

A STUDY ON THE LAW OF INCREASING PRESSURE OF THE INTERACTION PROCESS BETWEEN SHORT WAVES IN THE MIXTURE LIQUID - VAPOUR

Nguyen Van Tuan*, Le Xuan Long

TNU - University of Technology

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	06/6/2023	Liquid – vapour mixtures are used to refer to liquid media containing vapour bubbles in them. This type of mixture is commonly found in the energy industry, in oil and gas transportation, in hydraulic systems of automobiles and construction machinery. This paper presents the phenomenon of pressure increase due to the interaction between short waves in the mixture in the water containing vapour bubbles. The wave interaction process is described by the system of hydro - thermodynamic equations. The numerical method is applied to calculate, study and analyze the influence of the volume concentration of vapour phase in the mixture on the pressure increase of the waves interaction process. From the obtained results on the dependence of the mixture pressure on the volume concentration of the vapour phase at the time of wave interaction, the pressure increase law of the short waves interaction process in the mixtures of water containing vapour bubbles can be determined.
Revised:	20/6/2023	
Published:	20/6/2023	
KEYWORDS		
Liquid		
Vapour bubbles		
Short wave		
Wave interaction		
Phase		
Pressure		
Mixture		

NGHIÊN CỨU QUY LUẬT TĂNG ÁP SUẤT CỦA QUÁ TRÌNH TƯƠNG TÁC GIỮA CÁC SÓNG NGẮN TRONG HỖN HỢP LỎNG - HƠI

Nguyễn Văn Tuấn*, Lê Xuân Long

Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	06/6/2023	Hỗn hợp lỏng – hơi được dùng để chỉ các môi trường chất lỏng có chứa bọt hơi trong đó. Dạng hỗn hợp này thường gặp nhiều trong công nghiệp năng lượng, trong vận chuyển dầu khí, trong hệ thống thủy lực của ô tô và máy xây dựng. Bài báo này trình bày về hiện tượng tăng áp suất do tương tác giữa các sóng ngắn trong hỗn hợp nước chứa bọt hơi. Quá trình tương tác sóng được mô tả bởi hệ phương trình thủy nhiệt động lực học. Phương pháp số đã được sử dụng để tính toán, nghiên cứu và phân tích sự ảnh hưởng của nồng độ thể tích pha hơi trong hỗn hợp đến sự tăng áp suất của quá trình tương tác sóng. Từ các kết quả nhận được về sự phụ thuộc của áp suất hỗn hợp vào nồng độ thể tích pha hơi tại thời điểm tương tác sóng, quy luật tăng áp suất của quá trình tương tác của các sóng ngắn trong các hỗn hợp của nước chứa các bọt hơi có thể được xác định.
Ngày hoàn thiện:	20/6/2023	
Ngày đăng:	20/6/2023	
TỪ KHÓA		
Chất lỏng		
Bọt hơi		
Sóng ngắn		
Tương tác sóng		
Pha		
Hỗn hợp		
Áp suất		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.8076>

* Corresponding author. Email: nltuan@tnut.edu.vn

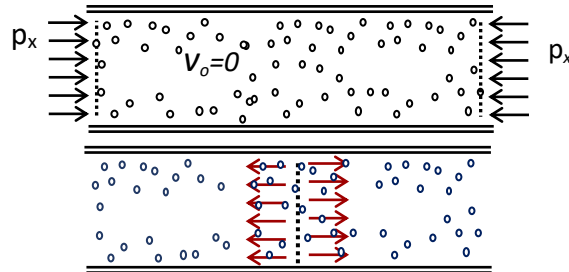
1. Mở đầu

Môi trường chất lỏng chứa bọt hơi thường xuất hiện trong tự nhiên và các quá trình kỹ thuật. Trong môi trường này khi có sự thay đổi áp suất thì các bọt dễ bị co giãn, dẫn đến xảy ra quá trình trao đổi nhiệt và khối lượng giữa các pha. Vì tính chất đặc biệt này, nên đã có nhiều công trình khoa học trong và ngoài nước quan tâm nghiên cứu. Một số các quá trình lan truyền của sóng trong hỗn hợp chất lỏng chứa bọt và sự ảnh hưởng của nó đến quá trình trao đổi nhiệt, khối lượng giữa các pha có thể thấy trong [1], [2]. Hiện tượng áp suất trong hỗn hợp tăng mạnh khi sóng lan truyền trong hỗn hợp và phản xạ lại từ tường cứng được trình bày trong [3], [4], hay hiện tượng áp suất trong hỗn hợp tăng khi có sự tương tác sóng [5], [6]. Tương tác sóng là quá trình khi có hai sóng áp suất lan truyền vào trong hỗn hợp, khi gặp nhau sẽ tương tác và làm áp suất trong hỗn hợp tăng cao. Quá trình tương tác sóng trong hỗn hợp lỏng - hơi là một vấn đề đã và đang được các nhà khoa học trên thế giới và trong nước quan tâm nghiên cứu.

