



Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <https://jmes.humg.edu.vn>

Evaluating the accuracy of pressure measurements on the surface of shock waves propagating in an underwater environment of experimental explosion models



Viet Duc Tran ¹, Thang Trong Dam ^{2,*}

¹ Weapons Institute, Hanoi, Vietnam

² Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28th Mar. 2024

Revised 24th July 2024

Accepted 20th Aug. 2024

Keywords:

Explosion model,
Shock wave in water,
Shock wave pressure,
Underwater explosion.

ABSTRACT

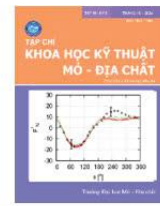
Currently, the calculation of pressure on the surface of shock waves propagating in underwater environments is based on research findings inherited from Russia and the United States corresponding to standard conditions. To inherit and conduct experimental research on underwater explosions under different conditions in our context, it is necessary to study the selection and propose appropriate experimental model parameters, including the amount of explosive material, the depth of charge placement, and the water depth. Based on the analysis of theoretical explosive hydrodynamics in the water environment, this paper introduced the results of an experimental model, calculated and determined the boundary condition parameters of the experimental model, and conducted underwater explosion experiments. Using the explosion similarity method to represent relative pressure as a function of relative distance and the least squares method on Excel tool to establish experimental laws for the distribution of maximum pressure on the shock wave surface by distance. The obtained results reveal a decreasing law of maximum pressure on the shock wave surface with an exponent coefficient consistent with the research findings in Russia and the United States but with a deviation in amplitude oscillation matching of -7.6% and -5.9%. The research results confirm that the proposed experimental model can be applied to perform experimental research for different purposes while still ensuring the necessary accuracy.

Copyright © 2024 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: thangdt@lqdtu.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2024.65(5).04



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <https://tapchi.humg.edu.vn>

Đánh giá độ chính xác của áp suất đo được trên mặt sóng xung kích lan truyền trong môi trường nước của mô hình nổ thực nghiệm

Trần Đức Việt¹, Đàm Trọng Thắng^{2,*}

¹ Viện Vũ khí, Hà Nội, Việt Nam

² Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 28/3/2024

Sửa xong 24/7/2024

Chấp nhận đăng 20/8/2024

Từ khóa:

Áp suất sóng xung kích,

Mô hình nổ,

Nổ dưới nước,

Sóng xung kích trong nước.

TÓM TẮT

Hiện nay, việc tính toán trị số áp suất trên bề mặt sóng xung kích nổ lan truyền trong môi trường nước được kế thừa từ các kết quả nghiên cứu của Nga và Mỹ tương ứng với các điều kiện chuẩn. Để có thể kế thừa và tiến hành nghiên cứu thực nghiệm nổ dưới nước trong các điều kiện khác nhau của nước ta, cần phải nghiên cứu lựa chọn, đề xuất các thông số mô hình thí nghiệm phù hợp gồm: khối lượng thuốc nổ, chiều sâu đặt lượng nổ, chiều sâu đáy nước. Trên cơ sở phân tích lý thuyết thủy động lực học nổ trong môi trường nước, bài báo giới thiệu kết quả xây dựng mô hình nổ thực nghiệm, tính toán xác định các thông số điều kiện biên của mô hình thí nghiệm và thí nghiệm nổ trong môi trường nước. Sử dụng phương pháp đồng dạng tác dụng nổ để biểu thị áp suất tương đối theo khoảng cách tương đối và phương pháp bình phương tối thiểu trên phần mềm Excel để thiết lập qui luật thực nghiệm về phân bố áp suất cực đại trên bề mặt sóng xung kích theo khoảng cách. Kết quả nhận được qui luật suy giảm áp suất cực đại trên bề mặt sóng xung kích có hệ số mũ trùng và độ lệch về biên độ dao động bằng -7,6% và -5,9% phù hợp với phương pháp tính của Nga và Mỹ. Kết quả nghiên cứu khẳng định mô hình thí nghiệm đề xuất có thể áp dụng để thực hiện các nghiên cứu thực nghiệm với mục đích khác nhau mà vẫn đảm bảo độ chính xác cần thiết.

© 2024 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

1. Mở đầu

Nghiên cứu về tác động nổ cũng như quá trình lan truyền sóng xung kích trong môi trường nước

đã được các nhà khoa học hàng đầu thế giới trong lĩnh vực nổ mìn công bố như Cole (1948) của Mỹ, Vlasov (1957), Xalamakhin (1967), Galkin và nnk. (1987), Kytuzov (1983, 1990), Baum và Orlenko (2002), Kutuzov và Belin (2012) của Nga. Các công bố chủ yếu tập trung nghiên cứu quá trình cơ học, vật lý xuất hiện khi nổ trong môi trường nước, trong đó tập trung chủ yếu xác định các thông số đặc trưng cho sóng xung kích và quá trình lan

*Tác giả liên hệ

E - mail: thangdt@lqdtu.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2024.65(5).04

truyền sóng xung kích bằng phương pháp lý thuyết và thực nghiệm.

