

XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN HỌC NGHIÊN CỨU QUÁ TRÌNH TỎA NHIỆT KHI CHẤT LỎNG SÔI TRÊN MÀNG MỎNG

TO DEVELOP A MATHEMATICAL MODEL WHICH ILLUSTRATES THE HEAT TRANSFER PROCESS OF THE LIQUID AS IT BOILS ON A VERTICAL THIN FILM

Đặng Quốc Phú, Trần Thị Thu Hằng

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Nguyễn Thành Văn

Trường Đại học Bách Khoa, ĐH Đà Nẵng

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một số kết quả nghiên cứu về việc xây dựng thí nghiệm và đánh giá một mô hình toán học mô tả quá trình tỏa nhiệt khi sôi trên màng mỏng đặt đứng và ứng dụng để nghiên cứu một số yếu tố ảnh hưởng tới hiệu quả tỏa nhiệt của cơ chế sôi trên màng mỏng cho thấy: hệ số tỏa nhiệt ở cơ chế sôi này lớn hơn nhiều so với cơ chế sôi trong thể tích lớn ở cùng độ quá nhiệt (phạm vi độ quá nhiệt nhỏ), cường độ tỏa nhiệt khi sôi trên màng mỏng tăng theo chiều dày màng ban đầu và áp suất bão hòa, giảm khi tăng chiều cao vách và trong giới hạn làm việc của thiết bị ($3 \div 10K$) không phụ thuộc vào độ quá nhiệt. Kết quả tính toán có độ tin cậy đáp ứng được yêu cầu kỹ thuật và có thể làm cơ sở cho việc thiết kế, chế tạo và điều khiển vận hành các thiết bị công nghệ hoạt động theo cơ chế sôi trên màng mỏng.

ABSTRACT

This article presents the research results by setting up experiment procedures and evaluating the mathematical model which describes heat transfer process of the liquid as it boils on a vertical thin film and based on those results, research into some factors influencing heat transfer efficiency of this boiling mechanism has shown that: heat transfer coefficient of this boiling mechanism is much greater in the liquid of higher volume at the same overheat degree (with small range of overheat degree); heat transfer coefficient when the liquid boils on a thin film increases as the original thickness of the film and saturation pressure increase; it decreases as the height of the film increases, though within the supporting range of the equipment ($3 - 10K$) independent of the overheat degree. The calculated results own the reliability which responds to engineering requirements and can serve as the basis for designing, producing and controlling the operation of technological equipments which work accordingly with boiling mechanism on a thin film.

GIẢI THÍCH CÁC KÍ HIỆU

t_w, t_s [°C]: Nhiệt độ vách và nhiệt độ bão hòa

q [W/m²K]: Mật độ dòng nhiệt

λ_l, λ_r [W/mK]: Hệ số dẫn nhiệt tăng và rồi

Δt [K]: Độ quá nhiệt, $\Delta t = t_w - t_s$

τ [N/m²]: Ứng suất trượt

ρ [kg/m³]: Khối lượng riêng

ν, ε [m²/s]: Độ nhớt động học tăng và rồi

μ [N/m.s]: Độ nhớt động lực

δ [m]: Chiều dày màng lỏng

α [W/m²K]: Hệ số tỏa nhiệt

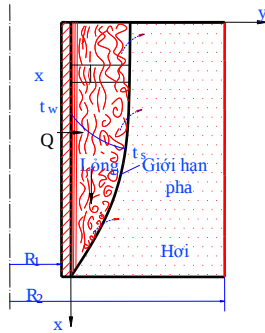
I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đối với quá trình sôi ngập - quá trình sôi phổ biến trong công nghệ và dân dụng thì yếu tố chính làm tăng cường quá trình tỏa nhiệt khi sôi là sự hình thành và tách li các bọt hơi làm xáo trộn mạnh khối chất lỏng trên bề mặt đốt nóng. Cơ chế đã được nghiên cứu rất kỹ lưỡng cả về lý thuyết và thực nghiệm. Tuy nhiên để tạo ra cơ chế sôi ngập cần nguồn nhiệt nhiệt độ cao và độ quá nhiệt đủ lớn. Trong thực tế có nhiều trường hợp hoặc không có khả năng tạo được độ quá nhiệt cao (do nguồn nóng có nhiệt độ thấp, thí dụ khi sử dụng năng lượng mặt trời để hoá hơi) hoặc không được phép tạo độ chênh nhiệt độ lớn để bảo đảm yêu cầu công nghệ (chống cháy, khô... như trong các thiết bị cô đặc nước hoa quả). Sôi trên màng mỏng là một giải pháp để cường hóa quá trình hoá hơi khi độ quá

