

MÔ HÌNH QUÁ TRÌNH KẾT TỤ HẠT DƯỚI ẢNH HƯỞNG CỦA SÓNG SIÊU ÂM TRONG HỆ THỐNG LỌC BỤI LY TÂM

MODELIZATION OF THE ACCUMULATION OF PARTICLES UNDER THE ULTRASOUND INFLUENCE ON A CENTRIFUGAL DUST FILTER SYSTEM

Nguyễn Văn Cường^{1,*}, Trần Trọng Thắng²

TÓM TẮT

Bài báo xây dựng mô hình toán học quá trình kết tụ của các hạt phân tán (rời rạc) trong môi trường khí dưới ảnh hưởng của sóng siêu âm, có tính đến độ nhớt của môi trường. Mô hình toán được xây dựng dựa trên hệ phương trình Smoluchowski, mô tả động học quá trình hội tụ, khi tính toán các thành phần xác suất va chạm từng đôi của các hạt có kích thước xác định có tính đến độ nhớt của dòng khí. Kết quả khảo sát ảnh hưởng của nồng độ hạt tới hiệu suất lọc trong hệ thống lọc bụi khi có tác động và không tác động của sóng siêu âm.

Từ khóa: Sóng siêu âm, lọc bụi, Sol khí, ngưng tụ âm.

ABSTRACT

A mathematical model of the accumulation of diffuse particles in the air environment under the effect of the ultrasound is proposed. The model is established based on a set of equations of Smoluchowski which describes the kinematic of accumulation process and take into account viscosity of the dust-air stream. This model is to calculate the impact probability elements between a particle couple (with a determined dimension of particles) in the dust-air stream. Results demonstrate the influence of the particle concentration in the dust-air stream on the efficiency of a centrifugal dust filter system with and without the participation of the ultrasound.

Keywords: Ultrasound waves, dust filter, aerosol, acoustic coagulation.

¹Trường Đại học Giao thông vận tải

²Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: nguyencuong@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/02/2019

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 16/4/2019

Ngày chấp nhận đăng: 25/4/2019

1. GIỚI THIỆU

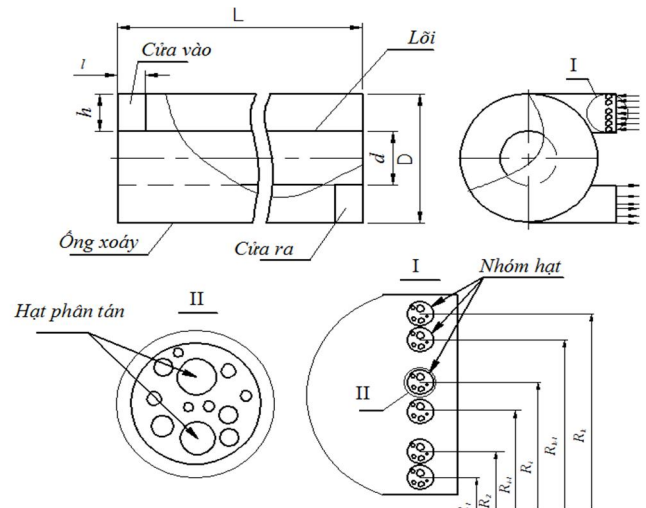
Có nhiều nghiên cứu, thiết kế trong nước và ngoài nước giải quyết các vấn đề về lọc bụi nhằm nâng cao hiệu quả của phương pháp lọc ly tâm hoặc lọc quán tính, bằng cách thiết lập các hiệu ứng năng lượng bên ngoài để kích thích chuyển động của các hạt bụi, thúc đẩy các liên kết của chúng, làm tăng sự tích tụ của các hạt bụi, đưa thông số hạt bụi về vùng hiệu quả của thiết bị lọc. Một trong những phương pháp kích thích năng lượng tích tụ của hạt bụi tác động đến hiệu quả của quá trình lọc bụi là ứng dụng những rung động của

sóng âm và sóng siêu âm. Các nghiên cứu cho thấy rằng hiệu quả lọc bụi tăng cao khi sử dụng ngưng tụ bằng sóng siêu âm cường độ cao. Hiện nay ngưng tụ âm là một trong số ít các phương pháp không làm thay đổi thành phần hóa học hoặc tính chất vật lý của các hạt.

