

## ẢNH HƯỞNG CỦA TRAO ĐỔI NHIỆT - CHẤT LÊN ĐỘNG LỰC HỌC SÓNG MÔI TRƯỜNG HAI PHA

DƯƠNG NGỌC HẢI

### §1. MỞ ĐẦU

Môi trường không đồng nhất rất đa dạng: vật liệu composit các loại hỗn hợp v.v... và xuất hiện trong nhiều lĩnh vực hoạt động khác nhau của con người [1-4]. Bài báo trình bày một số kết quả nghiên cứu động lực học sóng của môi trường hỗn hợp chất lỏng với chất khí hoặc hơi, thường gặp trong các ngành năng lượng, trong công nghiệp hóa học, trong công nghiệp khai thác, vận chuyển dầu khí và trong kỹ thuật Kriogen.

### §2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC

Hỗn hợp lỏng - khí có cấu trúc bọt có thể nghiên cứu trong khuôn khổ mô hình lỏng thẩm tương tác của 2 môi trường liên tục [1, 2]: pha thứ 1 - chất lỏng mang, pha thứ 2 - pha khí. Giả thiết vận tốc chuyển động của các pha như nhau trong hệ tọa độ Lagrange  $(x, t)$  những phương trình cân bằng cơ bản, điều kiện ban đầu và điều kiện biên đối với chuyển động phẳng một chiều có dạng sau:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \rho_1 \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial x} &= -J; \quad \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \rho_2 \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial x} = J; \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_2^0 \right) &= J n^{-1} \quad (\text{hay là: } \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial x} = 0); \\ \frac{\partial \tau}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} &= g; \\ (1 - \varphi_1) R \frac{\partial W_{1\sigma}}{\partial t} + 1,5(1 - \varphi_2) W_{1\sigma}^2 + \frac{4v_1}{R} W_{1\sigma} + \\ \frac{J}{4\pi R^2 n \rho_1^0} \left[ 2(1 - \varphi_1) W_{1\sigma} - \frac{J}{4\pi R^2 n \rho_2^0} \left( 1 - \frac{\rho_2^0}{\rho_1^0} \right) \right] &= \frac{1}{\rho_1^0} \left( p_2 - p_1 - \frac{2\sigma}{R} \right); \\ \frac{\partial R}{\partial t} = W_{1\sigma} + \frac{J}{4\pi R^2 n \rho_1^0} &= W_{2\sigma} + \frac{J}{4\pi R^2 n \rho_2^0}; \end{aligned} \quad (2.1)$$

Trong đó  $\rho_i = \alpha_i \rho_i^0$ ;  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ;  $\rho = \rho_1 + \rho_2$ ;  $\alpha_2 = \frac{4}{3} \pi R^3 n$ ;

$$p = \alpha_1 p_1 + \alpha_2 (p_2 - 2\sigma/R); \rho_1^0 = \text{const}; \rho_2^0 = p_2/BT_2;$$

$$\varphi_1 = 1,5(\alpha_2^{1/3} - \alpha_2)\alpha_1; \varphi_2 = \alpha_1^{-1} [(2 + \alpha_2)\alpha_2^{1/3} - 3\alpha_2].$$

$$t = 0: p_1 = p_0; p_2 = p_0 + 2\sigma/R_0; R = R_0;$$

$$T_1 = T_2 = T_0; v = W_{1\sigma} = W_{2\sigma} = 0.$$

$$x = 0: p = p_b(t) \text{ hay là } (\partial p/\partial x)_{x=0} = \varphi_b(t).$$

$$x \rightarrow +\infty: p \rightarrow p_0, v \rightarrow 0.$$

Ở đây,  $\rho^0$  là mật độ thực và mật độ trung bình;  $p$  là áp suất;  $\alpha_v$  là phần thể tích và vận tốc;  $R$  là bán kính bọt,  $g$  là cường độ lực ngoài;  $\sigma$  là hệ số sức căng bề mặt;  $x$  là tọa độ;  $t$  là thời gian;  $W$  là vận tốc chuyển động hướng tâm;  $T$  là nhiệt độ  $B$  là hằng số khí;  $v$  là hệ số nhớt;  $J$  là cường độ chuyển pha trên một đơn vị thể tích. Chỉ số dưới  $i = 1, 2$  dùng để chỉ các tham số của pha lỏng và pha khí tương ứng. Chỉ số dưới  $0$  dùng để chỉ các tham số ở trạng thái ban đầu.