hiệt bé. Thiết bị sôi trên màng mỏng có nhiều ưu điểm: nhiệt độ trung bình trong thiết bị ít thay đổi; thời gian lưu lại của môi chất nhỏ, độ trễ nhiệt nhỏ; hệ số tỏa nhiệt lớn. Mặc dù đã có một số công trình nghiên cứu cả về lý thuyết [1,2] lẫn thí nghiệm [3,4,5,6]... đã được công bố nhưng cho tới nay vẫn chưa đưa ra được phương pháp lý thuyết hay phương trình tiêu chuẩn tổng quát nào để xác định được hệ số tỏa nhiệt khi sôi trên màng mỏng. Trong một công trình công bố trước đây [7] chúng tôi đã trình bày một phương pháp tính toán lý thuyết quá trình truyền nhiệt cho cơ chế sôi này nhưng do hạn chế về các giả thiết phải chấp nhận nên độ tin cậy của kết quả tính toán chưa cao.

Xây dựng một mô hình toán học để nghiên cứu quá trình sôi trên màng mỏng, kiểm tra độ tin cậy của kết quả thu được để từ đó đánh giá hiệu quả tỏa nhiệt khi sôi trên màng mỏng cũng như các yếu tố ảnh hưởng chính là nội dung mà bài báo sẽ đề cập.

II. MÔ HÌNH TOÁN HỌC



Hình 1. Mô hình sôi trên màng mỏng tạo thành ngoài bề mặt ống đặt đứng

Xét một bề mặt hình trụ thẳng đứng, có bán kính ngoài R_1 , chiều cao h được đốt nóng bên trong, trên bề mặt có một dòng chất lỏng ở trạng thái bão hòa chảy bao liên tục từ trên xuống. Bề mặt đốt nóng có nhiệt độ $t_w > t_s$ truyền nhiệt cho nước. Do nước bay hơi nên chiều dày màng bao nhỏ dần theo chiều chuyển động. Vỏ bao bên ngoài của không gian bay hơi có bán kính R_2 , chiều cao h , có tác dụng chắn hơi và cách nhiệt (xem hình 1).

Với quá trình tỏa nhiệt đối lưu nói chung, phương pháp lý thuyết để xác định hệ số tỏa nhiệt là thiết lập và giải hệ phương trình vi phân gồm: phương trình tỏa nhiệt đối lưu, phương trình chuyển động, phương trình năng lượng,

phương trình liên tục. Nusselt, năm 1916, với một loạt giả thiết đơn giản hóa đã thiết lập được phương trình tính hệ số tỏa nhiệt khi ngưng màng chảy tầng. Tuy nhiên, khi màng chảy rối thì quá trình còn xảy ra phức tạp hơn rất nhiều và phương trình của Nusselt sẽ không sử dụng được.

Để xây dựng mô hình toán học, dưới đây sẽ chấp nhận các giả thiết sau: Quá trình ổn định và ảnh hưởng lực quán tính của màng nước, tác động của sức căng bề mặt, ma sát giữa pha hơi và bề mặt ngoài R_2 được xem là nhỏ đến mức có thể bỏ qua. Trên cơ sở các giả thiết này sẽ tiến hành thiết lập các phương trình vi phân cho màng chất lỏng chảy rối trên bề mặt màng đặt đứng.

