^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{R}{G^{\frac{1}{3}}} \right)^{0,24}$$

Zależność ustalona w wyniku pomiarów przy wybuchach ładunków trójnitrotoluenu o masie 70 g do 136 kg przy H=3-10 m, gdzie:
H[m] – głębokość zanurzenia.



Rys. 2. Zależność ciśnienia w czasie (a) i rozkład ciśnienia wzdłuż osi belki (b)
Fig. 2. Pressure dependence versus time (a) and pressure distribution along the centre line of beam (b)

2.3. Wzory R.H. Cole'a z poprawkami wprowadzonymi przez J.S. Navagina [1, 13]

$$p_{\max} = 53 \cdot \left(\frac{G^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1,19}$$

$$p(t) \text{ j.w.} \quad \text{dla } 0,05 \leq \frac{G^{\frac{1}{3}}}{R} \leq 4 \left[\frac{\text{kg}^{\frac{1}{3}}}{\text{m}} \right] \quad (7)$$

$$\Theta = 0,07 \cdot G^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{R}{G^{\frac{1}{3}}} \right)^{0,17}$$

2.4. Inne postacie wzoru R.H. Cole'a:

Wg. [3, 11, 14] dla trotylu:

$$p_{\max} = 44 \cdot \left(\frac{G^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1,5} \quad 6 < \bar{r} < 12$$

$$p_{\max} = 52,3 \cdot \left(\frac{G^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1,13} \quad 12 < \bar{r} < 240$$

$$p(t) = p_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{\Theta}} \quad t < \Theta$$

$$p(t) = p_{\max} \cdot \frac{0,368}{\frac{t}{\Theta}} \quad \Theta < t < (5+10) \cdot \Theta$$

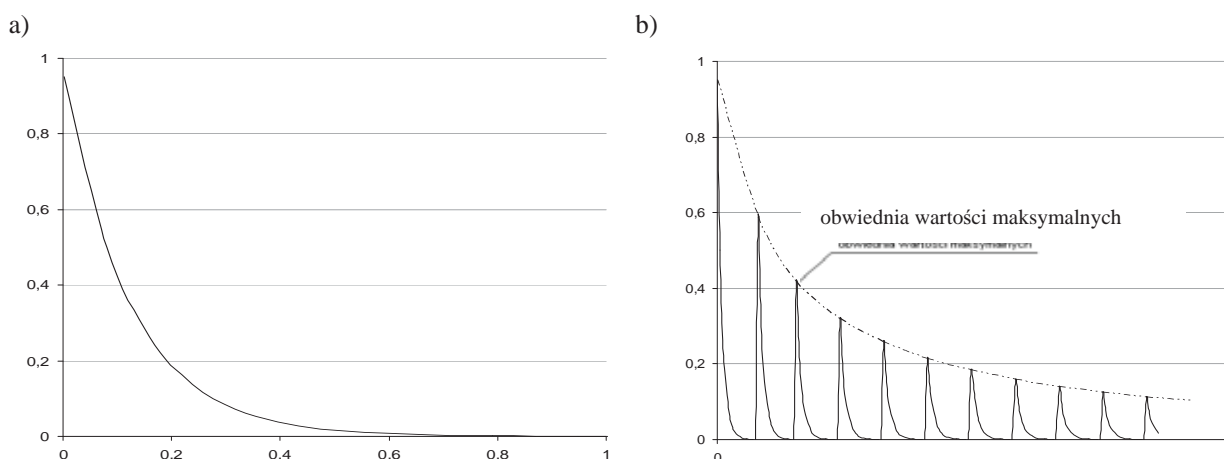
$$\Theta = 3,5 \cdot \sqrt{\log \bar{r} - 0,9} \quad 30 < \bar{r} < 240$$

gdzie:

R [m] – odległość,

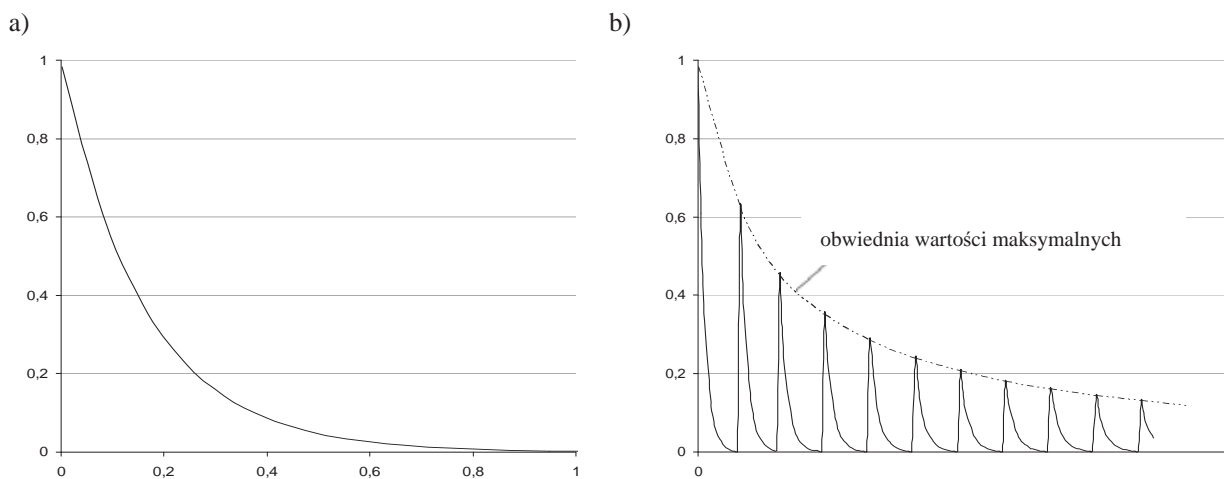
R_0 [m] – promień ładunku,

$$\bar{r} = \frac{R}{R_0}; \text{ dla trotylu } \gamma = 1,6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}.$$



Rys. 3. Zależność ciśnienia w czasie (a) i rozkład ciśnienia wzdłuż osi belki (b)

Fig. 3. Pressure dependence versus time (a) and pressure distribution along the centre line of beam (b)



Rys. 4. Zależność ciśnienia w czasie (a) i rozkład ciśnienia wzdłuż osi belki (b)

Fig. 4. Pressure dependence versus time (a) and pressure distribution along the centre line of beam (b)

2.5. Zależności empiryczne dla innych materiałów:

Dla niektórych materiałów wybuchowych również ustalono wzory empiryczne. Przykładowo tabela 1 przedstawia podstawowe zależności dla pentolitu.

Tab. 1. Ciśnienie i stała czasowa
 Tab. 1. Pressure and time - constant

$p_{\max} = 6,7 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{R_0}{R}\right)^{1,95}$ $p_{\max} = 1,52 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{R}{R_0}\right)^{1,13}$ $p(t) = 1,52 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{R_0}{R}\right)^{1,13} \cdot e^{-\frac{t}{\Theta}}$ $\Theta = 0,093 \cdot G^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{G^{\frac{1}{3}}}{R}\right)^{-0,22}$	$1 < \frac{R}{R_0} < 5$ $7 < \frac{R}{R_0} < 1000$ $0 < \frac{t}{\Theta} < 1$ $7 < \frac{R}{R_0} < 1000$	pentolit	10, 11, 14	R_0 [m] – promień ładunku kulistego c_0 [m/s] – prędkość dźwięku w wodzie
$p(t) \text{ j.w.}$ $p_{\max} = 0,643 \cdot 10^4 \cdot \frac{R}{R_0}$	$\frac{R}{R_0} > 1000$	pentolit	7, 11	

3. Równoważnik trotylowy dla innych materiałów wybuchowych

Podane wyżej zależności empiryczne ustalono dla trotylu. Przy obliczeniach dla innych materiałów korzystamy z zależności:

$$G_1 \cdot E_1 = G \cdot E, \quad (9)$$

gdzie:

E_1 – energia właściwa przemiany wybuchowej danego materiału [MJ/kg],

E – energia właściwa przemiany wybuchowej trotylu [MJ/kg].

$$G = G_1 \cdot \frac{E_1}{E} = G_1 \cdot \delta, \quad (10)$$

gdzie:

$\delta = \frac{E_1}{E}$ - współczynnik trotylowy.

