

DÒNG CHẢY KHÔNG DỪNG CỦA CHẤT LỎNG Ở NHIỆT ĐỘ SÔI

DƯƠNG NGỌC HẢI

Để làm tăng hiệu suất của các quá trình công nghệ, để nâng cao tuổi thọ của thiết bị, máy móc và nâng cao sự an toàn trong khi vận hành, những tiến bộ của kỹ thuật (kỹ thuật kriôgen, công nghệ hóa học, các ngành năng lượng v.v...) đòi hỏi khi mô hình hóa nhiều quá trình cơ học phải tính đến những ảnh hưởng do sự không đồng nhất pha của môi trường làm việc gây nên [2]. Dòng chảy không dừng của chất lỏng ở nhiệt độ sôi là một trong nhiều bài toán thuộc lớp bài toán đó. Trong khuôn khổ bài báo này, tác giả giới thiệu kết quả sử dụng mô hình hỗn hợp cân bằng để nghiên cứu chuyển động không dừng của chất lỏng ở nhiệt độ sôi có tính đến quá trình chuyển pha. Mô hình toán học được đưa về hệ phương trình vi phân á-tuyến tính dạng hyperbolic và được giải bằng phương pháp số trên máy tính điện tử. Lời giải tìm thấy được so sánh với kết quả thực nghiệm.

§1. MÔ TẢ HIỆN TƯỢNG VẬT LÝ

Một điều không thể tránh khỏi khi nghiên cứu chuyển động của chất lỏng ở nhiệt độ gần nhiệt độ sôi là phải xét đến ảnh hưởng của quá trình chuyển pha (hóa hơi hay ngưng tụ) khi áp suất môi trường thay đổi trong một khoảng rộng đáng kể. Ảnh hưởng của quá trình này dẫn đến sự thay đổi liên tục cấu trúc môi trường mà kết quả là tính chất cơ học của môi trường như vận tốc sóng âm, độ nén, sự tương tác pha v.v... thay đổi một cách cơ bản về số lượng cũng như về chất lượng. Thực tế đó gây rất nhiều khó khăn cho việc mô hình hóa và giải quyết bài toán. Tổng quan về động lực học môi trường hai pha hỗn hợp lỏng-khí (hơi), một số đặc thù cũng như cố gắng nghiên cứu của cơ học trong thời gian cuối có thể tìm thấy trong [3, 4] và trong các tài liệu tham khảo trích dẫn tương ứng. Dòng chảy không dừng của môi trường lỏng hoặc khí một pha có thể tìm thấy trong [5].

§2. NHỮNG GIẢ THIẾT VÀ NHỮNG PHƯƠNG TRÌNH CƠ BẢN

1. Để mô tả dòng chảy của hỗn hợp chất lỏng-hơi mô hình toán học sẽ đơn giản đi rất nhiều nếu giả thiết hoàn thành những điều kiện sau:

a) Dòng chảy một chiều.

b) Chất lỏng, hơi tại mỗi điểm nằm ở trạng thái bão hòa phù hợp với áp suất tại điểm đó và vận tốc của chúng là bằng nhau (Hỗn hợp cân bằng địa phương).

c) Bỏ qua ảnh hưởng của hiệu ứng nhớt và tác dụng của thành ống. Giả thiết cuối cùng thể hiện sự bỏ qua mất mát năng lượng trong vùng pha và ảnh hưởng của thành ống. Các hiệu ứng này thường đóng vai trò không đáng kể so với các hiệu ứng trao đổi nhiệt-chất nói riêng và tương tác pha nói chung [2-4]. Còn giả thiết b) đúng về mặt vật lý thể hiện sự bỏ qua ảnh hưởng của chuyển động tương đối giữa các pha và hiện tượng « sôi trẻ » của chất lỏng. Giả thiết này cho phép xem xét hỗn hợp như một môi trường suy rộng ba tham số và để mô tả chuyển động của nó có thể sử dụng những phương pháp nghiên cứu của cơ học các môi trường liên tục [6].

2. Đối với hỗn hợp trên trong trường hợp dòng chảy một chiều không có những mặt gián đoạn, các phương trình cân bằng vật chất, xung lượng và năng lượng trong hệ tọa độ Lagrange có thể viết dưới dạng sau:

$$\begin{aligned} \dot{I}(\xi, t) &= \frac{\rho_0}{\rho(\xi, t)}; \quad \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial \xi} = F(\xi, t); \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho u I(\xi, t) + \rho_0 \frac{v^2}{2} \right] + \frac{\partial(vp)}{\partial \xi} &= vF(\xi, t); \quad (2.1) \\ \rho_i &= \alpha_i \rho^0; \quad \rho = \rho_1 + \rho_2; \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1; \quad \alpha \equiv \alpha_2; \\ u_i &= x_i u_i^0; \quad u = u_1 + u_2; \quad x_1 + x_2 = 1; \quad x \equiv x_2. \end{aligned}$$