Bài báo này sẽ trình bày quá trình tương tác giữa hai sóng ngắn trong hỗn hợp của nước chứa bọt hơi (sóng ngắn là sự thay đổi nhanh áp suất được gọi là xung áp suất). Trên cơ sở các kết quả nghiên cứu, phân tích về sự thay đổi áp suất trong quá trình tương tác giữa hai sóng ngắn khi cấu trúc của hỗn hợp thay đổi; sử dụng phương pháp nội suy, quy luật của sự tăng áp suất của quá trình tương tác sóng trong các hỗn hợp lỏng hơi có cấu trúc khác nhau sẽ được chỉ ra. Kết quả nghiên cứu sẽ mang lại đóng góp mới, có nhiều ý nghĩa về lý thuyết và ứng dụng trong các ngành công nghiệp năng lượng, trong các hệ thống thủy lực của ô tô và máy xây dựng.

2. Mô hình toán học

Hỗn hợp của nước chứa bọt hơi được chứa trong ống cứng nằm ngang, độ dài L . Với giả thiết bọt hơi hình cầu bán kính R được phân bố đều trong hỗn hợp, không có sự phân chia bọt và nồng độ thể tích pha hơi không quá lớn ($\alpha_{20}^2 \ll 1$). Hình 1 mô tả hai sóng ngắn lan truyền vào, gặp và tương tác nhau sau đó tách thành hai sóng lan truyền ra.



Hình 1. Quá trình lan truyền vào, tương tác và lan truyền ra của hai sóng ngắn trong hỗn hợp lỏng - hơi

Từ các phương trình bảo toàn khối lượng, bảo toàn động lượng, phương trình dòng nhiệt trong pha hơi, phương trình dòng nhiệt trong pha lỏng xung quanh bọt:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\rho \rho_1}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial \zeta} = -4\pi R^2 nk, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\rho \rho_2}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial \zeta} = 4\pi R^2 nk, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial \zeta} = 0, \quad (3)$$

$$q_{2\sigma} = \frac{R}{3} \left[\frac{c_{p2} T_2}{l} \left(1 - \frac{\rho_2^0}{\rho_1^0} \right) - 1 \right] \frac{\partial p_2}{\partial t} \quad (4)$$

$$\rho_1^0 c_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial t} + w_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_1 r^2 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), \quad (5)$$

Trong hệ phương trình trên, các chỉ số dưới 1, 2, 0 là các tham số của chất lỏng, hơi và trạng thái cân bằng ban đầu; α là phân thể tích; p là áp suất; ρ là mật độ trung bình; ρ^0 là mật độ thực; v là vận tốc hỗn hợp; n là số lượng bọt trong một đơn vị thể tích; l là nhiệt dung riêng của hơi nước bão hoà; $c_{p\sigma}$ là nhiệt dung riêng của hơi nước khi áp suất không thay đổi; $q_{2\sigma}$ là dòng nhiệt trong hơi nước từ biên giữa các pha; r là tọa độ vi mô; c_1 là nhiệt dung riêng của chất lỏng; w_1 là vận tốc hướng kính của chuyển động vi mô của chất lỏng xung quanh bọt; T là nhiệt độ; k là cường độ chuyển pha; ζ là tọa độ Lagrange.

Hệ phương trình trên kết hợp với các phương trình bảo toàn số lượng bọt, phương trình thay đổi khối lượng của từng bọt, phương trình trạng thái của pha hơi, phương trình cân bằng pha Clapeyron – Clausius, phương trình tương thích biến dạng Rayleigh - Lamb; đã tạo thành một hệ phương trình thủy nhiệt động lực học kín mô tả quá trình lan truyền các sóng, các quá trình trao đổi nhiệt và khối lượng giữa các pha trong hỗn hợp lỏng – hơi [7].