2.1 Phương trình cân bằng lực

Phương trình cân bằng lực cho khối lỏng – hơi có tiết diện hình vành khăn, chiều cao Δx , bán kính trong $R_1 + y$, bán kính ngoài R_2 ở tọa độ x :

$$2\pi(R_1 + y)\Delta x \tau + (p + \Delta x \cdot dp/dx)\pi[R_2^2 - (R_1 + y)^2] = \pi[R_2^2 - (R_1 + y)^2]p + g\rho_G V_G + g\rho_L V_L \quad (1)$$

$$\text{Trong đó: } V_G = \pi[R_2^2 - (R_1 + \delta)^2]\Delta x$$

$$V_L = \pi[R_2^2 - (R_1 + y)^2]\Delta x - V_G$$

$\tau =$

$$\frac{[R_2^2 - (R_1 + y)^2]\left[g\rho_L - \frac{dp}{dx}\right] + [R_2^2 - (R_1 + \delta)^2]g(\rho_G - \rho_L)}{2(R_1 + y)} \quad (2)$$

Trong dòng chảy rối do hậu quả của các chuyển động dao động rối nên xuất hiện thêm ứng suất trượt rối [8], ứng suất tổng gồm 2 thành phần là ứng suất trượt tầng và ứng suất trượt rối. $\tau = \rho(\nu + \varepsilon)\partial\omega_x/\partial y$ (3)

Trong đó, ω_x là tốc độ trung bình (theo thời gian) tại x .

Từ (2) & (3) suy ra phương trình profil tốc độ:

$$\omega_x = \int_0^y \frac{1}{\varepsilon} \left[\tau_w/\rho_L v_1 - g/v_1 (1 - \rho_G/\rho_L)y \right] dy \quad (4)$$

và lưu lượng khối lượng ứng với 1m chu vi:

$$M = \int_0^{\delta} \rho_l \int_0^y \frac{1}{\varepsilon^+} \left[\frac{\tau_w}{\rho_l \nu_l} - \frac{g}{\nu_l} \left(1 - \frac{\rho_G}{\rho_l} \right) y \right] dy dy \quad (5)$$

Trong đó: $\varepsilon^+ = 1 + \varepsilon/\nu$ là hệ số trao đổi rối.

Ở các trường hợp giới hạn, hệ số này có giá trị: - Chảy tầng hoàn toàn: $\varepsilon^+ = 1$

- Chảy rối hoàn toàn: $\varepsilon/\nu \gg 1 \Rightarrow \varepsilon^+ = \varepsilon/\nu$

2.2 Phương trình cân bằng năng lượng

Do theo phương y tỏa nhiệt bằng đối lưu trong màng mỏng so với dẫn nhiệt là không đáng kể nên mật độ dòng nhiệt truyền từ bề mặt vách đến bề mặt chất lỏng tiếp xúc với pha hơi được xác định theo:

$$q = -(\lambda + \lambda_r) dt/dy \quad (6)$$

Sử dụng các khái niệm: “hệ số dẫn nhiệt độ rối” $\varepsilon_q = \lambda_r/\rho c_p$ và “tiêu chuẩn Prandtl rối” $Pr_r = \varepsilon/\varepsilon_q$ và hệ số tỏa nhiệt quy dẫn $\alpha = q/(t_w - t_s)$ kết hợp với (6) ta có công thức tính hệ số tỏa nhiệt khi chất lỏng sôi trên màng mỏng:

$$\alpha = \lambda / \int_0^{\delta} (1 + Pr(\varepsilon^+ - 1)/Pr_r) dy \quad (7)$$

2.3 Hệ số trao đổi rối

Để xác định hệ số tỏa nhiệt theo (7) cần biết hệ số trao đổi rối ε^+ và tiêu chuẩn Prandtl rối của màng chất lỏng.

Tương tự như đối với dòng chảy rối trong ống, màng lỏng rối trên vách đứng cũng được xem như gồm 3 vùng: vùng đệm tầng sát vách, vùng chuyển tiếp và vùng rối hoàn toàn ở ngoài cùng. Mỗi vùng có các đặc tính [8]:

- Vùng đệm tầng sát bề mặt $0 \leq y^+ \leq 5$:

$\varepsilon^+ = 1$ [8] (trong đó y^+ là khoảng cách không thứ nguyên: $y^+ = \omega_\tau/\nu_l = \sqrt{\tau_w/\rho_l} \cdot (y/\nu_l)$). Vùng này có nhiệt độ thay đổi từ t_w đến t_1 và hệ số tỏa nhiệt trung bình α_1 theo (7)

$$\alpha_1 = \lambda / \int_0^{5/C} dy = c\lambda_l/5 \quad (8)$$

- Vùng chuyển tiếp: $5 \leq y^+ \leq 30$, theo Prandtl: $\omega^+ = 3,05 + 5 \ln y^+$ [8], (trong đó ω^+ tốc độ không thứ nguyên: $\omega^+ = \omega_x/\omega_\tau$). Kết hợp với phương trình (4) ta rút ra: $\varepsilon^+ = y^+/5 = cy/5$. Vùng này có nhiệt độ thay đổi từ t_1 đến t_2 và hệ số tỏa nhiệt α_2 , theo (7):

$$\alpha_2 = \lambda_l \left(\int_{5/c}^{30/c} \left(1 + Pr \left(\frac{cy}{5} - 1 \right) \right)^{-1} dy \right)^{-1} \quad (9)$$