Trong đó: ρ , v , p tương ứng là mật độ khối lượng, vận tốc và áp suất; u là nội năng; F là cường độ lực ngoài; α và x là phần thể tích và phần khối lượng của pha hơi; I là Jacôbiên tính đến sự biến dạng của mạng tọa độ Lagrange; t là thời gian; các chỉ số 1, 2 dùng để chỉ các đại lượng liên quan đến pha lỏng hoặc hơi tương ứng; chỉ số 0 ở trên dùng để chỉ các đại lượng trước khi trung bình hóa theo pha; chỉ số 0 ở dưới dùng để chỉ các đại lượng ở trạng thái ban đầu. Bỏ qua hiệu ứng bề mặt (σ - pha).

Liên hệ giữa hệ tọa độ Lagrange ξ và hệ tọa độ Euler X được thiết lập trên cơ sở hệ thức:

$$\frac{\partial X(\xi, t)}{\partial t} = v(\xi, t) \quad (2.2)$$

Để thuận tiện cho việc giải bằng phương pháp số hệ phương trình (2.1), (2.2) được biến đổi sang dạng « tựa divergence »

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial \mathcal{D}(U)}{\partial \xi} = R \left(U, \frac{\partial U}{\partial \xi} \right) \quad (2.3)$$

$$U = \begin{pmatrix} 1 \\ \rho \\ v \\ p \\ X \end{pmatrix}, \quad \mathcal{D}(U) = \frac{1}{\rho_0} \begin{pmatrix} -v \\ p \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad R = \frac{1}{\rho_0} \begin{pmatrix} 0 \\ F \\ a_{ep}^2 \frac{\partial v}{\partial \xi} \\ \rho_0 v \end{pmatrix}$$

trong đó vận tốc cân bằng của âm có dạng:

$$a_e^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s = \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_p \left[\frac{1}{\rho} - \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_p \right]^{-1} = \frac{l}{\rho(\rho^A - B)} \quad (2.4)$$

$$A = B \left(\frac{\partial i_1^0}{\partial p} + x \frac{\partial l}{\partial p} \right) - l \left(\frac{\partial V_1}{\partial p} + x \frac{\partial B}{\partial p} \right);$$

$$B = V_2 - V_1; \quad V_i = \frac{1}{\rho_i^0}; \quad i = (1-x)i_1^0 + xi_2^0.$$

Ở đây: i là entalpi, còn l là nhiệt lượng riêng hóa hơi. Nhận xét: Lời giải ô tô môdel của hệ phương trình (2.3) trong trường hợp không có lực ngoài tác dụng ($F=0$) có thể nhận được bằng phép thế: $\eta = \xi/t$. Điều kiện để tồn tại nghiệm không tầm thường của hệ phương trình thu được cho kết quả:

$$\eta = \pm \frac{1}{\rho_0} a_{ep} \quad (2.5)$$

(Dấu + hoặc - phụ thuộc vào phép chọn hướng trục hệ tọa độ) và trong trường hợp này nghiệm (2.3) được viết dưới dạng tích phân:

$$v = \int_{p_0}^p \frac{dp}{a_{ep}} \quad (2.6)$$

Đối với trường hợp $x = 1 = \text{const}$, môi trường một pha khí hoàn hảo, hay $x = 0 = \text{const}$, môi trường một pha lỏng, vận tốc âm có dạng đơn giản: $a_0^2 = \gamma \frac{P}{\rho}$, trong đó γ là chỉ số đoạn nhiệt, hay $a_0 = \text{const}$ (phương trình trạng thái tuyến tính). Tương ứng với hai trường hợp đó (2.6) có thể viết được ở dưới dạng tường minh [5].

$$v = \frac{2}{\gamma - 1} \left(a_0 - \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\xi}{t} \right) \quad (2.7)$$

và:

$$v = \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\xi}{t} \ln \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2.8)$$

Đối với những hỗn hợp có thể bỏ qua phần khối lượng của pha khí so với phần khối lượng của pha lỏng và không có quá trình trao đổi chất giữa các pha ($x_1 = \text{const}$, $x_2 = \text{const} \ll 1$) vận tốc cân bằng của âm cũng có dạng khá đơn giản [6]

$$a_0^2 = \frac{P}{\alpha_2 \rho} [1 + o(x)] \approx \frac{P}{\alpha_1 \alpha_2 \rho_1^0} \quad (2.9)$$

và tích phân (2.6) có thể viết dưới dạng sau

$$v = \int_{\rho_0}^P \frac{d\rho}{a_0 \rho} \approx \int_{\rho_0}^P \sqrt{P/\alpha_2 \rho} \frac{d\rho}{\rho}; \quad \alpha_2 = \frac{x_1 \rho_2^0}{x_1 \rho_2^0 + x_2 \rho_1^0} \quad (2.10)$$