Áp suất trên mặt sóng xung kích do nổ trong nước chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố như chiều sâu nước, độ sâu đặt lượng nổ, khoảng cách đến chướng ngại vật, đặc điểm phản xạ của mặt nước và đáy nước (Chadwick và nnk., 1966; Zamyshlyayev và Yakovlev, 1967; Bernard và Shen, 1996; Đàm và Trần, 2021; Đàm và nnk., 2023). Đặc biệt, hạn chế của các thiết bị đo lấy tín hiệu áp suất sóng xung kích theo dạng tín tương tự (analog) luôn tồn tại nhiều do ảnh hưởng của đặc tính điện từ trường tồn tại trong môi trường nước; ngoài ra, việc nhận tín hiệu rời rạc dạng số còn bị ảnh hưởng bởi tần số lấy mẫu của thiết bị đo (Vu và nnk., 2023). Tuy nhiên, cho đến nay, các kết quả nghiên cứu về các điều kiện mô hình thí nghiệm nhằm đảm bảo lấy được số liệu tin cậy về cường độ sóng xung kích còn rất hạn chế. Nhiều kết quả đo cường độ sóng xung kích khi nổ dưới nước ngoài hiện trường cũng như trong phòng thí nghiệm còn sai lệch lớn so với phương pháp xác định của các tác giả người Nga và Mỹ (các công thức (1) và (2)). Mặt khác, việc sử dụng các phương pháp tính toán có sẵn mà không hiểu rõ điều kiện áp dụng cũng có thể dẫn đến các kết quả có sai số lớn.

Chính vì vậy, việc nghiên cứu lựa chọn các thông số của mô hình thực nghiệm dựa trên phân tích lý thuyết, xây dựng mô hình thí nghiệm và kiểm chứng độ tin cậy thông qua thí nghiệm nổ trong môi trường nước là cần thiết. Thông qua việc đo đặc áp suất sóng xung kích trong nước của các thí nghiệm để hiệu chỉnh các thông số của mô hình đề xuất nhằm đạt được kết quả phù hợp với phương pháp tính toán của các nước tiên tiến. Kết quả nghiên cứu làm cơ sở sử dụng các thông số của mô hình phục vụ các tính toán thực nghiệm nổ dưới nước.

2. Cơ sở lý thuyết lan truyền sóng xung kích do nổ trong môi trường nước

Sau khi kích nổ lượng nổ trong môi trường nước, dưới tác dụng của áp suất cực cao trong sản phẩm nổ đã nén ép môi trường nước bao quanh lượng nổ giãn ra xung quanh. Sự nén ép có tính lan truyền từ lớp này sang lớp khác với tốc độ siêu âm gọi là sóng xung kích trong nước. Dạng sóng xung kích lan truyền phù hợp với dạng tác động của sản phẩm nổ lên môi trường. Trên mặt sóng xung kích cũng như trên mặt sóng nổ, các thông số: áp suất, tốc độ dịch chuyển của các phần tử, mật độ và các thông số khác đặc trưng cho trạng thái của môi trường tăng đột biến. Trước mặt sóng, các thông số của môi trường có giá trị

như khi ở trạng thái chưa bị kích động; sau mặt sóng, các thông số đó thay đổi liên tục.

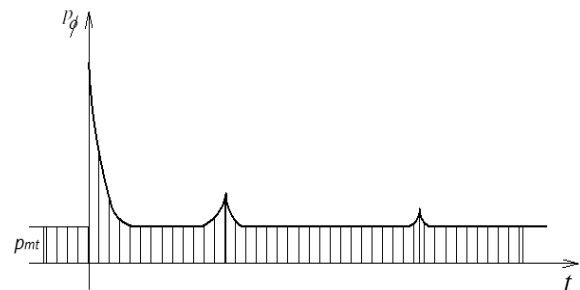
Sản phẩm nổ giãn nở và đẩy nước ra hình thành một lỗ rỗng gọi là bóng khí. Bóng khí giãn nở làm cho nước xung quanh chuyển động ra ngoài. Sự chuyển động của nước được kéo dài đến khi áp suất trong bóng khí bằng áp suất thủy tĩnh ở điểm nổ, nhưng do quán tính nó vẫn tiếp tục chuyển động. Vì vậy áp suất trong bóng khí giảm nhỏ hơn áp suất thủy tĩnh, làm cho các phần tử nước chuyển động ngược về phía tâm bóng khí. Bóng khí bị nén lại đến một thể tích nhỏ nhất nào đó, sau đó lại tiếp tục giãn ra,... Khối lượng riêng của bóng khí luôn nhỏ hơn khối lượng riêng của nước nên nó luôn bị áp suất thủy tĩnh của nước nâng lên phía bề mặt nước. Biên độ xung động của bóng khí giảm theo thời gian và khi nâng lên theo phương thẳng đứng bóng khí trở về trạng thái cân bằng thế năng. Mỗi lần bóng khí giãn nở sẽ tạo ra sóng nén, ở mọi điểm cố định bất kỳ trong không gian sẽ quan sát thấy áp suất thay đổi có tính chu kỳ (Hình 1). Hình 1 biểu thị dạng chung của biểu đồ áp suất tổng hợp, gồm pha đầu và các pha sau hình thành do quá trình bóng khí co bóp. Áp suất cực đại là biên độ xung động của bóng khí mà quan sát ở sóng nén đầu tiên nhưng không vượt quá (10÷20)% áp suất trên mặt sóng xung kích.