Các điều kiện đầu và điều kiện biên được cho như sau:

$$t = 0: p_1 = p_0; p_2 = p_0 + \frac{2\sigma}{R}; R = R_0; T_1 = T_2 = T_0;$$

$$\xi = 0: p = p_x(t);$$

$$\xi = L: p = p_x(t).$$

$$\text{Trong đó: } p_x(t) = \begin{cases} p_0(1 + b_1 t) & t < t_1; \\ p_0(1 + b_1 t_1) - b_2(t - t_2) & t_1 \leq t \leq t_2; \\ p_0 & t_2 < t. \end{cases}$$

là xung áp suất, được mô hình hóa bởi hàm $p_x(t)$, ở đây t_1, t_2 được xác định bằng độ dài của xung áp suất ban đầu; các hằng số b_1, b_2 là cường độ của xung áp suất.

Hệ phương trình trên đã được giải số, chương trình tính đã được xây dựng và kiểm định bằng cách so sánh các kết quả nhận được với một số kết quả thực nghiệm [6]. Chương trình này được sử dụng để tính toán, nghiên cứu và phân tích các quá trình lan truyền và tương tác của hai sóng ngắn trong hỗn hợp lỏng – hơi.

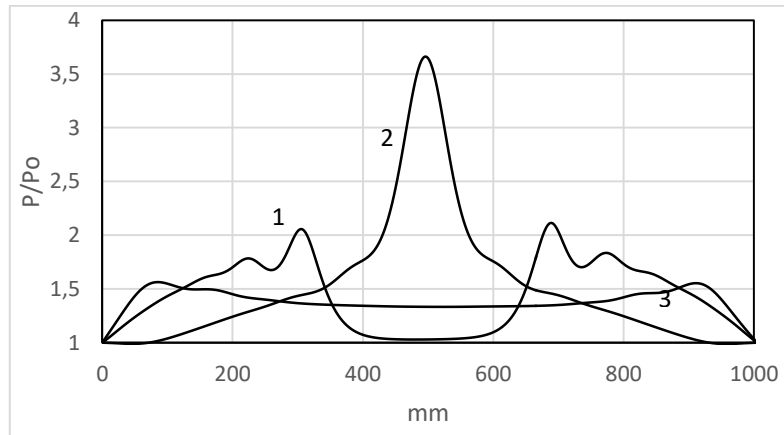
3. Các kết quả và bàn luận

Các xung áp suất được sử dụng để nghiên cứu quá trình tương tác trong bài báo này đều như nhau về cường độ ban đầu $\Delta p_{\max}$ (trong đó $\Delta p_{\max} = (p_{\max} - p_0)/p_0$), về khoảng thời gian tác dụng xung t_0 , cùng tác dụng lên các hỗn hợp của nước chứa bọt hơi được chứa trong ống ngang có cùng độ dài. Tuy nhiên các hỗn hợp này có sự thay đổi về nồng độ thể tích của pha hơi α_{20} .

Trong các hình 2 và 3 là các profile biểu diễn sự tiến triển của sóng áp suất trong quá trình tương tác trong các hỗn hợp, có thể thấy trong giai đoạn đầu sóng lan truyền vào như hai sóng đơn từ hai vị trí đầu ống (đường số 1), chúng gặp nhau, tương tác (đường số 2) sau đó chúng tách nhau và lan truyền từ đó về hai phía ngược nhau (đường số 3).

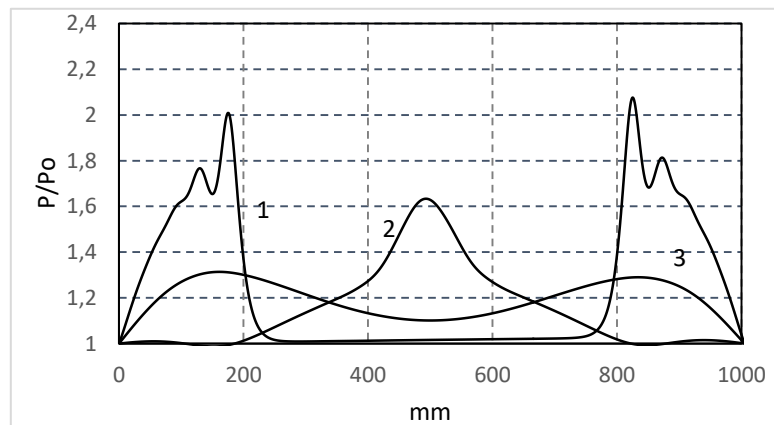
Trên biểu đồ minh họa, thì trục thẳng đứng là các giá trị của áp suất trong hỗn hợp của quá trình tiến triển của xung áp suất, còn trục nằm ngang được lấy theo tọa độ không gian ζ .

