SỰ BIẾN ĐỔI CỦA SÓNG NỔ TẠI MẶT PHÂN CÁCH GIỮA MÔI TRƯỜNG NƯỚC VÀ MÔI TRƯỜNG NƯỚC CHỨA BÓNG KHÍ

Đàm Trọng Thắng[1], Trần Đức Việt[2*], Nguyễn Phú Thắng[2]

Tóm tắt: *Các lý thuyết hiện nay chủ yếu nghiên cứu về sự lan truyền của sóng xung kích trong nước mà chưa có nhiều nghiên cứu trong môi trường nước chứa bóng khí. Bằng phương pháp giải tích, bài báo đã nghiên cứu sự biến đổi của sóng xung kích khi gặp mặt phân cách giữa môi trường nước và môi trường nước chứa bóng khí. Kết quả cho thấy sóng xung kích khi qua mặt phân cách bị phân rã thành sóng phản xạ và sóng khúc xạ; trong đó, sóng khúc xạ lan truyền trong môi trường nước chứa bóng khí bị suy giảm đáng kể biên độ.*

Từ khóa: Sóng xung kích; Nổ dưới nước; Mặt phân cách; Màn chắn bọt khí.

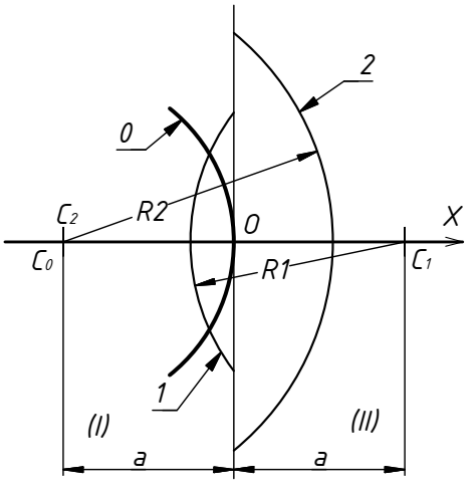
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các nghiên cứu về vụ nổ dưới nước và sự lan truyền của sóng nổ trong nước chủ yếu được thực hiện trong và sau chiến tranh thế giới thứ hai [4, 5]. Tác dụng cơ học nổ của vụ nổ dưới nước ở gần mặt thoáng bị suy giảm và đã được chỉ ra là do ảnh hưởng của mặt thoáng. Tại điểm khảo sát ở gần mặt nước, sau một khoảng thời gian nào đó, sóng giãn từ mặt phân cách nước-không khí lan truyền tới làm cho áp suất tại điểm khảo sát giảm đột ngột về không và cắt đi một phần xung riêng pha nén của sóng nổ truyền qua điểm đó [1, 2].

Có thể ứng dụng hiện tượng trên để làm suy giảm sóng nổ dưới nước theo hướng xác định nào đó để bảo vệ công trình, thiết bị,... ngập nước khi thi công nổ dưới nước bằng cách sử dụng màn chắn dạng nước chứa bóng khí chắn ngang phương truyền sóng nổ. Khi sóng nổ lan truyền tới màn chắn này sẽ bị phân rã thành các sóng khác qua hiện tượng khúc xạ, phản xạ tại các mặt phân cách nước-nước chứa bóng khí cũng như bị suy giảm cường độ khi lan truyền trong môi trường có độ cứng truyền âm thấp [3].

Bài báo này trình bầy kết quả nghiên cứu về quy luật biến đổi của sóng nổ tại mặt phân cách giữa hai môi trường nước-nước chứa bóng khí và khảo sát sự thay đổi của biên độ các sóng theo các thông số môi trường.

2. XÁC ĐỊNH QUY LUẬT LAN TRUYỀN SÓNG TỚI, SÓNG PHẢN XẠ, SÓNG KHÚC XẠ



Hình 1. *Mô hình phân rã sóng tới tại mặt phân cách giữa hai môi trường.*
(0 - Sóng tới; 1 - Sóng khúc xạ; 2 - Sóng phản xạ).

Xét hai môi trường bán vô tận I (nước) và II (nước chứa bóng khí) phân cách nhau bởi mặt phân cách. Trong môi trường I đặt một lượng nổ C_0 ở vị trí cách mặt phân cách một khoảng a theo phương pháp tuyến với mặt phân cách.