Trên cơ sở giải các phương trình lý thuyết về lan truyền sóng xung kích trong nước và thực nghiệm, các nhà khoa học đã đưa ra công thức xác định áp suất dư cực đại trên mặt sóng xung kích của pha đầu do nổ trong nước vô tận có dạng điển hình dưới đây:

Theo Xalamakhin (1967):

$$\Delta p = 14700 \cdot \left(\frac{r_0}{R}\right)^{1,13} ; kG/cm^2$$

Hoặc dạng vô thứ nguyên:



p_ϕ - áp suất lớn nhất trên mặt sóng xung kích;
 p_{mt} - áp suất tĩnh của môi trường tại điểm khảo sát; t - thời gian.

Hình 1- Dạng biểu đồ biến thiên áp suất tại một điểm cố định trong môi trường khi sóng xung kích đi qua (Hồ và nnk., 2010).

$$\frac{\Delta p}{p_1} = 14700 \cdot \left(\frac{r_0}{R}\right)^{1,13} \quad (1)$$

Theo Cole (1948):

$$\Delta p = 533 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1,13}; kG/cm^2$$

Hoặc dạng vô thứ nguyên:

$$\frac{\Delta p}{p_1} = 533 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1,13} \quad (2)$$

Trong đó: Q - khối lượng lượng nổ quy đổi TNT, kg; r_0 - bán kính lượng nổ quy đổi, m; R - khoảng cách từ điểm khảo sát đến tâm lượng nổ, m; Δp - áp suất dư cực đại trên mặt sóng nổ tại điểm khảo sát; p_1 - áp suất môi trường tĩnh.

Công thức (1) và (2) là một hàm của khoảng cách được áp dụng cho thuốc nổ TNT, đối với thuốc nổ khác cần hiệu chỉnh thông qua hệ số điều chỉnh thuốc nổ.

3. Xây dựng mô hình và kiểm chứng bằng thí nghiệm nổ trong môi trường nước

3.1. Phân tích lựa chọn mô hình thí nghiệm

Mô hình thí nghiệm cần phải đảm bảo điều kiện: khối lượng, kích thước và độ sâu đặt lượng nổ thỏa mãn điều kiện nổ trong môi trường nước vô tận, tức là nổ ngầm không có ảnh hưởng của đáy nước và mặt nước; trị số áp suất trên mặt sóng xung kích nổ lan truyền trong nước phải phù hợp với phương pháp tính toán áp suất trên mặt sóng xung kích của Nga và Mỹ.

Mối quan hệ giữa độ sâu đặt lượng nổ h và khối lượng lượng nổ Q được phản ánh qua công thức tổng quát tính toán tác dụng nổ trong môi trường đặc có dạng (Borodzia, 1938; Tavrivov, 1949; Vlasov, 1957; Xalamakhin, 1967; Ma và Chu, 1971; Kytuzov, 1983; Galkin và nnk., 1987; Gorodilov, 1993; Nguyễn và Đàm, 2007; Hồ và nnk., 2010; Kutuzov và Belin, 2012; Đàm và nnk., 2015; 2023):

$$Q = K \cdot f(n) \cdot h^3, \text{ kg} \quad (3)$$

Trong đó: K - chỉ tiêu thuốc nổ tạo phễu nổ vắng tiêu chuẩn, kg/m^3 , đối với môi trường là nước và thuốc nổ sử dụng là TNT thì $K = 0,2 kg/m^3$ (Tavrivov, 1949); $f(n)$ - hàm chỉ số tác dụng nổ.

Công thức (3) có thể biến đổi thành:

$$h = \frac{1}{\sqrt[3]{f(n)}} \cdot \sqrt[3]{\frac{Q}{K}} \quad (4)$$

Điều kiện nổ ngầm xảy ra khi không tồn tại phễu nổ vắng, tức là khi độ sâu đặt lượng nổ h lớn hơn chiều sâu nước tới hạn h_{th} :

$$h_{th} = \mu \cdot \sqrt[3]{\frac{Q}{K}} \quad (5)$$

Với μ là hệ số phụ thuộc vào tính chất của môi trường đặc, xác định theo công thức:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt[3]{f(n)}} \quad (6)$$

Để đảm bảo điều kiện nổ ngầm thì $f(n) = 0,125 \div 0,187$ (Vlasov, 1957; Đàm và nnk., 2015).

Thay $f(n) = 0,125 \div 0,187$ vào (6) thì $\mu = 1,75 \div 2$. Chọn $\mu = 2$ và thay $K = 0,2 kg/m^3$ vào (5), nhận được chiều sâu nước tối thiểu để đảm bảo điều kiện nổ ngầm là:

$$h_{th} = 3,4 \cdot \sqrt[3]{Q} \quad (7)$$

Điều kiện thí nghiệm chọn là hồ nước có độ sâu 15 m nước. Độ sâu đặt lượng nổ là 10 m, nên khối lượng thuốc nổ tối đa qui đổi về TNT được tính theo công thức (7) là:

$$Q = \left(\frac{h_{th}}{3,4}\right)^3 = \left(\frac{10}{3,4}\right)^3 = 25,4 \text{ kg} \quad (8)$$

