

## Một số kết quả nghiên cứu về quy luật tăng áp suất của quá trình tương tác sóng trong hỗn hợp freon 21 chứa bọt hơi

Nguyễn Văn Tuấn<sup>1\*</sup>, Đinh Quang Ninh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Khoa Kỹ thuật Ô tô và Máy động lực, Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên.

<sup>2</sup>Phòng Hành chính – Tổ chức, Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên.

\*Email: nltuan@tnut.edu.vn

Nhận bài: 05/9/2023; Hoàn thiện: 10/11/2023; Chấp nhận đăng: 15/11/2023; Xuất bản: 10/12/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2023.172-177>

### TÓM TẮT

Hỗn hợp freon 21 chứa bọt hơi thường gặp nhiều trong công nghiệp năng lượng, trong hệ thống thủy lực và hệ thống làm mát 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 của freon 21 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 freon 21 chứa các bọt hơi có thể được xác định.

**Từ khóa:** Chất lỏng; Bọt hơi; Sóng ngắn; Tương tác sóng; Pha; Hỗn hợp; Áp suất.

### 1. MỞ ĐẦU

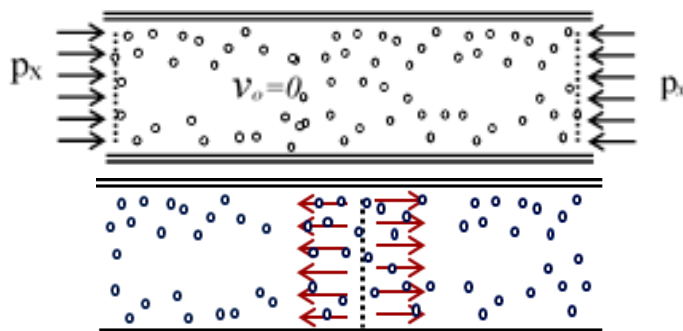
Môi trường chất lỏng chứa bọt hơi thường xuất hiện trong tự nhiên và các quá trình kỹ thuật. Đối với môi trường này khi có sự thay đổi áp suất thì các bọt dễ bị co dãn, dẫn đến xảy ra quá trình trao đổi nhiệt và khối lượng giữa các pha. Vì tính chất đặc biệt này, nên đã có nhiều công trình khoa học trong 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.

Trong bài báo này sẽ trình bày quá trình tương tác giữa hai sóng ngắn trong hỗn hợp của freon 21 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 hỗn hợp freon 21 chứa bọt 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 và hệ thống làm mát của ô tô và máy xây dựng.

### 2. NỘI DUNG CẦN GIẢI QUYẾT

#### 2.1. Mô hình lý thuyết và giả thiết

Hỗn hợp của freon 21 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 ( $\alpha_{20} \ll 1$ ). Trong 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 của freon 21 chứa bọt hơi.

## 2.2. Hệ phương trình động lực học

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;  $\alpha$  là phần thể tích;  $p$  là áp suất;  $\rho$  là mật độ trung bình;  $\rho^0$  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 hòa;  $c_{p\sigma}$  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;  $\zeta$  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 [8].

Trong quá trình lan truyền và tương tác giữa các sóng ngắn, các điều kiện đầu và điều kiện biên được cho như sau:

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

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

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

Trong đó:

$$p_x(t) = \begin{cases} p_0(1 + b_1t) & t < t_1; \\ p_0(1 + b_1t_1) - b_2(t - t_2) & t_1 \leq t \leq t_2; \\ p_0 & t_2 < t. \end{cases}$$

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.

### 3. MÔ PHỎNG, TÍNH TOÁN, THẢO LUẬN

#### 3.1. Phương pháp nghiên cứu, số liệu đầu vào

Hệ phương trình trên đã được giải số dựa trên phương pháp Ode biến đổi và phương pháp khử đuôi qua thuật toán Thomas, chương trình tính đã được xây dựng và kiểm định tính đúng đắn bằng cách so sánh các kết quả nhận được với một số kết quả thực nghiệm đã được trình bày trong [7]. Chương trình này được sử dụng để tính toán, nghiên cứu và phân tích các quá trình lan truyền và tương tác của hai xung áp suất trong hỗn hợp freon 21 chứa bọt hơi. Từ đó, 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.