Hình 2 biểu diễn quá trình tương tác của hai xung áp suất trong hỗn hợp nước chứa bọt hơi. Trong trường hợp này các điều kiện đầu và điều kiện biên được cho như sau: $\Delta p_{\max} = 1,5$; $T_0 = 373^0\text{K}$; $p_0 = 0,1 \text{ MPa}$; bán kính bọt $R_0 = 1 \text{ mm}$; $L = 1 \text{ m}$; $\alpha_{20} = 0,1\%$ và $t_0 = 1 \text{ ms}$. Các đường cong từ 1-3 tương ứng với các khoảng thời gian $t = 1$; 14,7 và 22 ms (tại các thời điểm trước tương tác, thời điểm tương tác và sau tương tác). Từ các kết quả trong hình 2, có thể thấy cường độ của sóng áp suất trong hỗn hợp sau khi tương tác đã tăng mạnh, giá trị của áp suất trong hỗn hợp khi tương tác sóng là 0,364 MPa.



Hình 2. Quá trình tương tác của hai xung áp suất trong hỗn hợp nước chứa bọt hơi khi thể tích của pha hơi $\alpha_{20} = 0,1\%$; Các đường cong từ 1-3 là các profile áp suất tương ứng với các khoảng thời gian: $t = 1; 14,7$ và 22 ms

Hình 3 biểu diễn quá trình tương tác của hai xung áp suất trong hỗn hợp nước chứa bọt hơi, khi các điều kiện đầu và điều kiện biên được cho như sau: $\Delta p_{\max} = 1,5$; $T = 373^0\text{K}$; $p_0 = 0,1$ MPa; bán kính bọt $R_0 = 1$ mm; $L = 1$ m; $\alpha_{20} = 0,3\%$ và $t_0 = 1$ ms. Các đường cong từ 1-3 tương ứng với các khoảng thời gian $t = 1; 27,9$ và $45,5$ ms (cũng là các thời điểm trước tương tác, thời điểm tương tác và sau tương tác sóng). Từ các kết quả trong hình 3, có thể thấy cường độ của sóng áp suất trong hỗn hợp sau khi tương tác đạt giá trị là $0,163$ MPa.

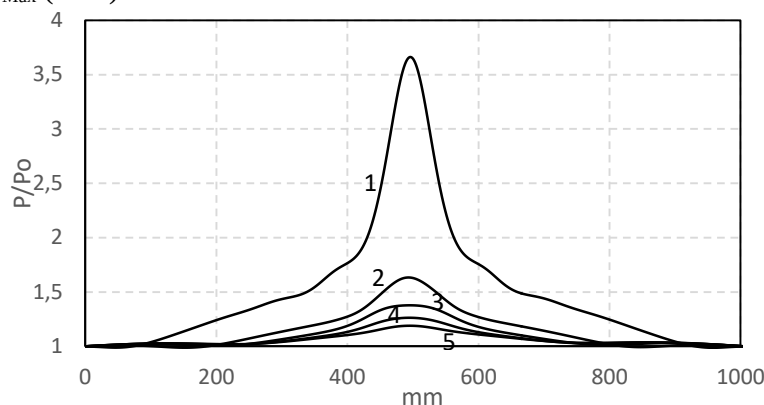


Hình 3. Quá trình tương tác của hai xung áp suất trong hỗn hợp nước chứa bọt hơi khi thể tích của pha hơi $\alpha_{20} = 0,3\%$; Các đường cong từ 1-3 là các profile áp suất tương ứng với các khoảng thời gian: $t = 1; 27,9$ và $45,5$ ms

Các kết quả trên cho thấy, cường độ của xung áp suất khi lan truyền trong hỗn hợp bị giảm do ảnh hưởng của pha hơi trong hỗn hợp tăng, dẫn tới áp suất của hỗn hợp khi tương tác cũng bị giảm đáng kể. Khi nồng độ thể tích pha hơi α_{20} tăng từ $0,1\%$ đến $0,3\%$ thì cường độ áp suất giảm từ $0,364$ MPa đến $0,163$ MPa. Điều này cho thấy trong quá trình lan truyền của xung áp suất đã xảy ra quá trình trao đổi nhiệt và khối lượng giữa các pha trong hỗn hợp.