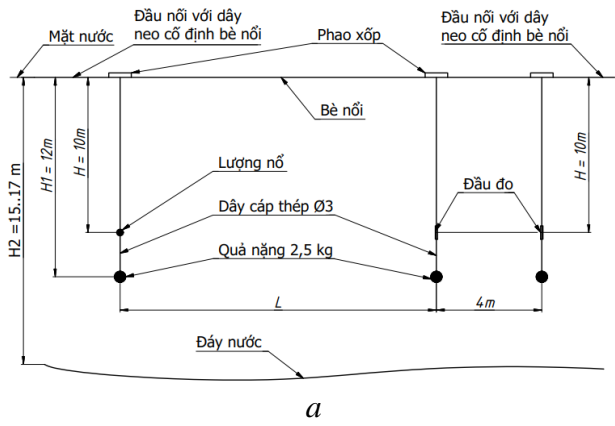
Như vậy, mô hình thí nghiệm để đo được áp suất trên bề mặt sóng xung kích thỏa mãn điều kiện nổ trong môi trường nước vô tận cần phải thỏa mãn khối lượng lượng nổ qui về TNT nhỏ hơn 25,4 kg với điều kiện độ sâu nước là 15 m và độ sâu đặt lượng nổ trong nước là 10 m.

3.2. Sơ đồ thí nghiệm

Để quan sát được sự hình thành và lan truyền của sóng xung kích trong nước cần có hệ thống đo lường áp suất sóng xung kích lan truyền trong nước khi nổ.

Để nhận được qui luật thực nghiệm về sự suy giảm áp suất trên mặt sóng xung kích theo khoảng cách xa tâm nổ, cần bố trí các đầu đo dọc theo bán kính qua tâm nổ nằm trên mặt phẳng nằm ngang. Sơ đồ bố trí mô tả trên Hình 2a.

Lượng nổ và đầu đo áp suất sóng nổ trong nước được treo trên các dây cáp thép $\phi 3$ mm. Để làm căng dây treo và tránh cho dây treo bị xiên do dòng chảy, đầu dưới cùng của dây cáp là quả nặng 2,5 kg. Máy đo được bố trí trên tàu 1. Tàu 1 neo ở vị trí cách xa các phao xếp treo đầu đo sóng nổ là 50 m, ngược với hướng của phao xếp treo lượng nổ. Dây điểm hỏa và các dây tín hiệu của đầu đo được nối với tàu 1. Thuyền 2 cơ động lắp lượng nổ vào vị trí cho mỗi lần thử nổ, xem Hình 2b, 2c, 2d.



a. Sơ đồ bố trí thí nghiệm; b. Công tác lắp đặt, bố trí đầu đo và lượng nổ; c. Tiến hành nổ; d. Kiểm tra dữ liệu tín hiệu số trên máy tính; (L- khoảng cách từ đầu đo gần nhất tới lượng nổ).

Hình 2. Một số hình ảnh công tác thí nghiệm nổ ngoài hiện trường.

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm xác định áp suất dư lớn nhất trên mặt sóng xung kích tại vị trí bố trí đầu đo.

TT	Mã thí nghiệm	Q, kg	Δp , MPa			
			R=L=10 m	R=L=12 m	R=14 m	R=16 m
1	CS_1	0,221	2,11		1,45	
2	CS_2		2,09		1,41	
3	CS_3		2,13		1,46	
4	CS_4			1,70		1,22
5	CS_5			1,70		1,10
6	CS_6	0,3		1,92		1,23
7	CS_7	0,127	1,67		1,14	
8	CS_8	0,283			1,66	
9	CS_9				1,75	
10	CS_10				1,64	
11	CS_11				1,58	
12	CS_12				1,64	
13	CS_13				1,67	
14	CS_14				1,69	
15	CS_15				1,61	
16	CS_16				1,68	
17	CS_17				1,65	

Sử dụng hai đầu đo trong các thí nghiệm với khoảng cách đến lượng nổ được nêu trong Bảng 1.

3.3. Nội dung thí nghiệm

Mục đích thí nghiệm là đo áp suất trên mặt sóng xung kích lan truyền trong môi trường nước của các vụ nổ ở một số khoảng cách để tìm mối quan hệ giữa áp suất trên mặt sóng xung kích với các tham số khối lượng lượng nổ, khoảng cách,...

làm cơ sở để đánh giá độ chính xác của của áp suất đo được trên mặt sóng xung kích lan truyền trong môi trường nước của mô hình nổ thực nghiệm đề xuất so với qui luật thực nghiệm tìm được của Nga và Mỹ tương ứng.

Nội dung này tiến hành nổ ngoài thực tế ở hồ có độ sâu đáy nước lớn (15÷17) m với lượng nổ có khối lượng quy đổi 127 g, 221 g, 283 g và 300 g TNT đặt ở độ sâu 10 m nước (lớn hơn 368 đến 277 lần bán kính lượng nổ - tương đương với nổ trong môi trường vô tận).

Từ dữ liệu số mà máy đo đa kênh thu nhận được, dựng được đồ thị thay đổi áp suất dư của sóng nổ tại các vị trí khảo sát (vị trí treo các đầu đo).