- Vùng rối hoàn toàn: $30 \leq y^+ \leq \delta^+$:

$$\tau_r = \rho_l x_l^2 y^2 (d\omega_x/dy)^2 [9].$$

Kết hợp với (3) và (4) ta tính được ε^+ và hệ số tỏa nhiệt α_3 cho vùng chảy rối ngoài cùng có nhiệt độ thay đổi từ t_2 đến t_s :

$$\alpha_3 = \frac{\lambda}{\int_{30/C}^{\delta} \frac{dy}{1 - Pr + Pr \frac{\left(1 - \frac{g}{\omega_\tau^2} y \right) (2 \rho x_l^2 y^2)}{-\mu + \sqrt{\mu^2 + 4g\rho_l x_l^2 y^2} (\delta - y)}}} \quad (10)$$

Khi thành lập các công thức (8), (9), (10) tính chất vật lý của màng lỏng được xem như là không đổi và Pr_r được giả thiết bằng 1. Giả thiết này cũng đã được nhiều tác giả chấp nhận khi nghiên cứu màng ngưng [1]. Viết phương trình cân bằng nhiệt cho cả 3 vùng ta thu được công thức tính hệ số tỏa nhiệt của màng lỏng:

$$\alpha = q/(t_w - t_s) = (\alpha_1^{-1} + \alpha_2^{-1} + \alpha_3^{-1})^{-1} \quad (11)$$

III. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN VÀ ĐÁNH GIÁ

Các phương trình tích phân khá phức tạp và do chưa biết chiều dày màng cụ thể ở các vị trí khác nhau của vách nên chỉ có thể giải chúng theo phương pháp số. Quá trình giải tiến hành từ trên xuống. Ứng với chiều dày màng ban đầu ta xác định được hệ số tỏa nhiệt α_0 . Chia chiều cao vách thành các khoảng nhỏ, mỗi khoảng có chiều cao Δx đủ nhỏ để có thể xem là có các thông số vật lý đồng nhất và có hệ số tỏa nhiệt

α_i và chiều dày màng δ_i không đổi. Khi ra khỏi phân tố thứ i và đi vào phân tố $i + 1$, chiều dày màng bằng δ_{i+1} được xác định từ phương trình cân bằng chất của phân tố i :

$$M_{i+1} = M_i - \alpha_i \Delta x \Delta t / r \quad (12)$$

Tại mỗi phần tử, chiều dày màng lỏng được chia thành 3 vùng (như hình 1) để tính tích phân theo công thức tương ứng.

Hệ số tỏa nhiệt trung bình trên toàn bộ chiều cao vách gồm n phần tử được xác định từ

$$\text{hệ số tỏa nhiệt của từng phần tử: } \alpha = 1/n \sum_{i=1}^n \alpha_i.$$

Để tiện so sánh, đánh giá chúng tôi cũng đồng thời tiến hành tính toán dựa trên các quan điểm khác nhau về màng rôi, cụ thể:

* Theo Levich [8]: khi nghiên cứu màng ngưng chảy rôi, tác giả đã nhận thấy: dòng hơi gây ra một ứng suất trượt trên bề mặt màng làm tăng hóa bề mặt và đề xuất công thức tính toán hệ số trao đổi rôi:

$$\varepsilon^+ - 1 = 6,62 \cdot 10^{-3} \text{Re}^{1,678} \cdot g \rho_l (\delta - y)^2 / \sigma \quad (13)$$

$$\delta = \left(\nu_l^2 / g \right)^{1/3} \cdot 0,169 \cdot \text{Re}^{2/3}$$

* Theo mô hình 2 vùng [10]: theo quan điểm này màng được chia thành 2 vùng riêng biệt.