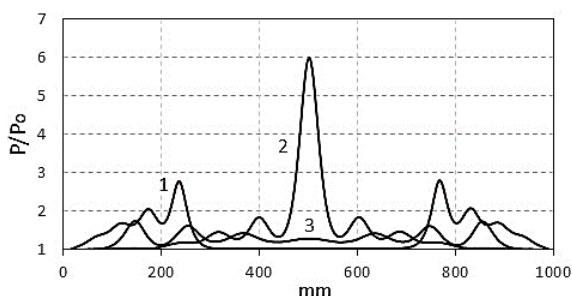
Các xung áp suất được sử dụng để nghiên cứu quá trình tương tác trong bài báo này đều như nhau về cường độ ban đầu  $\Delta p_{max}$  (trong đó  $\Delta p_{max} = (p_{max} - p_0)/p_0$ ), về khoảng thời gian tác dụng xung  $t_0$ , chúng cùng tác dụng lên các hỗn hợp của freon 21 chứa bọt hơi được chứa trong ống ngang có cùng độ dài.

Trong các trường hợp tính toán, các điều kiện đầu và điều kiện biên được cho như sau:  $\Delta p_{max} = 1.5$ ;  $T_0 = 299$  K;  $p_0 = 0.185$  MPa; bán kính bọt  $R_0 = 1$  mm;  $L = 1$  m và  $t_0 = 1$  ms. Tuy nhiên, các hỗn hợp được sử dụng này có sự thay đổi về nồng độ thể tích của pha hơi  $\alpha_{20}$ .

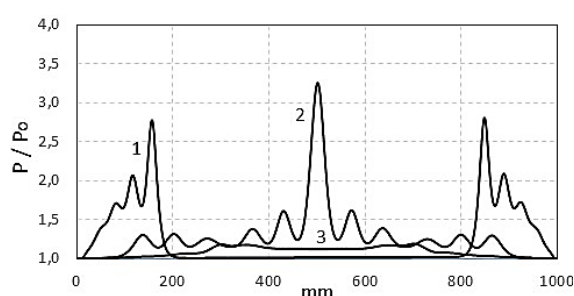
#### 3.2. Kết quả mô phỏng và bình luận

Trong các hình 2, hình 3 là các profile biểu diễn sự tiến triển của xung 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, trục thẳng đứng là các giá trị không thứ nguyên  $P/P_0$  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  $\zeta$  (mm).



**Hình 2.** Quá trình tương tác của hai xung áp suất trong hỗn hợp freon 21 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:  $t = 1; 1.78$  và  $2.81$  ms.

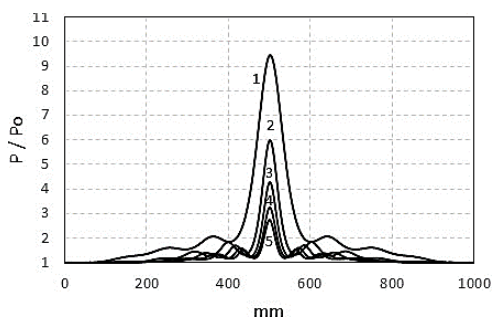


**Hình 3.** Quá trình tương tác của hai xung áp suất trong hỗn hợp freon 21 chứa bọt hơi khi thể tích của pha hơi  $\alpha_{20} = 0.7\%$ . Các đường cong từ 1-3 là các profile áp suất tương ứng với các khoảng thời gian:  $t = 1; 2.71$  và  $4.64$  ms.