3.4. Thiết bị và vật tư sử dụng trong thí nghiệm

3.4.1. Thiết bị đo áp suất trong sóng xung kích

- Máy đo DEWE-3020 là thiết bị đo động đa kênh hiện đại do hãng Dewetron (Áo) chế tạo, xem Hình 3. Đây là một thiết bị All-In-One tích hợp cả máy tính, màn hình cảm ứng 15,4", phần mềm đo, thiết bị thu nhận và xử lý số liệu trên một khối xách tay theo chuẩn quân sự. Thiết bị có thể đồng thời tiếp nhận và xử lý tín hiệu từ 8 đầu vào DAQP analog hoặc 16 đầu vào MDAQ analog, có 3 khe cắm PCI cho các card A/D hoặc các loại card khác (1394, ARINC, 1553,...) và có thể ghép nối với 1 mô đun mở rộng để xử lý thêm 8 kênh đo khác.

- Đầu đo áp suất sóng xung kích trong nước ký hiệu PCB 138A05 do hãng PCB Piezotronics (Mỹ) chế tạo, xem Hình 4. Đây là loại cảm biến

được thiết kế chuyên dụng để đo áp suất trên mặt sóng xung kích trong môi trường nước. Đầu đo làm việc theo nguyên lý sử dụng tinh thể áp điện (Tourmaline) để biến đổi tín hiệu áp suất sóng nổ trong môi trường thành xung điện áp, cho phép đo nhanh, chính xác và tin cậy.

3.4.2. Thiết bị gây nổ

Máy điểm hỏa MB-200 của Trung Quốc.

3.4.3. Vật tư nổ

- Chất nổ TNT nén.
- Kíp điện số 8.

3.5. Qui trình thí nghiệm

Thí nghiệm được thực hiện theo qui trình sau:

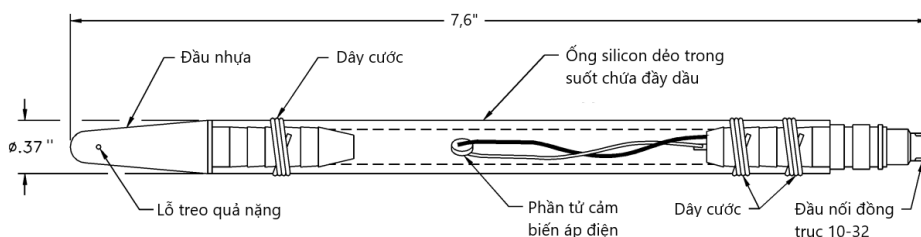
- Tiến hành lắp đặt các đầu đo áp suất trong nước;
- Chuẩn bị lượng nổ và lắp đặt lượng nổ vào vị trí thí nghiệm;
- Chuẩn bị hệ thống máy tính thu dữ liệu thí nghiệm kết nối với các đầu đo;
- Kiểm tra an toàn nổ và tiến hành nổ;
- Lưu số liệu dạng file số sau nổ để phục vụ xử lý số liệu.

4. Kết quả thí nghiệm

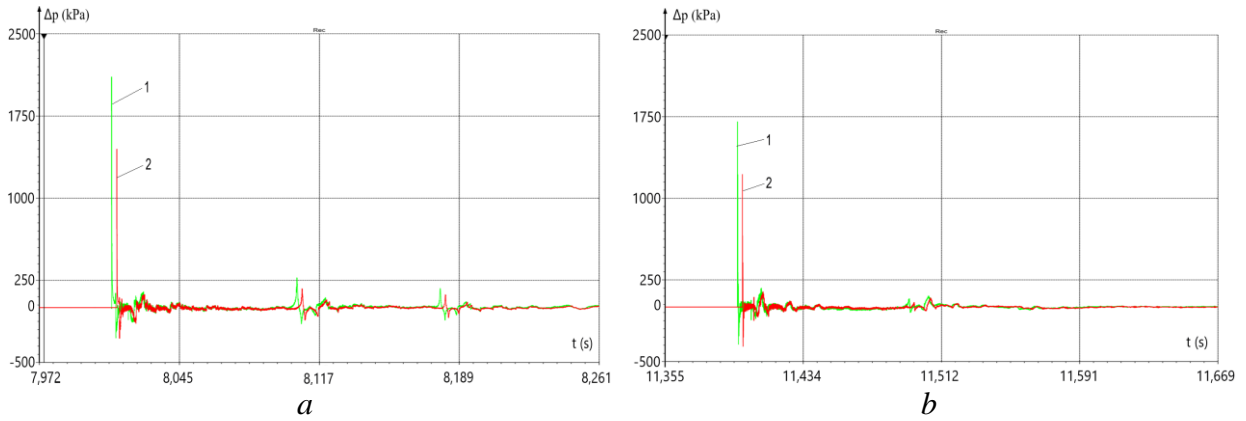
Kết quả nhận được là đồ thị áp suất sóng xung kích biến đổi theo thời gian ở các vị trí khảo sát và trị số áp suất lớn nhất thể hiện trong Bảng 1 và Hình 5.



Hình 3. Máy đo dao động đa kênh DEWE-3020 sử dụng trong thí nghiệm.