Khi C_0 nổ, tạo ra sóng xung kích 0 lan truyền trong môi trường I; khi sóng tới 0 lan truyền tới mặt phân cách xuất hiện sóng phản xạ 1 hướng ngược từ mặt phân cách về môi trường chứa lượng nổ C_0 ban đầu và sóng khúc xạ 2 lan truyền trong môi trường II (hình 1).

Đặt trục OX trùng với pháp tuyến của mặt phân cách đi qua C_0 và hướng từ môi trường I sang môi trường II, điểm O nằm trên mặt phân cách.

Giả thiết môi trường II là liên tục và các bóng khí phân bố đều trong toàn bộ môi trường. Giả thiết khoảng cách từ điểm khảo sát tới lượng nổ không nhỏ hơn 10 lần bán kính lượng nổ và áp suất trên mặt sóng nổ tại điểm đó không lớn hơn 100MPa; với điều kiện này, tốc độ lan truyền sóng nổ trong nước được coi bằng tốc độ truyền âm trong môi trường đó [5].

Cường độ và tốc độ dịch chuyển của các hạt trong sóng phản xạ, khúc xạ xác định từ điều kiện liên tục đối với ứng suất và tốc độ trên mặt phân cách. Đối với trường hợp sóng phản xạ thẳng đang xét, được xác định theo phương trình sau [2]:

$$\sigma_T + \sigma_{PX} = \sigma_{KX} \tag{1}$$

$$u_T + u_{PX} = u_{KX} \tag{2}$$

Trong đó: $\sigma_T, \sigma_{PX}, \sigma_{KX}$ lần lượt là ứng suất tương ứng trong sóng tới, sóng phản xạ, sóng khúc xạ; u_T, u_{PX}, u_{KX} lần lượt là tốc độ dịch chuyển của các hạt tương ứng trong sóng tới, sóng phản xạ, sóng khúc xạ.

Ứng suất trong sóng lan truyền ở mỗi thời điểm và mỗi điểm trong môi trường được rút ra từ định luật bảo toàn xung lượng [2]:

$$u = \pm \frac{\sigma}{\rho.c} \tag{3}$$

Trong đó:

Dấu (+) và (-) tương ứng với ứng suất nén và kéo;

ρ, c lần lượt là mật độ và tốc độ truyền sóng âm trong môi trường.

Thay (3) vào (2):

$$\frac{\sigma_T}{\rho_1.c_1} - \frac{\sigma_{PX}}{\rho_1.c_1} = \frac{\sigma_{KX}}{\rho_2.c_2} \tag{4}$$

Từ (4) và (1), ta tính được:

$$\sigma_{KX} = \frac{2\rho_2.c_2}{\rho_1.c_1 + \rho_2.c_2}\sigma_T \tag{5}$$

$$\sigma_{PX} = -\frac{\rho_1.c_1 - \rho_2.c_2}{\rho_1.c_1 + \rho_2.c_2}\sigma_T \tag{6}$$

Ký hiệu các đại lượng:

$$K_{KX} = \frac{2\rho_2.c_2}{\rho_1.c_1 + \rho_2.c_2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \tag{7}$$

$$K_{PX} = -\frac{\rho_1.c_1 - \rho_2.c_2}{\rho_1.c_1 + \rho_2.c_2} = -\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \tag{8}$$

$$Z_1 = \rho_1.c_1; Z_2 = \rho_2.c_2 \tag{9}$$

Trong đó:

Z_1, Z_2 lần lượt là độ cứng truyền âm của môi trường I và II.

K_{KX}, K_{PX} lần lượt được gọi là hệ số khúc xạ, hệ số phản xạ.

Do các môi trường nước, nước chứa bóng khí đang xét có thể coi là các môi trường lý tưởng không có độ bền và nội ma sát, nên theo [5] ta có:

$$p = -\sigma \tag{10}$$

Từ (5)-(8) và (10), ta có biên độ sóng khúc xạ, phản xạ tại mặt phân cách tính theo biên độ sóng tới:

$$p_{2O} = K_{KX}.p_O \tag{11}$$

$$p_{1O} = K_{PX}.p_O \tag{12}$$

Trong đó: p_O, p_{1O}, p_{2O} lần lượt là áp suất do sóng tới 0, sóng phản xạ 1, sóng khúc xạ 2 gây ra tại điểm O.