Trong nhiều trường hợp có thể bỏ qua độ nén trung bình của pha lỏng mang tải so với đại lượng tương ứng của pha khí ($\rho^0 = \text{const}$) khi $\alpha_2 \gg \alpha_1 = P/\rho_1^0 a_1^2$ trong đó a_1 là vận tốc sóng âm trong chất lỏng đồng tính một pha. Tuy vậy đối với những hỗn hợp này ngay cả trong một số trường hợp giới hạn, ví dụ như giả thiết chất khí thỏa mãn phương trình trạng thái của quá trình đoạn nhiệt $P = \text{const}(\rho_2^0)^\gamma$ hay đẳng nhiệt $p = \text{const} \rho_2^0$, profile vận tốc (2.10) cũng khó có thể viết dưới dạng tường minh biểu diễn qua các hàm số sơ cấp.

Ở gần điểm giới hạn, ví dụ đối với nước $P_{cr} \approx 221 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}$, $T_{cr} = 650^\circ K$, độ nén của pha lỏng trở nên không thể bỏ qua được và trong trường hợp chung vận tốc cân bằng của âm có dạng (2.4).

3. Hệ phương trình thủy động lực học (2.3), (2.4) được đóng kín bằng những phương trình trạng thái. Đối với nước (H_2O) phương trình trạng thái trên đường bão hòa pha nhận được bằng cách lấy xấp xỉ kết quả thực nghiệm [7] cho khoảng thay đổi áp suất $10^5 \div 10^7 \frac{N}{m^2}$ có dạng sau:

$$\begin{aligned} i_1^0(T_B) &= 4 \cdot 910^{-6} T_B^3 - 4 \cdot 66 \cdot 10^{-3} T_B^2 + 5 \cdot 66 T_B + 1299 \cdot 1; \\ i_2^0(P) &= i_1^0 + l(P); \\ l(P) &= 7.075 \cdot 10^{-4} P^2 - 0.152 P^2 - 17.06 P + 2199; \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$V_1(P) = 3.8888 \cdot 10^{-10} P^5 - 7.7632 \cdot 10^{-8} P^2 + 7.8930 \cdot 10^{-6} P + 1.0456 \cdot 10^{-3};$$

$$V_2(P) = V_1 + \frac{l}{T_B} \frac{dT_B}{dP}; \quad T_B = \frac{4642}{\ln p - 12.56};$$

$$[i] = \frac{KJ}{Kg}; [l] = \frac{KJ}{Kg}; [V] = \frac{m^3}{Kg}; [10^5 \cdot P] = \frac{N}{m^2}.$$

Trong đó biểu thức cuối cùng nhận được bằng cách giải gần đúng phương trình Klapeirôn - Klauđiux. Các phương trình (2.11) trong phần lớn khoảng thay đổi áp suất

xem xét xấp xỉ kết quả thực nghiệm với sai số tương đối không quá 1%. Sai số tương đối đạt kết quả cực đại ở lân cận vùng áp suất $P \sim 10^5 \frac{N}{m^2}$ bằng 3%.

4. Hỗn hợp tại thời điểm ban đầu nằm ở trạng thái cân bằng dưới áp suất và mật độ khối lượng cho trước:

$$t = 0; v(\xi, 0) = 0; P(\xi, 0) = P_0(\xi); \rho(\xi, 0) = \rho_0(\xi). \quad (2.12)$$

Trong trường hợp chung, điều kiện biên của bài toán có thể viết dưới dạng

$$\begin{aligned} \xi = 0 \quad P(0, t) &= g(t); \\ \xi = L \quad v(L, t) &= \varphi_L(t) \text{ hay } P(L, t) = g_L(t). \end{aligned} \quad (2.13)$$

Phương trình thứ ba của hệ phương trình (2.3) có thể viết lại:

$$dP = a_0^2 dp$$

Điều đó cho thấy chỉ có thể cho trước tùy ý mật độ khối lượng hỗn hợp tại một điểm áp suất cho trước và cùng với (2.3), (2.4), (2.11), (2.12) lập thành bài toán Cauchy trong miền xác định $\Omega = [0, +\infty] \times [0, L]$. Các điều kiện (2.12) và (2.13) cho phép mô hình hóa nhiều bài toán khác nhau thường gặp trong thực tế sản xuất công nghiệp và kỹ thuật như: dòng chảy dừng và không dừng của chất lỏng hay hỗn hợp cân bằng lỏng-hơi dưới áp suất cao từ bán ống hữu hạn, từ bán ống vô hạn, từ bán ống hữu hạn có nối với nguồn dự trữ và v.v...