+ Vùng chảy tầng ở sát bề mặt:

$$0 \leq y^+ \leq 11,6 : \varepsilon^+ = 1 \quad (14)$$

+ Vùng chảy rôi:

$$y^+ > 11,6 : \varepsilon^+ + 1 = 0,16 \rho_l y^2 d\omega/dy \quad (15)$$

* Theo mô hình màng chảy tầng và có sóng trên bề mặt [2]: với đặc tính màng dạng này hệ số tỏa nhiệt có thể xác định theo:

$$\alpha = 1 / \left(\frac{y}{\lambda_l} + \left(c \left(\frac{1}{2\pi R T_s} \right)^{1/2} \rho_l r^2 \right)^{-1} \right) \quad (16)$$

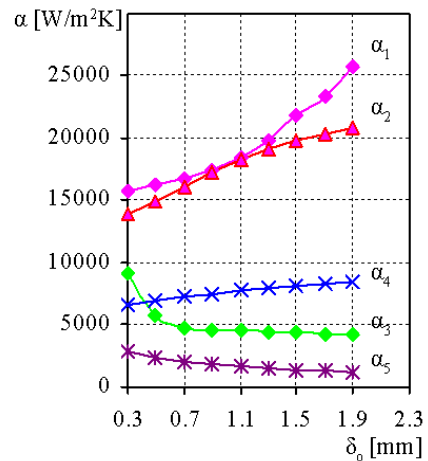
- **Đánh giá độ tin cậy của kết quả tính toán:**

Để đánh giá độ tin cậy của mô hình toán học, sau đây sẽ lần lượt so sánh kết quả tính toán theo mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm ở cùng điều kiện. Đồng thời cũng tiến

hành so sánh kết quả tính toán của cùng mô hình nhưng với các quan điểm khác về màng chảy rôi. Do chỉ có kết quả thực nghiệm đối với nước [6] nên mô hình toán học cũng sẽ được ứng dụng để tính cho môi chất này.

Thuật toán trình bày trên đây được lập trình thành chương trình tính toán sử dụng ngôn ngữ Matlab. Kết quả tính thử với nhiều độ lớn phân tố khác nhau ($\Delta x = 0,1; 1; 10 \text{ mm}$) sai khác nhau không đáng kể nên để giảm nhẹ số bước tính toán đã chọn $\Delta x = 10 \text{ mm}$ cho tất cả các chế độ tính toán.

Chiều cao và đường kính vách ($h = 2,05 \text{ m}$; $d = 32 \text{ mm}$) chính bằng chiều cao và đường kính vách trên đó Slearenko [6] đã làm nghiên cứu thực nghiệm.



Hình 2. Hệ số tỏa nhiệt khi nước sôi trên bề mặt màng mỏng ($t_s = 80^\circ\text{C}$, $\Delta t = 3\text{K}$)

α_1 : Mô hình lý thuyết;

α_2 : Kết quả thực nghiệm;

α_3 : Quan điểm của Levich;

α_4 : Mô hình màng 2 vùng;

α_5 : Màng chảy tầng & có sóng bề mặt

Kết quả tính toán theo các quan điểm và đặc tính màng khác nhau cho thấy sai khác nhau khá lớn (xem hình 2) (lớn nhất lên tới 20 lần). Kết quả tính toán theo mô hình lý thuyết sai lệch so với kết quả thực nghiệm là bé nhất, đặc biệt khi chiều dày màng ban đầu trong khoảng $0,8 \div 1,2 \text{ mm}$, sai khác lớn nhất cũng chỉ tới 20% (khi $\delta_0 = 1,9 \text{ mm}$). Đối với đối

tượng phức tạp thì sai lệch này là hoàn toàn có thể chấp nhận được.

Như vậy, mô hình toán học cho kết quả tin cậy được và có thể sử dụng để nghiên cứu, tính toán quá trình sôi trên màng mỏng.