Przy przyjętych oznaczeniach G jest ciężarem ładunku kulistego,

$$G = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \gamma, \quad (11)$$

skąd możemy wyznaczyć promień ładunku R_0 , dla znanego ciężaru właściwego γ , dla trotylu

dla $\gamma = 1600 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ otrzymamy:

$$R_0 = 0,053 \sqrt[3]{G}, \quad (12)$$

gdzie:

R_0 – promień [m],

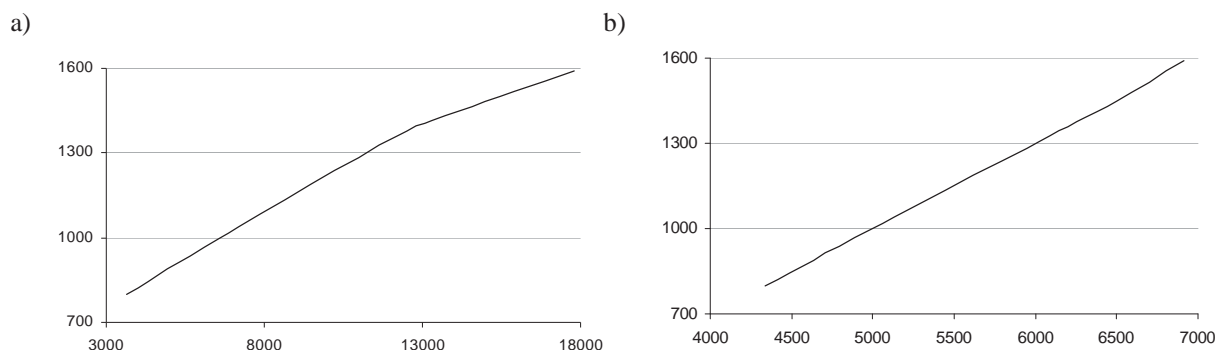
G – masa ładunku [kg].

Wprowadzenie współczynnika korygującego dla innych materiałów niż trotyl na zasadzie energetycznego podobieństwa nie daje wystarczającej dokładności. Nie uwzględnia bowiem takich czynników jak: prędkość detonacji, objętość tworzących się gazów, równanie stanu produktów detonacji itp. Wzory te są słuszne przy umieszczeniu ładunku w ośrodkach nieograniczonych.

Należy zwrócić uwagę, że podstawowe dane charakteryzujące materiały wybuchowe stosowane w praktyce mogą się nieco różnić przy tej samej nazwie.

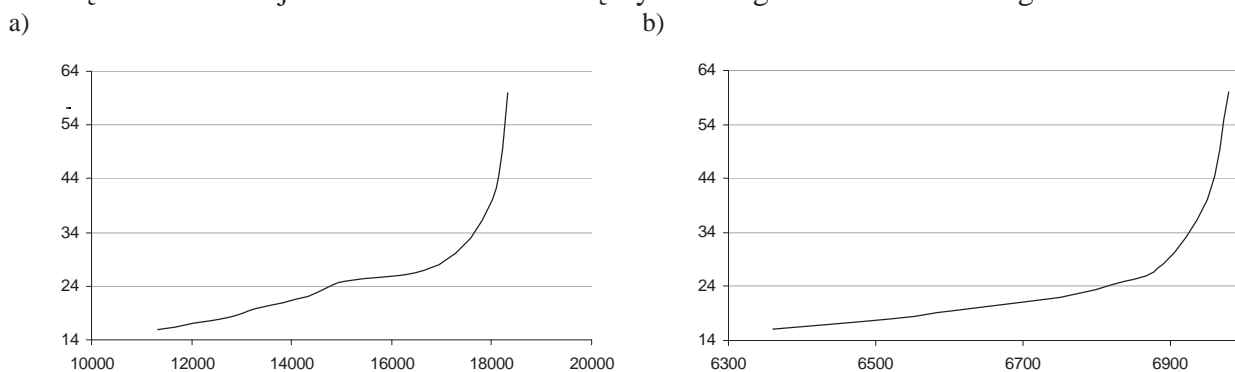
Na przykład: prędkość detonacji oraz ciśnienie na froncie fali zależy od gęstości danego materiału oraz od wielkości (średnicy) ładunku [5]. Ciśnienie i prędkość produktów detonacji należą do ważnych parametrów kształtujących falę uderzeniową i mających wpływ na dalsze ewentualne odkształcenia konstrukcji. Nieuwzględnienie powyższych zależności może prowadzić do uzyskania błędnych wyników.