Hình 4 biểu diễn các profile áp suất tại thời điểm tương tác của hai xung áp suất trong các hỗn hợp của nước chứa bọt hơi, khi cấu trúc của hỗn hợp thay đổi; tức là khi nồng độ thể tích của pha hơi α_{20} là $0,1\%$; $0,3\%$; $0,5\%$; $0,7\%$ và $0,9\%$, ứng với các đường cong từ 1 đến 5; khi đó các giá trị của áp suất của hỗn hợp tương ứng nhận được là: $0,364$; $0,163$; $0,236$; $0,127$ và $0,119$ MPa. Kết quả này đã cho thấy khi nồng độ thể tích của pha hơi trong hỗn hợp tăng đã ảnh hưởng mạnh

tới giá trị nhận được của áp suất của hỗn hợp khi tương tác sóng. Đó chính là sự ảnh hưởng của quá trình trao đổi nhiệt và khối lượng giữa các pha trong hỗn hợp, quá trình này đã làm giảm đáng kể cường độ của xung áp suất khi lan truyền trong hỗn hợp. Các kết quả được trình bày trong bảng 1 dưới đây, trong đó áp suất của hỗn hợp tại thời điểm tương tác giữa hai xung áp suất được ký hiệu là $P_{TT \text{ Max}}$ (MPa).



Hình 4. Các profile áp suất tại thời điểm tương tác của hai xung áp suất trong hỗn hợp nước sôi chứa bọt hơi; Các profile áp suất từ 1 – 5 tương ứng khi thể tích của pha hơi của hỗn hợp α_{20} là 0,1%; 0,3%; 0,5%; 0,7% và 0,9%

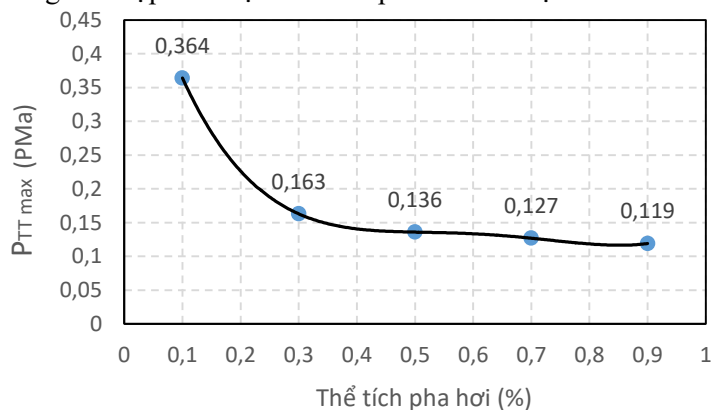
Bảng 1. Kết quả áp suất lớn nhất của hỗn hợp nhận được tại thời điểm tương tác sóng phụ thuộc vào nồng độ thể tích pha hơi α_{20} trong hỗn hợp

Nồng độ thể tích pha hơi α_{20} trong hỗn hợp	$\alpha_{20} = 0,1\%$	$\alpha_{20} = 0,3\%$	$\alpha_{20} = 0,5\%$	$\alpha_{20} = 0,7\%$	$\alpha_{20} = 0,9\%$
$P_{TT \text{ Max}}$ (MPa)	0,364	0,163	0,136	0,127	0,119

Sử dụng phương pháp nội suy để xác định được quy luật tăng áp suất trong hỗn hợp tại thời điểm tương tác giữa hai xung áp suất phụ thuộc vào nồng độ thể tích của pha hơi trong hỗn hợp α_{20} . Quy luật tăng áp suất trong hỗn hợp phụ thuộc vào nồng độ thể tích pha hơi nhận được bởi hàm bậc bốn có dạng như sau:

$$P_{TT}(\alpha_{20}) = 3,6198 \alpha_{20}^4 - 9,0417 \alpha_{20}^3 + 8,213 \alpha_{20}^2 - 3,2596 \alpha_{20} + 0,6165$$

trong đó, P_{TT} là áp suất cực đại trong hỗn hợp nhận được tại thời điểm tương tác, α_{20} là phần thể tích của pha hơi trong hỗn hợp. Đồ thị của hàm áp suất trên được biểu diễn trong hình 5.