§ 3. THUẬT TOÁN GIẢI VÀ MỘT VÀI KẾT QUẢ

1. Đối với quá trình giải bài toán Cauchy của hệ phương trình vi phân bằng phương pháp số, sự lựa chọn dạng viết các phương trình và các điều kiện khép kín đóng một vai trò quan trọng. Để giải hệ phương trình vi phân (2.3) với các điều kiện (2.4), (2.11), (2.13) sử dụng biến dạng lược đồ sai phân hữu hạn hai bước phương pháp Lax-Wendroff (L-W) [8]. Tính ưu việt của lược đồ sai phân hữu hạn hai bước L-W là ở chỗ ngoài những ưu điểm như đơn giản trong thực hiện và xấp xỉ phương trình vi phân cho trước với độ chính xác bậc 2, nó còn đảm bảo hoàn thành chính xác các định luật bảo toàn ở dạng sai phân (lược đồ sai phân hữu hạn hai bước L-W có tính chất bảo toàn)

Điều kiện cần ổn định hệ phương trình sai phân thu được là điều kiện cần ổn định của phương trình có dạng phương trình sóng, trong hệ tọa độ Lagrange nó có thể viết

$$\frac{\rho a_e}{\rho_0} \frac{\Delta t}{\Delta \xi} < 1 \quad (3.1)$$

(Điều kiện ổn định Kurant) trong đó Δt , $\Delta \xi$ là các bước chia lưới theo thời gian và tọa độ không gian.

Hai phương trình đầu và phương trình cuối cùng của (2.3) được sai phân hóa tương tự trong [8] dạng sai phân của phương trình thứ ba được viết như sau

Bước 1:

$$P_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (P_{j+1}^n + P_j^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta \xi} [(a_0^2 \rho^2)_{j+1}^n + (a_0^2 \rho^2)_j^n] (v_{j+1}^n - v_j^n) \quad (3.2)$$

Bước 2:

$$P_j^{n+1} = P_j^n - \frac{\Delta t}{2\Delta \xi} \begin{pmatrix} (a_0^2 \rho^2)_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} & (a_0^2 \rho^2)_{j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \\ j+\frac{1}{2} & j-\frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} & v_{j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \\ j+\frac{1}{2} & j-\frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

trong đó chỉ số trên dùng để chỉ số bước theo lưới thời gian, còn chỉ số dưới dùng để chỉ số bước theo lưới tọa độ không gian.

2. Để kiểm tra khả năng làm việc của hệ phương trình sai phân nhận được và chương trình, chương trình lập trên cơ sở hệ phương trình sai phân (3.2) được sử dụng để giải bài toán dòng chảy không dùng của chất khí hoàn hảo từ bán ống hữu hạn với các điều kiện (2.12), (2.13). Lời giải số nhận được trên máy tính khi sóng hạ áp chưa đạt tới đáy bán ống trùng với lời giải ôtomôdel (2.7). Do tác dụng của hiệu ứng « nhốt hệ » sóng hạ áp bị đàn trát trên 5 ÷ 7 mắt lưới tọa độ không gian.

Ngoài ra hệ phương trình sai phân (3.2) còn được sử dụng để giải bài toán sự phân rã mặt gián đoạn tùy ý của chất khí trên, trong đó có đưa vào « giả nhốt » phụ và thay cho áp suất p sử dụng

$$P = \tilde{P} + \delta a_{ep} \Delta v \quad (3.3)$$

ở đây $\delta > 0$ là hệ số điều khiển tác dụng của « giả nhốt », nó được chọn từ điều kiện làm sai lệch nghiệm thu được ít nhất đồng thời ức chế tốt nhất những dao động cao tần (kỳ sinh) xuất hiện khi giải hệ phương trình sai phân thay cho hệ phương trình vi phân ban đầu. Kết quả sử dụng (3.3) cho thấy tùy điều kiện bài toán « giả nhốt » phụ làm việc có hiệu quả với sự lựa chọn δ trong khoảng 0 ÷ 1. « Giả nhốt » phụ cũng như phương pháp làm tròn sử dụng ở điểm 3 dưới đây được giải thích như một cơ cấu chuyển động năng của những dao động cao tần sang dạng nội năng của môi trường. Dễ dàng nhận thấy (3.3) có tác dụng chủ yếu ở vùng lân cận sóng xung kích nơi gradient vận tốc lớn, còn tại

những miền $\Delta v \ll P/a_{ep}$ thì $P \approx \tilde{P}$. Với việc đưa vào « giả nhốt » phụ hệ phương trình sai phân (3.2) có thể sử dụng để tính xuyên qua cả những sóng xung kích có cường độ lớn $\Delta P = \frac{P - P_0}{P_0} \sim 10$; trong đó sóng xung kích đàn trát trên 4 ÷ 8 mắt lưới tọa độ không

gian. Ý tưởng sử dụng « giả nhốt » phụ để tính trong các hệ sai phân, nhất là tính xuyên qua sóng xung kích, làm giảm nhẹ sự phức tạp của chương trình, lần đầu tiên do phân Neuman và Richtmyer đưa ra năm 1949.