3. XÁC ĐỊNH ĐỘ LỚN CỦA SÓNG PHẢN XẠ, SÓNG KHÚC XẠ THEO CÁC THÔNG SỐ ĐẶC TRƯNG CỦA CÁC MÔI TRƯỜNG

Theo [3] ta xác định được độ cứng truyền âm của môi trường nước và nước chứa bóng khí như sau:

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\rho_{n0}}{\beta_n}.\left(\frac{p - p_{mn}}{\rho_{n0}.c_{n0}^2}.K_n + 1\right)^{\frac{1}{K_n}}} \tag{13}$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{\alpha_{n0}\rho_{n0} + \alpha_{k0}\rho_{k0}}{\left(\alpha_{k0}.\left(\frac{p}{p_{k0}}\right)^{\frac{-1}{K_k}} + \alpha_{n0}.\left(\frac{p - p_{mn}}{\rho_{n0}.c_{n0}^2}.K_n + 1\right)^{\frac{-1}{K_n}}\right).\left(\alpha_{k0}.\frac{1}{K_k.p} + \alpha_{n0}.\beta_n\right)}} \tag{14}$$

Trong đó: α_{n0}, α_{k0} là tỷ lệ thể tích tương ứng với các thành phần chất lỏng, chất khí trong môi trường hỗn hợp ở trạng thái ban đầu và ρ_{n0}, ρ_{k0} là mật độ của các thành phần tương ứng, quan hệ giữa các thành phần như sau:

$$\alpha_{n0} + \alpha_{k0} = 1 \tag{15}$$

c_{n0} , c_{k0} - Tốc độ âm lan truyền trong thành phần chất lỏng và chất khí trong môi trường hỗn hợp ở trạng thái ban đầu;

p, p_{mn} - Áp suất môi trường tại điểm khảo sát và tại mặt nước;

p_{k0} - Áp suất trong bóng khí ở trạng thái ban đầu, phụ thuộc vào độ sâu w của điểm khảo sát:

$$p_{k0} = p_{mn} + \rho_{n0}.g.\mathrm{w} \tag{16}$$

Độ nén của nước β_n thay đổi khi nhiệt độ môi trường thay đổi; tuy nhiên, các ảnh hưởng này là

nhỏ và có thể xác định:

$$\beta_n = 4,382.10^{-10}(Pa^{-1})$$

K_n - Chỉ số đa biến của môi trường nước K_n=3; K_k - Chỉ số đa biến của khí thực;

g = 9,81 m/s^2 - Gia tốc trọng trường;

Trong điều kiện tiêu chuẩn: c_{n0}=1500 m/s; ρ_{n0} =1000 kg/m^3.

c_{k0}=340 m/s; ρ_{k0} =1,27 kg/m^3; K_k=1,4.

Theo [1], áp suất trên mặt sóng nổ trong môi trường chất lỏng là một hàm của khoảng cách và được biểu diễn ở dạng không thứ nguyên như sau:

$$\frac{p - p_{mn}}{p_{mn}} = A.\left(\frac{r_0}{R}\right)^{\gamma} \tag{17}$$

p - Áp suất trên mặt sóng nổ tại điểm khảo sát cách tâm lượng nổ C_0 một khoảng R;

r_0 - Bán kính lượng nổ;

A, γ - Các hệ số thực nghiệm phụ thuộc bản chất môi trường; với nước: A=14700 và γ=1,13.

Để xác định áp suất trên mặt sóng phản xạ theo khoảng cách, ta xác định lượng nổ ảo C_1 đặt ở vị trí đối xứng với lượng nổ C_0 qua mặt phân cách sao cho áp suất trên mặt sóng nổ do lượng nổ ảo C_1 tạo ra trong môi trường nước bằng áp suất trên mặt sóng phản xạ tại O do lượng nổ C_0 tạo ra trong môi trường nước. Áp dụng (17) với lượng nổ ảo C_1:

$$\frac{p_{1O} - p_{mn}}{p_{mn}} = 14700.\left(\frac{r_{C1}}{\mathrm{a}}\right)^{1,13} \tag{18}$$

Trong đó: r_{C1} - Bán kính lượng nổ ảo C_1.