Podstawowymi parametrami mającymi wpływ na prędkość detonacji stanowią rozmiar ładunku i gęstość materiału. Ze wzrostem gęstości rośnie prędkość i ciśnienie na froncie fali produktów detonacji. Zależności te przedstawiono na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Gęstość w funkcji ciśnienia i w funkcji prędkości
Fig. 5. Density versus pressure and density versus velocity

Prędkość detonacji rośnie wraz ze średnicą wydłużonego ładunku walcowego:



Rys. 6. Średnica ładunku w funkcji ciśnienia i w funkcji prędkości
Fig. 6. Load diameter versus pressure and load diameter versus velocity

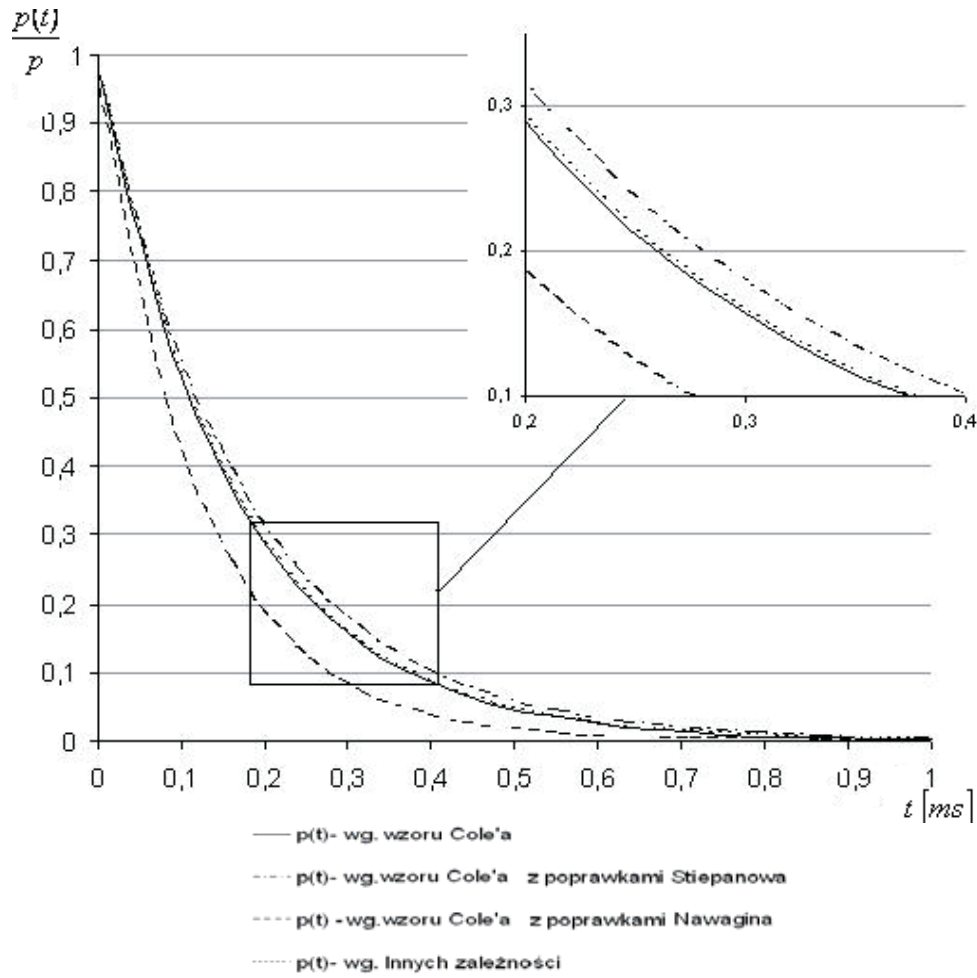
W obu przypadkach istnieją jednak graniczne wartości gęstości i średnicy których przekroczenie nie powoduje dalszych przyrostów.

4. Wnioski i uwagi końcowe

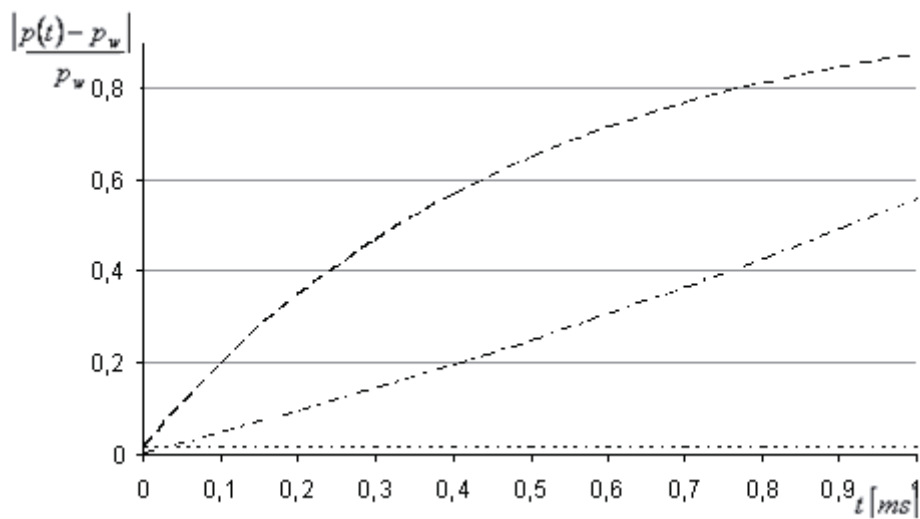
Zestawienie poszczególnych krzywych spadku ciśnienia przedstawiono na rys. 7.