3. Để giải hệ phương trình vi phân (2.3) có tính đến quá trình trao đổi nhiệt-chất (2.4) với các điều kiện (2.11)–(2.13), kết quả nghiên cứu cho thấy có thể sử dụng biến dạng lược đồ sai phân hữu hạn hai bước L-W (3.2) trong đó cần thiết sử dụng phương pháp làm tròn [10], ví dụ 3 điểm

$$\tilde{\varphi}_i^n = C_{i-1}^n \varphi_{i-1}^n + C_i^n \varphi_i^n + C_{i+1}^n \varphi_{i+1}^n \quad (3.4)$$

ở đây φ là tham số cần phải làm tròn và các hệ số C chọn thỏa mãn các điều kiện sau

$$\begin{aligned} C_{i-1}^n &= C_{i+1}^n, \\ C_{i-1}^n + C_i^n + C_{i+1}^n &= 1 \end{aligned} \quad (3.5)$$

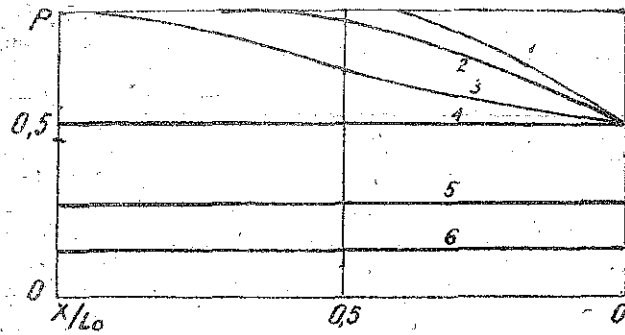
Thông thường $(C_{i-1}^n, C_i^n, C_{i+1}^n)$ được chọn là các hằng số, tuy vậy trong trường hợp chung chúng có thể là hàm số phụ thuộc vào các bước thời gian và tọa độ không gian. Việc sử dụng một cách thô thiển phương pháp làm tròn (3.4), (3.5) có thể dẫn đến làm sai lệch đáng kể lời giải thu được, để chính xác hóa lời giải sử dụng điều kiện phân tích vi phân [9]

$$\left| \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} \right| \Delta \xi - \beta \left| \frac{\partial U}{\partial \xi} \right| \leq 0; \quad \frac{\partial U}{\partial \xi} \leq 0. \quad (3.6)$$

Thủ tục làm tròn cần được thực hiện khi không hoàn thành một trong các điều kiện (3.6), trong trường hợp ngược lại không cần phải làm tròn. Trong điều kiện (3.6) β được chọn trong khoảng [1; 5] từ điều kiện làm tròn tốt nhất và ít làm sai lệch nghiệm thu được nhất.

Trên hình 1 trong hệ tọa độ Euler thể hiện profin áp suất của hỗn hợp nước - hơi nước tại các thời điểm khác nhau trong trường hợp bán ống hữu hạn $L_0 = 20$ m

$$P_0 = 70.10^5 \frac{N}{m^2}; x_{20} = 0 \text{ và } \xi = 0, P = \frac{p}{P_0} = \frac{1}{70}$$

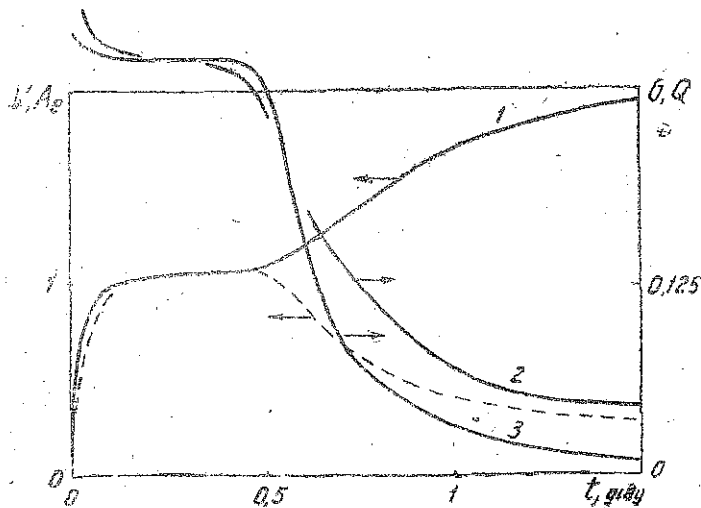


Hình 1

Các đường cong 1 - 6 phù hợp với các thời điểm $t = 0.12; 0.20; 0.34; 0.56; 0.90; \text{ và } 1.66$ giây.