Hình 4. Đầu đo áp suất sóng xung kích trong nước PCB 138A05.



a. Thí nghiệm mã số CS_1; b. Thí nghiệm mã số CS_4.

1- áp suất dư tại vị trí R = 10 m; 2- áp suất dư tại vị trí R = 14 m.

Hình 5. Biểu đồ áp suất dư trên mặt sóng xung kích nhận được từ thực nghiệm.

Từ kết quả thực nghiệm nhận thấy, khi một vụ nổ xảy ra trong môi trường nước, có thể xuất hiện nhiều sóng xung kích liên tiếp nhau xuất phát từ thành buồng sản phẩm nổ, trong đó sóng xung kích pha đầu tiên mạnh nhất, các sóng xung kích thứ cấp tiếp theo có cường độ nhỏ dần được hình thành tương ứng với các pha co giãn của buồng sản phẩm nổ. Kết quả thực nghiệm nhận được trên Hình 5 cơ bản phù hợp với lý thuyết.

5. Thiết lập qui luật thực nghiệm

Khai thác lý thuyết đồng dạng được trình bày bởi Sedov (1954) và Kutuzov (1990), toàn bộ số liệu thí nghiệm nhận được ở Bảng 1 được xử lý về thông số đồng dạng tác dụng nổ với tiêu chuẩn đồng dạng là:

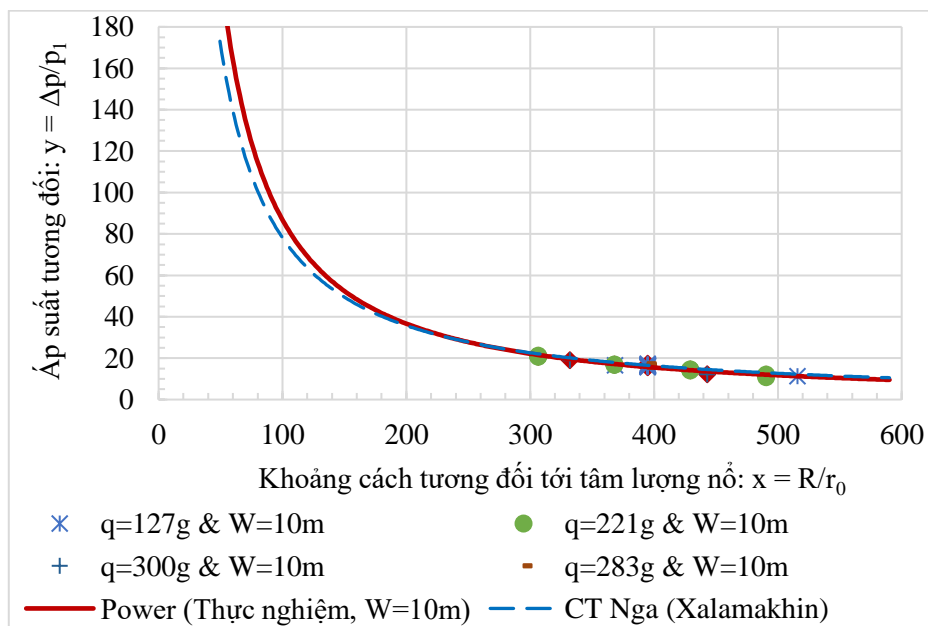
- Đối với thông số đồng dạng theo khoảng cách có:

$$\frac{r_0}{R} = idem \text{ hoặc: } \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} = idem \quad (9)$$

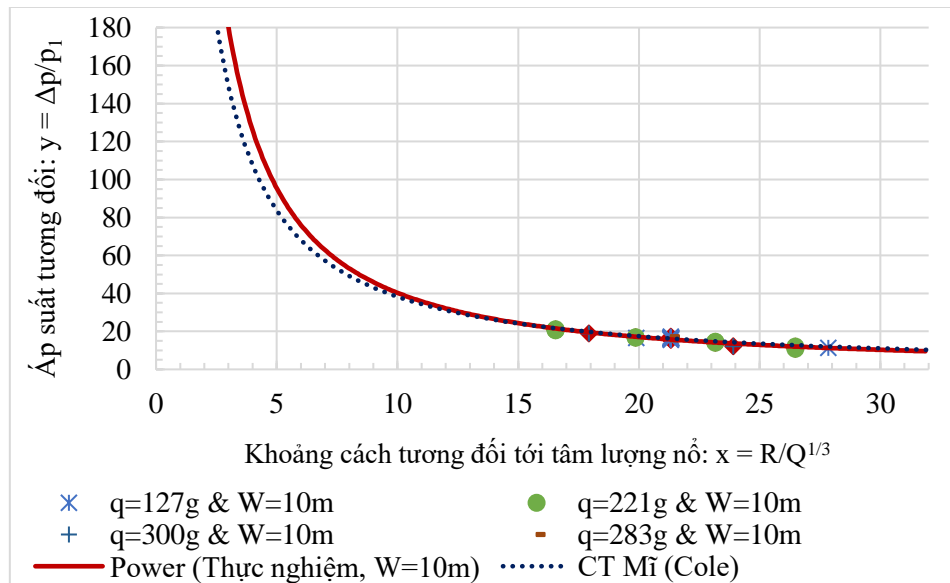
- Đối với thông số đồng dạng theo áp suất có:

$$\frac{\Delta p}{p_1} \left(\frac{r_0}{R} \right) = idem \text{ hoặc: } \frac{\Delta p}{p_1} \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right) = idem \quad (10)$$