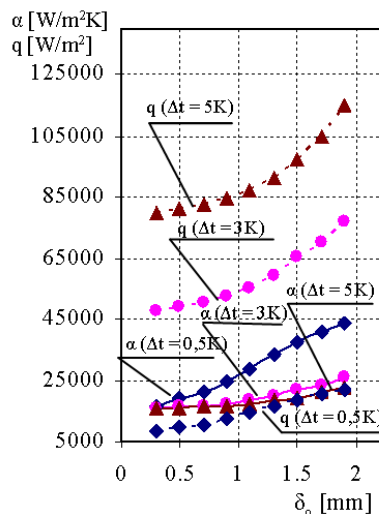
Mặt khác, với độ quá nhiệt $3K$, ở cơ chế sôi ngập chưa thể xảy ra chế độ sôi bọt do đó có thể thấy rằng hệ số tỏa nhiệt khi sôi trên màng mỏng lớn hơn rất nhiều khi sôi ngập ở cùng điều kiện Δt (xét khi Δt nhỏ).

- Ảnh hưởng của một số yếu tố đến quá trình sôi trên màng mỏng:

Sau đây sẽ ứng dụng mô hình toán học đã được kiểm chứng để nghiên cứu một số yếu tố ảnh hưởng tới quá trình nước sôi trên màng mỏng.

+ Ảnh hưởng của chiều dày màng ban đầu δ_0 và độ quá nhiệt Δt : Kết quả tính toán đối với: $h = 2,05 \text{ m}$, $t_s = 80^\circ\text{C}$ ở các độ quá nhiệt và chiều dày màng ban đầu khác nhau được trình bày trên hình 3.

Từ hình 3 thấy rằng: Khi các điều kiện khác không đổi, α tăng khi δ_0 tăng và Δt giảm. Khi δ tăng, τ_w tăng, ω_r tăng dẫn đến chiều dày vùng chảy rối tăng, chiều dày 2 vùng còn lại giảm, mà nhiệt trở vùng chảy rối không đáng kể so với vùng chảy tầng và vùng chuyển tiếp nên dẫn đến việc cường hóa quá trình tỏa nhiệt của màng.



Hình 3. Ảnh hưởng của δ_0 và Δt

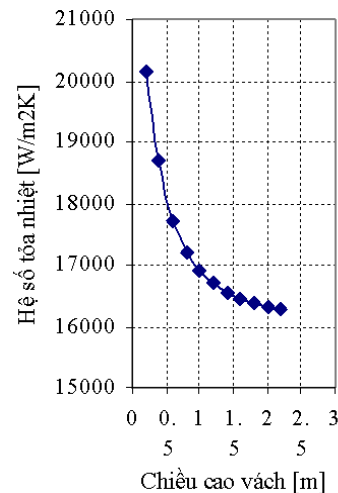
Ngược lại, khi Δt tăng, mật độ dòng nhiệt tăng làm chiều dày trung bình giảm và qua đó làm giảm α . Tuy nhiên, khi $\Delta t > 3K$ thì độ quá nhiệt gần như không ảnh hưởng tới hiệu quả tỏa nhiệt (xem hình 5). Trong thực tế tùy thuộc vào loại môi chất người ta chỉ sử dụng $\Delta t = 3 \div 10K$ [8] để có độ quá nhiệt đủ lớn và tránh việc tạo bọt ở trên bề mặt vách sẽ làm giảm hiệu quả tỏa nhiệt nên có thể thấy Δt không ảnh hưởng tới hiệu quả tỏa nhiệt của cơ chế sôi trên màng mỏng.

+ Ảnh hưởng của chiều cao vách (hình 4): Khi h tăng sẽ làm hiệu quả tỏa nhiệt giảm, tuy nhiên khi h nhỏ, tốc độ giảm lớn hơn và đến một độ cao nào nhất định thì h hầu như không còn ảnh hưởng tới cường độ tỏa nhiệt nữa. Điều này phù hợp với kết quả nghiên cứu tỏa nhiệt đối lưu tự nhiên trên vách ống.

+ Ảnh hưởng của nhiệt độ sôi t_s : Kết quả tính toán ảnh hưởng của t_s ở $\delta_0 = 0,5 \text{ mm}$ trình bày trên hình 5 cho thấy do sự thay đổi tính chất nhiệt vật lý nên khi t_s tăng thì α tăng, nhưng hiệu quả tăng nhiệt độ sôi không lớn (chưa tới 2%).