Dễ nhận thấy bức tranh vật lý thu được có tính chất sóng. Với sự hạ áp bất ngờ ở miệng ống $X = 0$, xuất hiện sóng hạ áp - sóng sôi lan truyền dọc theo bán ống vào trong với vận tốc cân bằng của âm hỗn hợp a_0 . So với vận tốc sóng âm đẳng entropy trong chất khí nở bé hơn rất nhiều: a_0 có giá trị thay đổi bậc vài chục m/giây và cùng với sự tăng phần khối lượng của pha hơi nó tăng lên. Dòng chảy thu được có thể chia làm hai giai đoạn: Giai đoạn dòng chảy tới hạn khi $t < t_* \sim \frac{L_0}{a_0}$ (Trong trường hợp biểu

diễn trên hình 1,2 $t_* \sim 0.5$ giây) và giai đoạn dòng chảy tựa dừng khi $t > t_*$. Trong giai đoạn dòng chảy tới hạn tại điểm miệng ống $X = 0$ vận tốc dòng chảy bằng vận tốc cân bằng của âm tại điểm đó, các tham số dòng chảy cố định giá trị $p = p_*$, $v = v_*$. Dòng chảy bị « khóa chặt » tại điểm miệng ống. Phần lớn khối lượng hỗn hợp thoát ra khỏi ống trong giai đoạn này. Kết quả tính toán trong hệ tọa độ Lagrange cho thấy trong thời gian này vùng bị ảnh hưởng của dòng chảy đạt giá trị $4 - 8 L_0$. Vì vậy khoảng thời gian t_* có thể coi là thời gian đặc trưng của hiện tượng, nó bao hàm thời gian phát triển dòng chảy đạt tới dòng chảy tới hạn và thời gian dòng chảy tới hạn. Trong giai



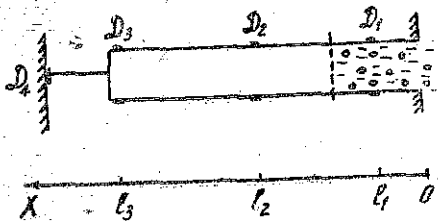
hình 2.

đoạn hai, vận tốc dòng chảy trong ống $L_0 \gg X \gg 0$ tại mỗi điểm nhỏ hơn vận tốc cân bằng của âm tại điểm đó, trong toàn ống áp suất hỗn hợp hầu như bằng nhau, dòng chảy có cấu trúc tựa dừng.

Trên hình 2 biểu diễn sự biến thiên theo thời gian vận tốc cân bằng của âm $A_0 = a_0/a_*$ (đường cong 1), mật độ khối lượng $G = \rho/\rho_0$ (đường cong 2) và cường độ lưu lượng hỗn hợp $Q = q/Q_0 = \rho v/\rho_0 a_*$ (đường cong 3) thoát ra tại điểm miệng ống $X = 0$. Đường cong gián đoạn biểu diễn sự biến thiên vận tốc $V = v/a_*$, $a_*^2 = P_0/\rho_0$ tương ứng tại điểm đó. Đối với dòng chảy của chất khí hoàn hảo

$$P_* = \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} P(0, t) \text{ và } t_* = L_0 / \frac{2}{\gamma + 1} a_* \sim L_0 / a_0.$$

Thí nghiệm về dòng chảy không dừng của chất lỏng ở nhiệt độ gần nhiệt độ sôi được tiến hành trên một bán ống hữu hạn nằm ngang đường kính 73 mm trong đó để đo các tham số của dòng chảy sử dụng các cảm biến D_1, D_2, D_3 , đặt cách miệng ống khoảng cách tương ứng là $l_{1,2,3} = 0.326; 2.627$ và 4.017 m và cảm biến D_4 dùng để đo hiệu ứng khuếch đại trực (hình 3).