1. Hỗn hợp chất lỏng với chất khí không hòa tan và không ngưng tụ. Trong trường hợp này  $J = 0$  và phương trình thay đổi nội năng của pha khí có dạng sau:

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = -p_2 \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{\rho_2^0} \right) + \frac{pq}{\alpha_2 \rho_2^0}; u_2 = C_{v_2} T_2;$$

$$q = 2\pi R \lambda_2 \text{Nu}_2 (T_0 - T_2); \text{Nu}_2 = \begin{cases} \sqrt{\text{Pe}_2}, & \text{Pe}_2 > 100 \\ 10, & \text{Pe}_2 \leq 100 \end{cases} \quad (2.2)$$

trong đó

$$\text{Pe}_2 = 12(\gamma - 1) \frac{R|W_{1\sigma}| \rho_2^0 T_0}{\rho_2^0 \mathcal{D}_2 (T_0 - T_2)}, \quad \mathcal{D}_2 = \frac{\lambda_2}{\rho_2^0 C_{v_2}}$$

ở đây  $\lambda$  là hệ số truyền nhiệt;  $\gamma$  là chỉ số đoạn nhiệt của khí;  $\text{Nu}$  là số Nusselt;  $\text{Pe}$  là số Pekle;  $c$  là nhiệt dung riêng. Chỉ số dưới  $v$  dùng để chỉ nhiệt dung riêng đẳng tích ( $C_v$ ).

2. Hỗn hợp chất lỏng với hơi.

Trong trường hợp này bài toán nhiệt có dạng sau:

$$\rho_1^0 C_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial t} + W_{1\sigma} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) = r^{-2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{1r} r^2 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right); \quad (2.3)$$

$$r = R(t): T_1 = T_2; J_l = -4\pi R^2 n (q_{1\sigma} + q_{2\sigma});$$

$$q_{1\sigma} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R(t)};$$

$$q_{2\sigma} = \frac{R}{3} \left[ \frac{C_{v_2} \gamma T_2}{l} \left( 1 - \frac{\rho_2^0}{\rho_1^0} \right) \right] \frac{\partial p_2}{\partial t};$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{T_2}{\rho_2^0 l} \left( 1 - \frac{\rho_2^0}{\rho_1^0} \right) \frac{dp_2}{dt}.$$

$$r = \alpha_2^{-1/3} R(t); \partial T_1 / \partial r = 0.$$

ở đây  $l$  là nhiệt lượng riêng hóa hơi,  $r$  là tọa độ hướng tâm.

3. Đối với chất khí hòa tan thay vì bài toán nhiệt phải xét bài toán khuếch tán. Có thể chỉ ra rằng về mặt toán học trong trường hợp này cũng gặp bài toán tương tự (2.3) và dễ đơn giản không viết ra ở đây.

### §3. TIÊU CHUẨN DÒNG DẠNG

Các bài toán (2.1), (2.2) và (2.1), (2.3) là những bài toán nhiều tham số, phi tuyến phức tạp. Sử dụng thủ pháp đưa về dạng không thứ nguyên có thể chỉ đưa ra các số và tổ hợp không thứ nguyên đặc trưng cho môi trường hỗn hợp:

Chất lỏng với chất khí không hòa tan, không ngưng tụ:

$$G = \frac{gR_o}{a_2^* \sqrt{\alpha_{10} \alpha_{20}}}, S = \frac{2\sigma}{\rho_o R_o}, Re_r = \frac{a_* R_o}{4\nu_1}, \alpha_{20}, \varepsilon_o = \frac{\rho_{20}^o}{\rho_1^o}, \Phi_o = \frac{p_o}{\rho_1}, \gamma, Pe_2, \Delta P_b = \frac{p_b p_o}{p_o} \quad (3.1)$$

và chất lỏng hơi:

$$G, S, Re_r, \alpha_{20}, \varepsilon_o, \Phi_o, \gamma, C_{2*} = BT_o/l, C_{1*} = C_1 T_o / \varepsilon_o, Pe_1 = a_* R_o \rho_1^o C_1 \lambda_1^{-1}, \delta = a_*^2 l^{-1}, \Delta P_b (a_*^2 = p_o / \rho_1^o)$$

thể hiện ảnh hưởng của lực ngoài ( $G$ ) hiệu ứng mao dẫn ( $S$ ), độ nhớt (số Reynolds  $Re_r$ ), thể tích dị vật ( $\alpha_{20}$ ), quan hệ mật độ ( $\varepsilon_o$ ), tính chất vật lý nhiệt của khí ( $\gamma, Pe_2$ ), của hơi ( $\gamma, C_{2*}$ ), của chất lỏng ( $C_{1*}, Pe_1, \delta$ ) và cường độ tải ( $\Delta P_b$ ) lên động lực học sóng trong môi trường.

Thông thường  $\gamma, Pe_1, Pe_2$  là các hằng số, còn  $C_{1*}, C_{2*}$  và  $\delta$  là các hàm số tăng chậm theo áp suất. Đối với các bọt khí kích thước không quá nhỏ ( $R_o \geq 10^{-3}$  mm) và trong chất lỏng không quá nhớt thì ảnh hưởng của các hiệu ứng mao dẫn ( $S$ ) cũng như nhớt ( $Re_r$ ) là không đáng kể trên nền tán xạ nhiệt. Bởi vậy các số và tổ hợp không thứ nguyên chính đối với hỗn hợp; chất lỏng với chất khí không hòa tan, không ngưng tụ là:

$$G, \alpha_{20}, \gamma, Pe_2, \Delta P_b (\varepsilon_o \ll 1, \Phi \sim 1 - \alpha_{20}) \quad (3.3)$$

và chất lỏng với hơi là:

$$G, \alpha_{20}, \gamma, C_{2*}, C_{1*}, Pe_1, \Delta P_b (\delta, \varepsilon_o \ll 1, \Phi \sim 1 - \alpha_{20}) \quad (3.4)$$

Lưu ý từ (3.3) và (3.4) để thấy rằng với hỗn hợp chất lỏng với chất khí không hòa tan, không ngưng tụ trong hỗn hợp lỏng - hơi tính chất vật lý nhiệt của chất lỏng là một trong những nhân tố quan trọng nhất ảnh hưởng lên động lực học sóng của môi trường. Để tiện phân tích tham khảo trên bảng 1 và 2 trình bày các số và tổ hợp không thứ nguyên của một số môi trường hay gặp trong thực tế kỹ thuật.

Bảng 1

Hỗn hợp	$\frac{p_o}{10^5 Pa}$	$R_o$ mm	$10^3 G$	$10^3 S$	$10^{-3} Re_r$	$10^3 \varepsilon_o$	$\gamma$	$10^3 Pe_2$
Nước + khí heli	1	1	0,447	1,436	2,868	0,161	1,667	0,033
	10		0,040	0,144	9,559	1,774	1,672	0,910
Nước + không khí	1	0,1	0,045	14,360	2,868	1,179	1,402	0,032
		1	0,047	01,436				
Nước + khí Nito	1	1	0,447	1,436	2,868	1,126	1,401	0,322
Nước + khí cacbonic	1	1	0,447	1,436	2,868	1,777	1,287	0,709
	10		0,040	0,144	9,559	20,649	1,284	25,250