Sử dụng lý thuyết đồng dạng tác dụng nổ để tiến hành xử lý trị số áp suất dư tương đối trên mặt sóng xung kích của 24 điểm đo tương ứng 17 vụ nổ và kết hợp sử dụng phần mềm Excel thiết lập qui luật thực nghiệm về sự phụ thuộc của áp suất dư tương đối trên mặt sóng xung kích tương ứng với khoảng cách tương đối theo phương pháp bình phương tối thiểu, cho phép nhận được các qui luật phản ánh trong phương trình (11), (12) và Hình 6 dưới đây:



a- so sánh với Xalamakhin (Nga).



b- so sánh với Cole (Mỹ).

Hình 6. Đồ thị đối chiếu qui luật thực nghiệm nổ dưới nước của Nga, Mỹ và mô hình thí nghiệm về sự phụ thuộc của áp suất dư tương đối theo khoảng cách tương đối.

$$\frac{\Delta p}{p_1} = 13586 \left(\frac{r_0}{R}\right)^{1,13}, \lambda^2 = 0,925 \quad (11)$$

$$\frac{\Delta p}{p_1} = 501,52 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1,13}, \lambda^2 = 0,925 \quad (12)$$

6. Phân tích, đánh giá

Để đánh giá độ tin cậy của trị số áp suất cực đại trên mặt sóng xung kích của mô hình thí nghiệm so với phương pháp tính toán của Nga và Mỹ, cần sử dụng chỉ số so sánh qui luật thực nghiệm rút ra từ mô hình nghiên cứu so với qui luật tìm được của Nga và Mỹ như sau:

- Khi so sánh với qui luật (1) của Nga, sử dụng qui luật thực nghiệm biểu thị dạng (11):

$$\eta = \left(\frac{A_{mh} \cdot \left(\frac{r_0}{R}\right)^\alpha}{14700 \cdot \left(\frac{r_0}{R}\right)^{1,13}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (13)$$

$$= \left(\frac{13586}{14700} - 1 \right) \cdot 100\% = -7,6\%$$

- Khi so sánh với qui luật (2) của Mỹ, sử dụng qui luật thực nghiệm biểu thị dạng (12):

$$\eta = \left(\frac{A'_{mh} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{\alpha'}}{533 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1,13}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (14)$$

$$= \left(\frac{501,52}{533} - 1 \right) \cdot 100\% = -5,9\%$$

Trong đó: A_{mh} , A'_{mh} - hằng số đặc trưng cho biên độ mặt sóng xung kích tương ứng tính theo Nga hoặc Mỹ.

Phân tích so sánh các qui luật thực nghiệm tương ứng với mô hình thí nghiệm với kết quả nghiên cứu của Nga và Mỹ là hội tụ, sai số so với phương pháp tính của Nga và Mỹ tương ứng bằng -7,6% và -5,9%. Điều đó cho phép khẳng định có thể mở rộng phạm vi sử dụng của công thức của Mỹ và Nga mà vẫn đảm bảo được độ chính xác cần thiết.

7. Kết luận

Mô hình nghiên cứu thực nghiệm nổ dưới nước với khối lượng thuốc nổ qui về TNT dao động từ 127 g đến 300 g, chiều sâu nước 15 m và độ sâu đặt lượng nổ 10 m là hoàn toàn đảm bảo độ chính xác cậy chấp nhận được cho việc nghiên cứu thực nghiệm nổ dưới nước với sai số bình quân tuyệt đối nhỏ dưới 8% so với cả hai phương pháp tính của Nga và Mỹ. Thực tế ngay cả phương pháp của Mỹ có trị số độ chênh lệch bình quân vượt phương pháp của Nga là 1,5%.

Kết quả thực nghiệm cho phép rút ra qui luật thực nghiệm về sự phụ thuộc của áp suất dư tương đối trên mặt sóng xung kích lan truyền trong môi trường nước vào khoảng cách tương đối. Qui luật này có chỉ số mũ đặc trưng cho sự tắt dần của sóng xung kích theo khoảng cách bằng 1,13 hoàn toàn trùng hợp với kết quả tính toán của Nga và Mỹ, còn biên độ sóng rút ra từ thực nghiệm nhỏ hơn trị số biên độ sóng theo kết quả của Nga và Mỹ tương ứng là -7,6% so với phương pháp tính của Nga và -5,9% so với phương pháp tính của Mỹ.

Độ lệch biên độ mang giá trị âm phản ánh tiêu hao năng lượng nổ bình quân để đốt nóng môi trường lớn hơn đối với lượng nổ có khối lượng càng nhỏ. Quy luật này cũng phù hợp với phát hiện của tác giả Tô (2015) khi phân tích thực nghiệm nổ dưới nước.