Hình 3

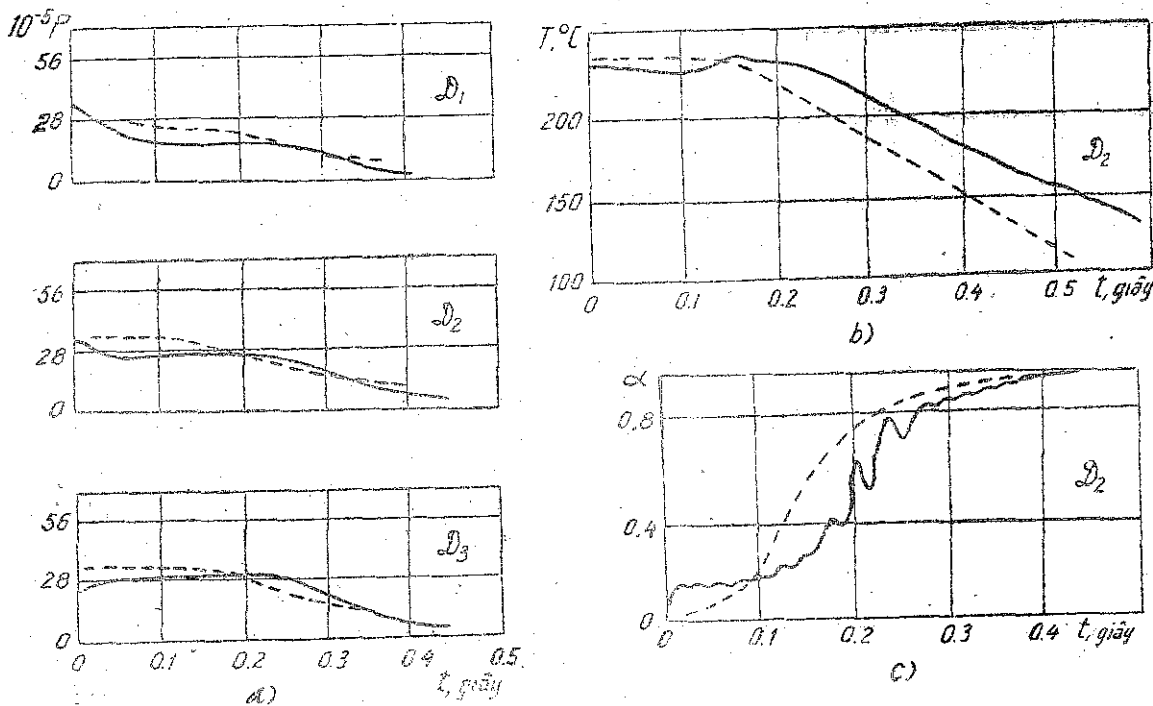
Tiến hành tính toán dòng chảy không dừng của nước cho hai trường hợp thí nghiệm với các điều kiện ban đầu [1]:

$$t = 0, P_0 = 105 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}, T_0 = 557^\circ K$$

$$\left(P_{B0} = 67.5 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} \right); x_{20} = 0. \quad (3.6)$$

và

$$t = 0, P_0 = 69 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}; T_0 = 515^\circ K$$



Hình 4

$$\left(P_{B0} = 33 \cdot 510^5 \frac{N}{m^2} \right); x_{20} = 0. \quad (3.7)$$

Áp suất miệng ống đột ngột hạ xuống áp suất khí quyển nhờ một cơ cấu phá hủy bằng điện, trong chất lỏng xuất hiện sóng hạ áp lan truyền với vận tốc $\sim 10^3$ m/giây. Sóng với thời gian đặc trưng t_* , sóng hạ áp này lan truyền hầu như tức thời đưa áp suất trong ống xuống áp suất bão hòa P_{B0} tương ứng với nhiệt độ ban đầu của chất lỏng và đồng thời đưa chất lỏng chuyển sang trạng thái chuyển động với vận tốc v_0 :

$$v_0 \sim \frac{P_0 - P_{B0}}{\rho l_0 a_0}$$

Tiếp sau sóng này là sóng hạ áp - chuyển pha lan truyền với vận tốc cân bằng của âm từ phía môi trường hai pha $a_0 \sim 50 - 200$ m/giây. Sự tính toán có tính đến ảnh hưởng của $v_0 \neq 0$ cho thấy ảnh hưởng này là không đáng kể trong các trường hợp khi $v_0/a_0 \ll 1$, sự có mặt của nó làm tăng nhanh quá trình hạ áp trong lòng chất lỏng do chuyển động quán tính của chất lỏng gây nên khi điều kiện biên hạn chế $v(L, t) = 0$.

Trên hình 4a biểu diễn kết quả so sánh sự biến thiên áp suất hỗn hợp đo được theo thời gian (các đường cong liên tục) và kết quả tính được trên cơ sở mô hình (2.3) (2.4), (2.11) - (2.13) (các đường cong gián đoạn) tại các điểm $l_{1,2,3}$ cho trường hợp (3.7). Còn trên hình 4b, c) biểu diễn so sánh sự biến thiên nhiệt độ môi trường và phần thể tích của pha hơi tính toán được với các kết quả thực nghiệm đo được nhờ cảm biến D_2 tại điểm l_2 . Ký hiệu các đường cong tương tự như trên hình 4a. Trong trường hợp này $v_0 = 2.4$ m/giây. Kết quả biểu diễn trên hình 4 cho thấy mô hình cân bằng chuyển động hỗn hợp chất lỏng-hơi miêu tả khá chính xác quá trình biến thiên các tham số của dòng chảy theo thời gian không chỉ về mặt chất lượng mà cả về mặt số trị. Các đường cong trên hình 4a, b cho thấy cần phải tính đến ảnh hưởng « sôi trễ! » của chất lỏng so với sóng hạ áp tương ứng, do sự lệch pha này trong thực tế chất lỏng luôn luôn sôi ở trạng thái nóng quá mức. Các đường cong trên hình 4c và kết quả tính toán cho thấy trong thí nghiệm (3.6), (3.7) thời gian chậm pha $\Delta t_c \sim 0,04$ giây và so với thời gian đặc trưng của quá trình t_* : $\Delta t_c/t_* \sim 10^{-1}$.