Bảng 2

Hỗn hợp 1 thành phần chất lỏng + hơi	$P_c$ $10^5 \text{Pa}$	$T_s$ , K	$Re$ , mm	$10^3 \varepsilon_0$	$\gamma$	$C_{1*}$	$C_{2*}$	$10^{-5} Pe_1$
Nước	0,5	354	1	0,31	1,31	1500	0,071	0,44
	1	373		0,52	1,28	1130	0,076	0,61
	5	424		2,9	1,24	301	0,090	1,34
Freon - 21	1,85	299	1	6,1	1,19	230	0,096	1,00
Nitơ	1	77,4	1	5,7	1,32	133	0,086	1,89
Freon - 12	7	301	1	31,0	1,18	65	0,118	4,30
	13	326		62,6	1,24	48	0,140	7,23

#### § 4. MỘT SỐ KẾT QUẢ

Để tiện trong khi phân tích số liệu tính toán và so sánh với các đường cong thực nghiệm kết quả được trình bày trong hệ tọa độ Euler. Quan hệ giữa tọa độ Euler  $y$  và Lagrange  $x$  được xác định bởi phương trình sau:

$$y(x; t) = x + \int_0^t v(x, \xi) d\xi \quad (4.1)$$

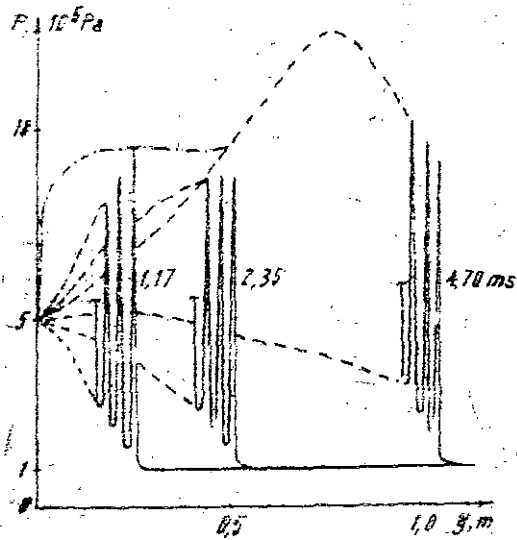
Các hệ phương trình (2.1), (2.2) và (2.1), (2.3) đóng kín được giải trên MTĐT bằng tổ hợp của phương pháp Euler tính lặp và phương pháp nhân tử hóa thực hiện theo 2 bước.

Kết quả tính toán được kiểm tra bằng cách so sánh với kết quả tính toán nghiệm dừng đã thu nhận được bằng phương pháp khác. Cũng tiến hành kiểm tra khi không có trao đổi nhiệt chất hoặc không có trao đổi chất. Ngoài ra để kiểm tra phương pháp và chương trình tính kết quả tính toán còn được so sánh với nghiệm không dừng của bài toán truyền nhiệt - chất xung quanh quả cầu có đường kính không đổi và với lời giải của bài toán động lực học bọt khí đơn độc trong trường áp suất thay đổi, các bước chia lưới không gian và thời gian được lựa chọn từ điều kiện tối ưu về độ lớn cho phép để đảm bảo độ chính xác kết quả tính toán.

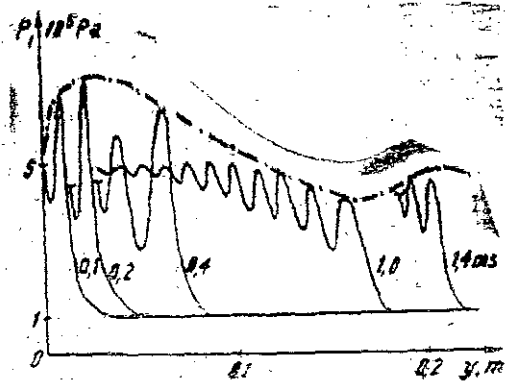
Bài toán nhiệt và kèm theo nó có thể là sự trao đổi chất trong hỗn hợp rất phức tạp. Ngay đơn giản như trong hỗn hợp chất lỏng với chất khí không hòa tan và không ngưng tụ, để mô hình hóa một cách chính xác quá trình này đòi hỏi phải thỏa mãn được hai tiêu chuẩn đồng dạng  $\gamma$  và  $Pe_2$  còn đối với hỗn hợp, trong đó khi thay đổi các điều kiện tải ngoài gây ra các quá trình động lực học và kéo theo sự chuyển chất, thì số các tiêu chuẩn đồng dạng đòi hỏi phải được đáp ứng lên đến 4:  $\gamma$ ,  $C_{1*}$ ,  $C_{2*}$  và  $Pe_1$ . (Đối với chất lỏng nhớt số lượng các tiêu chuẩn đồng dạng chỉ có 1 là số Reynolds).