Kết quả nghiên cứu một lần nữa đã nhấn mạnh tính đúng đắn của lý thuyết đồng dạng tác dụng nổ. Kết quả nghiên cứu cũng đã chứng minh việc sử dụng các quy luật thực nghiệm về đồng dạng tác dụng nổ rút ra từ các thử nghiệm với các lượng nổ nhỏ có thể áp dụng để tính toán với các lượng nổ có khối lượng thay đổi trong thực tế. Mặt khác, việc sử dụng các lượng nổ nhỏ cũng hoàn toàn phù hợp với tính năng của thiết bị đo và cho phép giảm chi phí.

Tuy nhiên, cần lưu ý khi sử dụng các lượng nổ có khối lượng nhỏ (đặc biệt là nhỏ hơn lượng nổ nghiên cứu trong bài báo này) thì nên xem xét hiệu chỉnh biên độ quy luật suy giảm sóng xung kích nổ lan truyền trong nước thông qua so sánh hệ số A_{mh} và A'_{mh} rút ra từ thí nghiệm mô hình so với trị số 14.700 (của Nga) và 533 (của Mỹ).

Đóng góp của các tác giả

Trần Đức Việt - chủ trì tiến hành thực nghiệm, tham gia xử lý số liệu và viết bản thảo; Đàm Trọng Thăng - xử lý số liệu, kiểm tra điều kiện biên, viết và hoàn thiện bài báo.

Tài liệu tham khảo

- Baum, Ph. A. & Orlenko, L. P. (2002). *Physics of explosion - Volume 1*. Moscow.
- Bernard, L. M. & Shen, W. (1996). *Water Waves Generated by Underwater Explosions*. Defense Nuclear Agency Alexandria.
- Borodzia, G. A. (1938). *Explosive dredging of sandy rifts*. Gostranstekkhizdat, Moscow, 67p.
- Chadwick, P., Cox, A. & Hopkins, G. (1966). *Mechanics of deep underground explosions*. "Mir", Moscow.
- Cole, R. H. (1948). *Underwater explosions*. Princeton University Press.
- Ma, L. D. & Chu, C. T. (1971). *Design and execution of explosions with large masses*. Beijing.
- Galkin, V. V., Gilmanov, R. A. & Drogoveyko, I. Z. (1987). *Blasting underwater*. "Nedra" Moscow.

- Hồ, S. G., Đàm, T. T., Lê, V. Q. & Hoàng, T. C. (2010). *Nổ hóa học lý thuyết và thực tiễn*. NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội, 663 trang.
- Gorodilov, L. V. (1993). *Study of the mechanical effect of the explosion of underwater overhead charges in soils and rocks*. Novosibirisk.
- Nguyễn, X. K. & Đàm, T. T. (2007). Xác định chỉ tiêu thuốc nổ khi nổ mìn phá toại đá dưới nước bằng lượng nổ đặt trong môi trường đất đá. *Tạp chí Nghiên cứu KHKT-CN quân sự*, số 21/2007.
- Kytuzov, B. N. (1983), *Handbook of explosives*. "Hedra" Moscow.
- Kutuzov, B. N. (1990). *Design of blasting operations in industry*. "Nedra" Moscow.
- Kutuzov, B. N. (1990). *Laboratory work in the discipline "Destruction of rocks by explosion"*. MGI, Moscow.
- Kutuzov, B. N. & Belin, V. A. (2012). *Design and organization of blasting operations*. Mining Book.
- Vu, T. L., Dam, T. T. & Tran, D. V. (2023). Denoising the shockwave pressure signal of underwater explosion based on EMD-CEEMDAN in consideration of the signal curve curvature. *Journal of Science and Technique - Section on Special Construction Engineering*. Ha Noi, 02. <https://doi.org/10.56651/lqdtu.jst.v6.n02.745.sce>.
- Tavrivov, V. M. (1949). *Blasting dredging*. Publishing house of the Ministry of River Fleet of the USSR, Moscow.
- Đàm, T. T., Bùi, X. N. & Trần, Q. H. (2015). *Nổ mìn trong ngành mỏ và công trình*. NXB Khoa học tự nhiên và công nghệ, Hà Nội.
- Đàm, T. T. & Trần, Đ. V. (2021). Nghiên cứu ảnh hưởng của màn chắn bóng khí đến trường sóng nổ lan truyền trong môi trường nước. *Tạp chí khoa học kỹ thuật Mỏ - Địa chất*, 62(5), Hà Nội. [https://doi.org/10.46326/JMES.2021.62\(5\).09](https://doi.org/10.46326/JMES.2021.62(5).09).
- Đàm, T. T., Nguyễn, H. H. & Phan, T. T. (2023). *Công tác nổ - Lý thuyết cơ bản về nổ*. NXB Quân đội nhân dân.
- Tô, Đ. T. (2015). *Nghiên cứu sự lan truyền của sóng nổ trong nước và tương tác của sóng nổ đối với*

- chương ngại công trình*. Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội.
- Sedov, L. I. (1954). *Methods of similarity and dimension in mechanics*. Publishing house GITL.
- Vlasov, O. E. (1957). *Basics of explosion action*. VIA, Moscow.
- Xalamakhin, T. M. (1967). *A manual for solving problems on the theory of the mechanical action of an explosion*. VIA Moscow Publishing House.
- Zamyshlyayev, B. V. & Yakovlev, Yu. S. (1967), *Dynamic Loads During an Underwater Explosion*. Leningrad.