§ 4. KẾT LUẬN

Do sự thay đổi liên tục trạng thái hợp thể của môi trường, bài toán dòng chảy không dừng của chất lỏng ở nhiệt độ sôi có tính đến quá trình chuyển pha là một bài toán nhiều tham số rất phức tạp, trong đó xấp xỉ cân bằng trình bày trong các phần trên là bước đầu tiên trong quá trình nghiên cứu bức tranh đặc trưng của hiện tượng được xem xét. Đúng về khía cạnh vật lý của hiện tượng mô hình đã bỏ qua nhiều ảnh hưởng tinh tế như: ảnh hưởng của hiện tượng trượt giữa các pha, động học chuyển pha, đặc thù trạng thái hợp thể của môi trường v.v... và nhất là ảnh hưởng của sự lệch pha giữa sóng sôi với sóng hạ áp (sự không cân bằng nhiệt động học). Tuy vậy mô hình đơn giản này đã cho phép nghiên cứu những nét cơ bản của bức tranh vật lý về mặt chất lượng cũng như số lượng, trong đó dòng chảy không dừng của chất lỏng ở nhiệt độ sôi từ một bán ống hữu hạn có thể tách ra thành giai đoạn dòng chảy tới hạn và giai đoạn dòng chảy tựa dừng. Thời gian đặc trưng của hiện tượng được đánh giá theo độ dài của ống và vận tốc cân bằng của âm a_0 . Với việc sử dụng « giả nhất » phụ hay thủ tục làm trơn theo sự lựa chọn của điều kiện phân tích vi phân, biến dạng lược đồ sai phân hữu hạn hai bước L-W có khả năng sử dụng một cách hữu hiệu để nghiên cứu những lớp bài toán sóng khác nhau.

Mô hình (2.3), (2.4), (2.11) - (2.13) có thể mở rộng xem xét cho lớp bài toán thường gặp khác trong thực tế khi tính đến khả năng trao đổi nhiệt của môi trường làm việc qua thành ống dẫn với nguồn sưởi hay nguồn thu nhiệt bên ngoài.

Địa chỉ:

Nhận ngày 2/11/1983

Viện Cơ học-Viện KHVN

- EDWARDS A. R., O'BRIEN T. P. Studies of phenomena connected with depressurization of water reactors. J. British Nuclear Ener. Soc., T. IX, N°2, England, 1970.
- КУТАТЕЛАДЗЕ С. С., СТЫРИКОВИЧ М. А. Гидродинамика газожидкостных систем. Энергия, Москва, 1976.
- ГУБАЙДУЛЛИН А. А., ИВАНДАЕВ А. И., НИГМАТУЛИН Р. И., ХАБЕЕВ Н. С. Газовая динамика многофазных сред. Волны в жидкостях с пузырьками. В сб. Механика жидкости и газа, Т. 19, Итоги науки и техн. СЕРИИ ФИЗИКА АН СССР, Москва, 1982.
1. НАКОРЯКОВ В. Е. Гидродинамика двухфазных потоков. В сб.: Гидродинамика и теплообмен в двухфазных средах. ИТФ СО АН СССР, Новосибирск, 1981.
5. ЛАНДАУ Л. Д., ЛИФШИЦ Е. М. Механика сплошных сред. Гостехиздат Москва, 1950.
6. НИГМАТУЛИН Р. И. Основы механики гетерогенных сред. Наука, Москва, 1978.
7. ВАРГАФТИК Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Наука, Москва, 1972.
8. РИХТМАЙЕР Р., МОРТОН К. Разностные методы решения краевых задач. «Мир»; Москва, 1972.
9. ИВАНДАЕВ А. И. Об одном способе введения «псевдовязкости» и его применения к уточнению равновесных решений уравнений гидродинамики. Журн. ВМ и МФ, Т. XV, N°2, Москва, 1975.
10. РОСЛЯКОВ Г. С., ЧУДОВ Л. А. Численные методы в механике сплошных сред. Вып. I, II, III, Изд. МГУ, Москва, 1969 – 1970.

SUMMARY

NONSTATIONARY FLOW OF BOILING LIQUID

Steady one-dimensional nonstationary flow of boiling liquid from finite or infinite pipe in a consideration of the effect of the phase-boundary heat and mass transfer. The received system of quasi-linear differential equations has been decided by the modification of Lax - Wendroff method in IBM. Numerical results are compared as experimental data.