Opublikowane w latach czterdziestych przez R.H. Cole'a zależności empiryczne dotyczące podwodnej fali uderzeniowej wzbudziły ogromne zainteresowanie. Obliczenia obciążeń

impulsowych, a zatem i odporności uderowej konstrukcji okrętowych stanowiły cenną wskazówkę dla przemysłu zbrojeniowego.



Rys. 7. Zestawienie krzywych spadku ciśnienia wg wzorów 2.1 - 2.4
 Fig. 7. List of pressure decrease curves according to equation 2.1 - 2.4



Rys. 8. Różnice ciśnień na czole fali uderzeniowej w odniesieniu do zależności R.H. Cole'a
 Fig. 8. Pressure differences At the front of the shock wave with reference to the R.H. Cole dependences

Doświadczenia powtarzano w różnych krajach wprowadzając pewne poprawki (zależności 2.2 - 2.4). Jak wynika z analizy zestawienia krzywych spadku ciśnienia (rys. 7 i 8) większe różnice mają miejsce w ograniczonym zakresie ciśnień (rys. 7 i 8) od 2 do 15 MPa, co stanowi około 30 % i dotyczą zależności podanej przez J.S. Nawagina. Wg. pozostałych zależności różnice wynoszą około 10 %. Przy obliczeniach konkretnej konstrukcji nie wydaje się to istotne. Należy zaznaczyć, że doświadczenia odbywały się przy użyciu ówczesnej mniej precyzyjnej aparatury, różnej w różnych krajach.

Do obliczeń przyjęto masę ładunku $G = 5$ kg i odległość minimalną $R = 2$ m.

Literatura

- [1] Brechowskich, L.M., *Wolny w sloistych sredach*, Sudostrojenie Moskwa 1957.
- [2] Cole, R.H., *Underwater explosions*, Princeton New Jersey 1948.
- [3] Jakowlew, J.S., *Gidrodinamika wzrywa*, Sudostrojenie Leningrad 1961.
- [4] Klatka, N., *Konstrukcje obron biernych, Część I A, Odporność udarowa okrętu*, WSMW, Gdynia 1985.
- [5] Krupin A.W., Sołowiew W.J., Szewtiel N.I., Kobieliw A.G.M., *Deformacja metalow zrywom*, Metallurgija, Moskwa 1975.
- [6] Krzewiński, R., *Dynamika wybuchu, Część 2, Działanie wybuchu w ośrodkach inercyjnych*, WAT, Warszawa 1983.
- [7] Lavrentiew, Z.V., Kuzjan O.I., *Wzrywy w morie*, Sudostrojenie Leningrad 1977.
- [8] Makarewicz, J., *Mechaniczne działanie wybuchu w różnych ośrodkach*, WAT Warszawa 1968.
- [9] Powierża Z., *Wytrzymałość ogólna kadłuba okrętu przy niekontaktowych wybuchach podwodnych*, Zeszyt naukowy Akademii Marynarki Wojennej nr. 108 A, Gdynia 1991.
- [10] Snay, H.G., *Unterwasser explosionem hydromechanische vorgänge und wirkungen*, Jahrbuch der schiffbautechnischen gessellschaft 1957.
- [11] Stanjukowicz, K.P., *Fizyka wzrywa*, Sudostrojenie Moskwa 1975.
- [12] Stanjukowicz, K.P., *Nieustanowiewsiesja dwiżenija splosznoj sredy*, Sudostrojenie Moskwa 1971.
- [13] Stiepanow, V.G., Sawrow I.A., *Impulsnaja metallobrobotka w sudowom masinostrojenij*. Sudostrojenie Leningrad 1968.
- [14] Zamyszlajew, B.W., Jakowlew, J.S., *Dinamiczeskije nagruzki pri podwodnom zrywie*, Sudostrojenie Leningrad 1967.