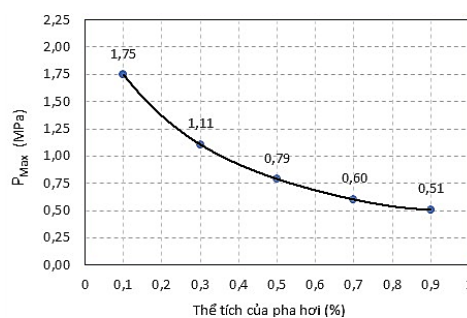
Hình 2 biểu diễn quá trình tương tác của hai xung áp suất trong hỗn hợp freon 21 chứa bọt hơi. Trong trường hợp này, phần thể tích của pha hơi  $\alpha_{20} = 0.3\%$ , các đường cong từ 1-3 tương ứng với các khoảng thời gian  $t = 1; 1.78$  và  $2.81$  ms (tại các thời điểm trước tương tác, thời điểm 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 lớn nhất trong hỗn hợp khi tương tác sóng  $P_{Max} = 1.11$  MPa.

Trong hình 3, biểu diễn quá trình tương tác của hai xung áp suất trong hỗn hợp freon 21 chứa bọt hơi, khi thể tích của pha hơi  $\alpha_{20} = 0.7\%$ . Các đường cong từ 1-3 tương ứng với các khoảng thời gian  $t = 1; 2.71$  và  $4.64$  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 áp suất lớn nhất trong hỗn hợp khi tương tác đạt giá trị  $P_{Max} = 0.6$  MPa.

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, dẫn tới áp suất của hỗn hợp khi tương tác cũng bị giảm đáng kể. Khi nồng độ thể tích pha hơi  $\alpha_{20}$  tăng từ  $0.3\%$  đến  $0.7\%$  thì cường độ áp suất trong hỗn hợp khi tương tác sóng giảm từ  $1.11$  MPa đến  $0.6$  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.** Các profile áp suất tại thời điểm tương tác của hai xung áp suất trong hỗn hợp freon 21 chứa bọt hơi. Các profile áp suất từ 1 – 5 tương ứng khi thể tích của pha hơi của hỗn hợp  $\alpha_{20}$  là  $0.1\%$ ;  $0.3\%$ ;  $0.5\%$ ;  $0.7\%$  và  $0.9\%$ .



**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  $\alpha_{20}$ .

Trong hình 4, biểu diễn các profile áp suất tại thời điểm tương tác của hai xung áp suất trong các hỗn hợp của freon 21 chứa bọt hơi, khi cấu trúc của hỗn hợp thay đổi; tức là khi nồng độ thể tích của pha hơi  $\alpha_{20}$  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 lớn nhất của áp suất trong hỗn hợp khi tương tác sóng tương ứng nhận được là:  $1.75; 1.11; 0.79; 0.60; 0.51$  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 lớn nhất trong hỗn hợp tại thời điểm tương tác giữa hai xung áp suất được ký hiệu là  $P_{Max}$  (MPa).

**Bảng 1.** Giá trị áp suất lớn nhất của hỗn hợp nhận được tại thời điểm tương tác sóng phụ thuộc vào nồng độ thể tích pha hơi  $\alpha_{20}$  trong hỗn hợp.

Nồng độ thể tích pha hơi $\alpha_{20}$ trong hỗn hợp	$\alpha_{20} = 0.1\%$	$\alpha_{20} = 0.3\%$	$\alpha_{20} = 0.5\%$	$\alpha_{20} = 0.7\%$	$\alpha_{20} = 0.9\%$
$P_{Max}$ (MPa)	1.75	1.11	0.79	0.60	0.51

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  $\alpha_{20}$ . Quy luật tăng áp suất trong hỗn hợp phụ thuộc vào nồng độ thể tích pha hơi được xác định bởi hàm bậc bốn có dạng như sau:

$$P_{TT}(\alpha_{20}) = 4,2344 \alpha_{20}^4 - 10,837\alpha_{20}^3 + 11,337\alpha_{20}^2 - 6,49376\alpha_{20} + 2,2923$$

trong đó,  $P_{TT}$  là áp suất cực đại trong hỗn hợp nhận được tại thời điểm tương tác,  $\alpha_{20}$  là phần thể tích của pha hơi trong hỗn hợp. Đồ thị của hàm áp suất trên được biểu diễn trong hình 5, trong đó trục thẳng đứng biểu diễn áp suất trong hỗn hợp (MPa) và trục nằm ngang biểu diễn nồng độ thể tích pha hơi trong hỗn hợp  $\alpha_{20}$  (%).