Kết hợp với (12), ta xác định được r_{C1} và sau khi thay vào (17), ta có biểu thức xác định áp suất p_1 trên mặt sóng phản xạ 1 như sau:

$$\frac{p_1 - p_{mn}}{p_{mn}} = \left(\frac{a}{R_1}\right)^{1,13}.\left[K_{PX}.14700.\left(\frac{r_{C0}}{a}\right)^{1,13} + K_{PX} - 1\right] \tag{19}$$

Với R_1 là khoảng cách từ điểm đang xét đến tâm lượng nổ ảo C_1 và $R_1 \geq a$; r_{C0} là bán kính lượng nổ C_0.

Thực hiện tương tự với lượng nổ ảo C_2, ta xác định được áp suất p_2 trên mặt sóng khúc xạ 2 như sau:

$$\frac{p_2 - p_{mn}}{p_{mn}} = \left(\frac{a}{R_2}\right)^{\gamma}.\left[K_{KX}.14700.\left(\frac{r_{C0}}{a}\right)^{1,13} + K_{KX} - 1\right] \tag{20}$$

Trong đó:

γ - Hệ số trong (17) áp dụng với môi trường nước chứa bóng khí, xác định bằng thực nghiệm;

R_2 - Khoảng cách từ điểm đang xét tới tâm lượng nổ ảo C_2 và $R_2 \geq a$.

4. KẾT QUẢ, TÍNH TOÁN, THẢO LUẬN

Các công thức xây dựng ở mục 2 để xác định các hệ số phản xạ, khúc xạ của sóng nổ tại mặt phân cách của môi trường I-II là tổng quát, không chỉ áp dụng đúng ở cặp mặt phân cách giữa hai môi trường nước-nước chứa bóng khí mà có thể áp dụng cho nhiều loại mặt phân cách giữa

các môi trường khác nhau như: chất lỏng-chất lỏng khác, nước chứa bóng khí-nước; nước chứa bóng khí-nước chứa bóng khí khác (nồng độ bóng khí khác hay bản chất bóng khí khác),...

Các quan hệ (7)-(9), (11)-(12) chỉ ra rằng: biên độ trong sóng phản xạ, sóng khúc xạ ngoài phụ thuộc vào biên độ sóng tới, còn phụ thuộc vào độ lớn độ cứng truyền âm của hai môi trường hai phía mặt phân cách.

Tính của chất sóng phản xạ tùy thuộc vào độ cứng truyền âm của hai môi trường, có thể có các trường hợp sau:

- Nếu $Z_1 > Z_2$ thì $K_{PX} < 0$ nên sóng phản xạ là sóng dãn.

- Nếu $Z_1 = Z_2$ (ví dụ: môi trường I và II là một) thì $K_{PX} = 0$ và $K_{KX} = 1$ tức là sóng tới lan truyền trong một môi trường, không xẩy ra hiện tượng khúc xạ, phản xạ.

- Nếu $Z_1 >> Z_2$ (khi II là môi trường có nồng độ bóng khí rất lớn hoặc hoàn toàn là không khí) thì $K_{PX} \approx -1$ và $K_{KX} \approx 0$ tức là sóng tới lan truyền tới mặt phân cách như tới mặt tự do và chuyển hoàn toàn thành sóng giãn phản xạ.

- Nếu $Z_1 < Z_2$ thì $K_{PX} > 0$ nên sóng phản xạ là sóng nén.

Từ (7) thấy rằng: luôn có $K_{KX} > 0$ nên sóng khúc xạ luôn là sóng nén.