IV. KẾT LUẬN

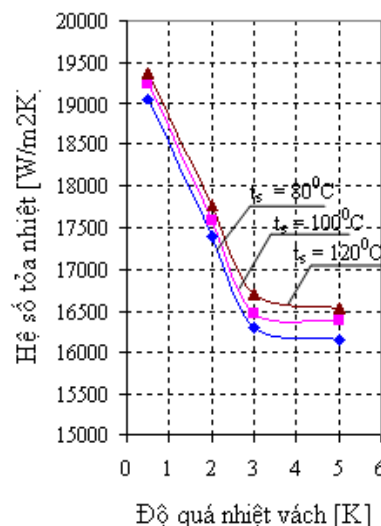
Mô hình toán học đáp ứng được yêu cầu đặt ra là cho phép tính toán quá trình tỏa nhiệt khi chất lỏng sôi trên màng mỏng với kết quả có độ tin cậy đáp ứng được yêu cầu của các tính toán kỹ thuật.



Hình 4. Ảnh hưởng của chiều cao vách (khi $\delta_0 = 0,5 \text{ mm}$, $\Delta t = 3K$)

Ứng dụng mô hình để nghiên cứu một số yếu tố ảnh hưởng tới cơ chế sôi trên màng mỏng cho thấy hệ số tỏa nhiệt ở cơ chế sôi này lớn hơn nhiều so với cơ chế sôi trong thể tích lớn khi có cùng độ quá nhiệt (ở phạm vi Δt nhỏ), cường độ tỏa nhiệt khi sôi trên màng mỏng tăng theo chiều dày màng ban đầu và áp suất bão hòa, giảm khi tăng chiều cao vách và trong giới hạn làm việc của thiết bị thực tế ($3 \div 10K$) không phụ thuộc vào độ quá nhiệt.

Mô hình toán học trình bày trên đây có thể ứng dụng để tính toán quá trình tỏa nhiệt khi sôi của nhiều loại chất lỏng và dung dịch khác nhau làm cơ sở cho việc nghiên cứu thiết kế, chế tạo và điều khiển vận hành tối ưu của các thiết bị công nghệ hoạt động theo cơ chế sôi trên màng mỏng



Hình 5. Ảnh hưởng của nhiệt độ sôi

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Rohsenow W.M, Webber J.H...; Effect of vapor velocity on laminar and turbulent film condensation; Trans. Am. Soc. Mech. Eng. Se. Heat Transf. 78 (1956) 1637 – 164.
2. Xiao, Bu Xuan, Shao Rong; Energy analysis of evaporating thin falling film instability in vertical tube; International Journal of Heat and Mass Trans 45 (2002)
3. Đặng Quốc Phú, Nguyễn Đức Nam; Nghiên cứu hiệu quả tỏa nhiệt khi chất lỏng sôi trên màng mỏng; tạp chí KH & CN Nhiệt số 74 (2007).
4. Nguyễn Thành Văn; Nghiên cứu sử dụng hiệu quả máy lạnh hấp thụ trong lĩnh vực ĐHKK tại Việt Nam; Luận văn TS; ĐH Đà Nẵng 2004.
5. Lương Tiến Thành; Nghiên cứu truyền nhiệt khí sôi ở độ chênh nhiệt độ bé; Luận văn thạc sỹ khoa học; ĐH Bách Khoa HN (2007).
6. Stephan, Karl; Wärmeübergang beim Kondensieren beim Sieden Springer; Verlag Berlin Heidelberg New York London (1988).
7. Trần Thu Hằng, Đặng Quốc Phú, Nguyễn Thành Văn; Nghiên cứu lý thuyết quá trình truyền nhiệt khi sôi trên màng mỏng; Tạp chí KH và CN Nhiệt số 76 (2007), tr 8 – 11.
8. Stephan, Karl; Wärmeübergang beim Kondensieren beim Sieden Springer; Verlag Berlin Heidelberg New York London (1988)
9. Phạm Văn Vĩnh; Cơ học chất lỏng ứng dụng; Nhà xuất bản giáo dục; Hà Nội (2005)
10. Кутателадзе С. С.; Основы Теории Теплообмена; Москва Атомиздат 1979

Địa chỉ liên hệ: Đặng Quốc Phú, Trần Thu Hằng - Tel: 0166.8289.808.
Viện KH&CN Nhiệt Lạnh – Trường Đại học Bách khoa Hà Nội
Email: tranhangktn@gmail.com