Như vậy, sự tăng áp suất trong hỗn hợp của freon 21 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 freon 21 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  $\alpha_{20}$  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 1,75 MPa đến 0.51 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 xác định bởi hàm bậc bốn có dạng như sau:

$$P_{TT}(\alpha_{20}) = 4,2344 \alpha_{20}^4 - 10,837\alpha_{20}^3 + 11,337\alpha_{20}^2 - 6,49376\alpha_{20} + 2,2923$$

Các kết quả tính toán này có thể dự báo quá trình tăng áp trong lĩnh vực truyền dẫn thủy lực trong công nghiệp, các hệ thống làm mát trong ô tô và máy động lực; là tham số an toàn quan trọng trong việc thiết kế, chế thử.

Phương hướng tiếp theo sẽ tiếp tục nghiên cứu cụ thể hơn về quá trình trao đổi nhiệt, khối lượng giữa các pha trong hỗn hợp; nghiên cứu về quy luật tăng áp suất trong hiện tượng sóng va và một số hiện tượng bất thường khác xảy ra trong động lực học dòng chảy nhiều pha.

**Lời cảm ơn:** Nhóm tác giả cảm ơn sự tài trợ về kinh phí của Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [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, pp. 11 – 18 , (2009).
- [2]. A. A. Gubaigullin, O.Sh. Beregova and S. A. Bekishev, “Shock waves in non-Newtonian bubbly liquids”, Int.J. Multiphase Flow **Vol. 27**, pp. 635-655, (2001).
- [3]. Nguyễn Văn Tuấn, Hoàng Diệu Linh và Nguyễn Thị Kim Thoa, “Một số kết quả nghiên cứu về ảnh hưởng quá trình lan truyền của sóng áp suất trong hỗn hợp Lỏng - Hơi tới vận tốc của hỗn hợp”, Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật, Đại học Thái Nguyên, **tập 185** số 09, tr. 33 - 37, (2018).
- [4]. Nguyễn Văn Tuấn, Lê Thu Thủy và Nguyễn Thị Kim Thoa, “Một số kết quả nghiên cứu về quy luật tăng áp suất của sóng phản xạ trên van đóng của ống chứa hỗn hợp chất lỏng - hơi”, Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật, Đại học Thái Nguyên, **tập 225**, số 09, tr. 26 - 30, (2020).

- [5]. Nguyen Van Tuan and Le Xuan Long, “Some research results on the law of increasing pressure of the interaction process between short waves in the mixture liquid – vapour”, Thai Nguyen University Journal of Science and Technology, **Vol. 228** no. 10, pp. 312-317, (2023).
- [6]. H. N. Duong and T. V. Nguyen, “Waves reflected by Solid Wall and Interaction in Vapour Bubbly Liquid,” The 6<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety (NUTHOS-6), Nara, Japan, paper ID. N6P016, October 4-8, (2004).
- [7]. H. N. Duong and T. V. Nguyen, “Water Hammer Phenomena in Mixture of Liquid with Vapour Bubbles” , Proceedinhgs of the 8<sup>th</sup> Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics in Naval Architecture, Ocean Technology and Constructions September 20-23, 2016 Hanoi, Vietnam, pp. 355 – 359, (2016).
- [8]. R.I. Nigmatulin, “Dynamics of Multiphase Media”. Hemisphere, publ. Corp., Washington, Vol. 2, Chap. 6, (1991).

#### **ABSTRACT**

##### **Some research results on the law of increasing pressure of the wave interaction process in the mixture freon21 with vapour bubbles**

*The mixture freon 21 containing vapour bubbles is commonly found in the energy industry, in hydraulic systems and cooling 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 freon 21 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 freon 21 containing vapour bubbles can be determined.*

**Keywords:** Liquid; Vapour bubbles; Short wave; Wave interaction; Phase; Presure; Mixture.