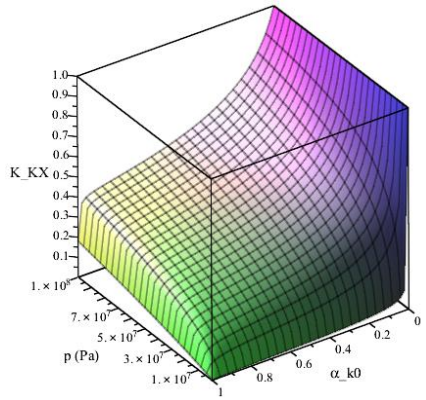
Ngoài ra, dễ dàng nhận thấy:

$$K_{KX} - K_{PX} = 1 \tag{21}$$

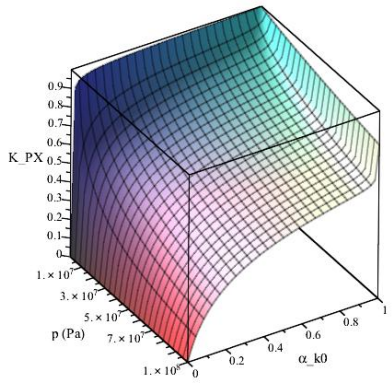
Xét riêng trường hợp mặt phân cách giữa hai môi trường nước-nước chứa bóng khí là đối tượng của bài báo:

- Do môi trường nước chứa bóng khí có độ cứng truyền âm Z_2 nhỏ hơn độ cứng truyền âm của nước Z_1 [3] nên $K_{KX} < 1$ và K_{KX} càng nhỏ khi Z_2 càng nhỏ. Tức là, khi lan truyền qua mặt phân cách giữa 2 môi trường nước-nước chứa bóng khí thì sóng nổ bị suy giảm cường độ và sự suy giảm này càng tăng khi độ cứng truyền âm của môi trường nước chứa bóng khí càng nhỏ, và theo [3] điều này xẩy ra khi nồng độ thể tích bóng khí α_{k0} trong môi trường II càng lớn (phụ thuộc chủ yếu).

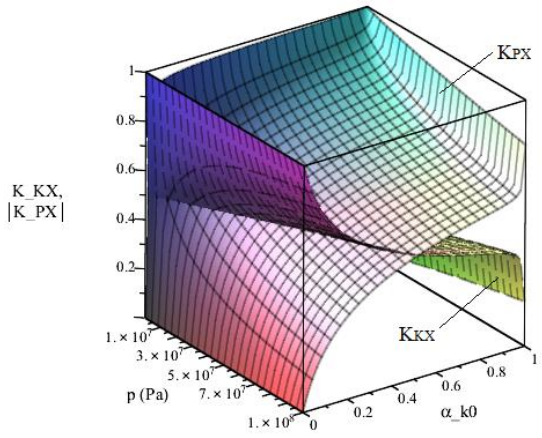
Để khảo sát và đánh giá một cách định lượng các thông số đặc trưng môi trường ảnh hưởng đến các hệ số phản xạ, khúc xạ tại mặt phân cách môi trường nước-nước chứa bọt khí, tiến hành viết chương trình tính toán hệ số phản xạ, khúc xạ theo các công thức (7), (8) trên phần mềm Maple 17. Kết quả tính toán thấy được sự phụ thuộc của hệ số phản xạ, khúc xạ theo hàm lượng bóng khí, áp suất môi trường trình bầy từ hình 2 đến hình 4.



Hình 2. *Hệ số khúc xạ K_{KX} với α_{k0} =0..1 và p = p_{mn}..100 Mpa.*



Hình 3. *Độ lớn hệ số phản xạ $|K_{PX}|$ với α_{k0} =0..1 và p = p_{mn}..100 Mpa.*



Hình 4. *So sánh độ lớn hệ số phản xạ $|K_{PX}|$, khúc xạ K_{KX} với α_{k0} =0..1 và p = p_{mn}..100 Mpa.*

Từ các hình 2-4 thấy rằng:

- Hệ số khúc xạ tỷ lệ nghịch với hàm lượng khí α_{k0} và tỷ lệ thuận với áp suất môi trường; độ lớn hệ số phản xạ (hệ số phản xạ mang dấu âm) thì có quy luật ngược lại.