Đối với hỗn hợp chất lỏng với hơi dễ mô tả chính xác quá trình trao đổi nhiệt — chất giữa các pha « bài toán nhiệt ngoài » xung quanh các bọt hơi đóng vai trò quyết định. Độ chính xác của cường độ chuyển pha được xác định bởi khả năng tinh chỉnh xác đồng nhiệt  $q_{10}$ . Bởi vậy đòi hỏi phải tinh chỉnh xác bài toán trao đổi nhiệt không dừng giữa pha khí và pha lỏng, điều này khác hẳn so với hỗn hợp chất lỏng và chất khí không ngưng tụ, không hòa tan, ở đó sự tiến hóa của sóng áp suất chủ yếu xác định bởi tính chất vật lý nhiệt của chất khí (bài toán nhiệt trong) chứ không phải tính chất vật lý nhiệt của chất lỏng (bài toán nhiệt ngoài).

Ngoài ra cần lưu ý rằng nếu như trong hỗn hợp chất lỏng với các chất khí không hòa tan, không ngưng tụ tham số  $\varepsilon_0$  bé ( $\varepsilon_0 \ll 1$ ) và sự có mặt của pha khí thể hiện chủ yếu qua khả năng dẫn hồi của hỗn hợp thì trong hỗn hợp chất lỏng với hơi tham số này còn có vai trò quan trọng trong quá trình tán xạ năng lượng (thông qua tham số  $C_{1*}$ ). Tăng  $\varepsilon_0$  và  $Pe_1$  có nghĩa là tăng khối lượng hơi trong các bọt và làm chậm lại quá trình trao đổi nhiệt — chất giữa các pha. Điều đó dẫn đến sự tăng thời gian cũng như khoảng cách phục hồi (relaxation), đồng thời làm tăng độ dày của các mặt sóng.



Hình 1



Hình 2

Trên hình 1 và 2 trình bày quá trình tiến hóa của sóng xung kích trong hỗn hợp nước ( $H_2O$ ) với không khí (hình 1) và trong hỗn hợp nước ( $H_2O$ ) và hơi nước (hình 2), với các điều kiện sau đây:  $p_0 = 0.1 MPa$ ;  $\Delta P_0 = 4$ ;  $R_0 = 1 mm$ ;  $\alpha_{20} = 0.02$  (các tiêu chuẩn đồng dạng xem trong bảng 1 và 2). Để nhận thấy rằng quá trình tiến hóa sóng xung kích trong 2 hỗn hợp trên khác nhau mạnh cả về chất lượng cũng như về số lượng mà qua những nghiên cứu chi tiết có thể chỉ ra rằng trong đó ảnh hưởng của quá trình trao đổi nhiệt — chất giữa các pha đóng vai trò quan trọng.

## § 5. KẾT LUẬN

Trình bày một số kết quả chính về ảnh hưởng của quá trình trao đổi nhiệt — chất lên động lực học sóng môi trường hai pha lỏng — khí hoặc hơi có xét đến khả năng ngưng hơi hay hòa tan của pha khí.

Địa chỉ  
Viện Cơ học Viện KHVN

Nhận ngày 31/5/1988

(Xem tiếp trang 64)