Hình 5. Quy luật của sự tăng áp suất trong hỗn hợp tại thời điểm tương tác giữa hai xung áp suất phụ thuộc vào nồng độ thể tích pha hơi trong hỗn hợp α_{20}

Như vậy, sự tăng áp suất trong hỗn hợp của nước chứa bọt hơi khi hai xung áp suất tương tác nhau phụ thuộc vào nồng độ thể tích của pha hơi trong hỗn hợp. Tuy nhiên, do quá trình trao đổi nhiệt và khối lượng giữa các pha diễn ra khi có sóng lan truyền trong hỗn hợp, cho nên giá trị của áp suất cực đại này giảm đáng kể khi nồng độ của thể tích pha hơi tăng.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày quá trình lan truyền vào của hai xung áp suất trong hỗn hợp của nước chứa bọt hơi, chúng gặp nhau, tương tác và tách thành hai sóng lan truyền ngược lại từ đó. Sự ảnh hưởng của nồng độ thể tích pha hơi trong hỗn hợp lên quy luật tăng áp suất của trong hỗn hợp tại thời điểm tương tác sóng đã được nghiên cứu và phân tích. Trên cơ sở các kết quả nhận được có thể đưa ra một số kết luận như sau:

- Do ảnh hưởng của quá trình trao đổi nhiệt và khối lượng giữa các pha khi có sóng lan truyền trong hỗn hợp, khi tăng nồng độ thể tích pha hơi thì giá trị của áp suất tại thời điểm tương tác sóng trong hỗn hợp này giảm. Khi nồng độ thể tích pha hơi α_{20} tăng từ 0,1% đến 0,9% trong hỗn hợp thì giá trị của áp suất lớn nhất tại thời điểm tương tác sóng giảm từ 0,364 MPa đến 0,119 MPa.

- Quy luật tăng áp suất trong hỗn hợp tại thời điểm tương tác sóng phụ thuộc vào nồng độ thể tích pha hơi được biểu diễn bởi hàm bậc bốn có dạng như sau:

$$P_{TT}(\alpha_{20}) = 3,6198 \alpha_{20}^4 - 9,0417 \alpha_{20}^3 + 8,213 \alpha_{20}^2 - 3,2596 \alpha_{20} + 0,6165$$

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] H. N. Duong and T. V. Nguyen, "Interphase Heat-Mass Transfer in Wave Propagation Processes in Bubbly Liquid," *Proceedings of the International Workshop Thermal Hydrodynamics of Multiphase Flows and Applications, Hanoi, Vietnam*, May 2009, pp. 11 – 18.
- [2] A. A. Gubaigullin, O. S. Beregova, and S. A. Bekishev, "Shock waves in non-Newtonian bubbly liquids," *Int.J. Multiphase Flow*, vol. 27, pp. 635-655, 2001.
- [3] T. V. Nguyen, L. D. Hoang, and T. K. T. Nguyen, "Some investigation results of the influence of propagation process of pressure waves in mixture of liquid - vapour on the velocity of mixtures," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 185, no. 09, pp. 33 - 37, 2018.
- [4] T. V. Nguyen, T. T. Nguyen, and T. K. T. Nguyen, "Some research results on the law of pressure increase of the waves reflected at the close valve within the pipe containing mixture of liquid with vapour bubbles," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 225, no. 09, pp. 26 - 30, 2020.
- [5] T. V. Nguyen and H. N. Duong, "The interaction process of Short Waves in some Liquid - Vapour mixtures," in *Proceedings of Scientific works of the National Conference on Fluid mechanical*, July 2006, pp. 515-526.
- [6] H. N. Duong and T. V. Nguyen, "Waves reflected by Solid Wall and Interaction in Vapour Bubbly Liquid," *The 6th International Conference on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety (NUTHOS-6)*, Nara, Japan, October 4-8, 2004, paper ID. N6P016.
- [7] R. I. Nigmatulin, *Dynamics of Multiphase Media*. Hemisphere, publ. Corp., Washington, Vol. 2, Chap. 6, 1991.