- Hiệu quả làm suy giảm sóng nổ của màn chắn bóng khí càng lớn khi sóng khúc xạ càng yếu tức là hệ số khúc xạ càng nhỏ. Điều này thỏa mãn khi bố trí màn chắn xa lượng nổ (áp suất p giảm) hay tăng hàm lượng bóng khí α_{k0}. Cụ thể, với α_{k0}=0,1: khi p=100MPa thì K_{KX}=0,9; khi p=50MPa thì K_{KX} = 0,6.

5. KẾT LUẬN

Sóng nổ lan truyền trong môi trường nước tới mặt phân cách nước-nước chứa bóng khí bị phân rã thành sóng phản xạ và sóng khúc xạ: sóng phản xạ là sóng giãn chuyển động ngược lại môi trường nước ban đầu, sóng khúc xạ là sóng nén chuyển động sang môi trường nước chứa bóng khí; độ lớn của các sóng phản xạ và khúc xạ phụ thuộc độ lớn của sóng tới ban đầu và các hệ số phản xạ, khúc xạ.

Các hệ số phản xạ, khúc xạ phụ thuộc vào độ cứng truyền âm của hai môi trường, hay phụ thuộc hàm lượng thành phần bóng khí và áp suất môi trường. Khi sóng nổ lan truyền từ môi trường nước tới mặt phân cách nước-nước chứa bóng khí: hệ số khúc xạ tỷ lệ nghịch với hàm lượng khí α_{k0} và tỷ lệ thuận với áp suất môi trường; độ lớn hệ số phản xạ (hệ số phản xạ mang dấu âm) có quy luật ngược lại.

Các công thức xác định hệ số phản xạ, khúc xạ theo độ cứng truyền âm của hai môi trường hai bên mặt phân cách có thể áp dụng cho nhiều loại cặp mặt phân cách giữa các môi trường khác nhau như: chất lỏng-chất lỏng khác, nước chứa bóng khí-nước; nước chứa bóng khí-nước chứa bóng khí khác,...

Khuyến nghị: giảm hệ số khúc xạ của sóng nổ tại măt phân cách nước-nước chứa bóng khí bằng cách tăng hàm lượng bóng khí hay bố trí mặt phân cách xa lượng nổ là một biện pháp làm tăng hiệu quả suy giảm sóng xung kích nổ lan truyền trong môi trường nước của màn chắn dạng hỗn hợp nước – bóng khí.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Hồ Sĩ Giao, Đàm Trọng Thắng, Lê Văn Quyền, Hoàng Tuấn Chung, *"Nổ hóa học lý thuyết và thực tiễn"*, NXB Khoa học và kỹ thuật (2010).

[2]. Đàm Trọng Thắng, Bùi Xuân Nam, Trần Quang Hiếu, *"Nổ mìn trong ngành mỏ và công trình"*, NXB Khoa học tự nhiên và công nghệ (2015).

[3]. Đàm Trọng Thắng, Trần Đức Việt, *"Nghiên cứu ảnh hưởng độ cứng truyền âm của môi trường nước chứa bọt khí đối với tải trọng sóng nổ"*, TC. Công nghiệp mỏ, **số 3** (2020).
[4]. Cole R. H., "Underwater explosions", Princeton University Press (1948).
[5]. Орленко Л.П., *"Физика взрыва"*, М.:ФИЗМАТЛИТ (2004).

ABSTRACT

TRANSFORMATION OF SHOCK WAVES AT THE INTERFACE OF WATER AND BUBBLE-WATER ENVIRONMENT

Current theories mainly deal with the propagation of shockwaves in water, but not much has been done in bubbles-water environment. By analytic method, the paper researched d the transformation of shockwave at the interface of water and bubble-water environment. The results show that shock waves when passing through the interface are decayed into reflected and refracted waves; in which, the refractive wave propagating in bubbles- water environment significantly reduced its amplitude.

Keywords: Shock waves; Underwater explosions; Interface; Bubble screen.

Nhận bài ngày 30 tháng 7 năm 2020
Hoàn thiện ngày 01 tháng 12 năm 2020
Chấp nhận đăng ngày 14 tháng 12 năm 2020

Địa chỉ: [1]Học viện KTQS;
[2]Viện Tên lửa/Viện KHCNQS.
[*]Email: tdviet211@gmail.com.