Việc mô hình hóa quá trình ngưng tụ âm đã được nghiên cứu trước đây trong tài liệu [1-4]. Mô hình được xây dựng dựa trên hệ phương trình Marian Smoluchowski, mô tả động học quá trình kết tụ. Tuy nhiên, khi tính toán các thành phần xác suất va chạm từng đôi của các hạt có kích thước xác định tác giả đã bỏ qua độ nhớt của dòng khí. Các phương pháp hiện nay rất khó để tính toán cho quá trình hội tụ các hạt phân tán mịn, có kích thước hạt dưới $10\mu m$, ở kích thước hạt như vậy, độ nhớt khí có ảnh hưởng rõ rệt đến số Reynol.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Xây dựng mô hình tính toán



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý kết hợp các hạt thành các nhóm

Mô hình nghiên cứu bao gồm một ống xoáy hình trụ có đường kính D , chiều dài L , lõi ống có đường kính d , với giả thiết các nhóm hạt bụi hình cầu có cùng đặc tính (cùng đường kính, diện tích bề mặt), cùng vận tốc và phân bố đều ở cửa vào của ống hút. Các hạt va chạm và kết tụ do các tương tác gây ra bởi sóng âm thanh. Các hạt cũng có thể

lắng đọng trên thành buồng do khuếch tán và lắng đọng trọng lực.

Mỗi hạt trong nhóm có khối lượng là m_o , khối lượng của nhóm hạt là km_o . Động học của quá trình ngưng tụ được thể hiện dựa trên cơ sở phương trình Smoluchowski [5] và được bổ sung thêm hạng tử, khi có tính đến sự thay đổi nồng độ của các hạt phân tán do sự tác động lẫn nhau của các nhóm hạt:

$$\frac{\partial n_k(t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} \beta_{i,k-i} n_i n_{k-i}(t) - n_k(t) \sum_{i=1}^M \beta_{i,k} n_i(t) - n_k(t) \frac{1}{\partial r_o} \frac{\partial^2 r}{\partial r_o \partial t} - \frac{n_k(t)}{r} \frac{\partial r}{\partial t}$$

Trong đó, n_k - mật độ của của hạt kích cỡ k tại thời điểm t , $1/m^3$; k - số tự nhiên thay đổi từ 1 đến M (hệ phương trình thu được từ các k khác nhau); r_o - khoảng cách từ tâm của nhóm hạt đến trục quay của ống xoáy tại thời điểm ban đầu, m ; r - khoảng cách từ tâm của nhóm hạt đến trục quay của ống xoáy tại thời điểm t , m ; M - Số lượng hạt được chọn theo thực tế, trong các phép tính M bằng 1000; $\beta_{i,k}$ - hạt nhân ngưng tụ, không phụ thuộc thời gian, đặc trưng cho xác suất va chạm của cặp hạt i và k , m^3/s .

Để tính toán xác suất va đập của các hạt cần chú ý hai tương tác: tương tác động lực học và tương tác thủy động lực học của các hạt. Tương ứng với vận tốc hội tụ giữa các hạt có hai thành phần. Thành phần do sự tương tác trực giao, phụ thuộc vào thời gian. Thành phần tương tác thủy động lực học, không phụ thuộc thời gian. Ngoài ra, tương tác trực giao tạo ra các va chạm hạt theo hướng sóng âm, tương tác thủy động lực tạo ra các va chạm hạt chủ yếu vuông góc với hướng sóng âm.

Hạt nhân ngưng tụ có thể biểu diễn dưới dạng tổng của hai thành phần [2]:

$$\beta_{i,k} = \beta_{oi,k} + \beta_{Hi,k}$$

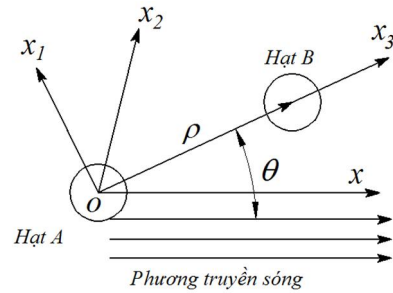
Trong đó: $\beta_{oi,k}$ - thành phần hạt nhân ngưng tụ đặc trưng cho tương tác động lực học; $\beta_{Hi,k}$ - thành phần hạt nhân ngưng tụ đặc trưng cho tương tác thủy động lực học.

Thành phần hạt nhân tương tác động lực học được xác định như sau: $\beta_{oi,j} = 2(r_i + r_j)^2 U_o H_{i,j}$

Trong đó: r_i, r_j - tương ứng là bán kính của hạt i và j , m ; U_o - biên độ vận tốc rung động của môi trường khí, khi không có các hạt bụi, (m/s) ; $H_{i,j}$ - hệ số kéo giữa hai hạt

$$H_{i,j} = |H_i - H_j| = \left| \frac{1 + \frac{3}{2}\sqrt{\delta\omega\tau_i} - i\left(\frac{3}{2}\delta\omega\tau_i + \frac{3}{2}\sqrt{\delta\omega\tau_i}\right)}{1 + \frac{3}{2}\sqrt{\delta\omega\tau_i} - i\left(\left(1 + \frac{1}{2}\delta\right)\omega\tau_i + \frac{3}{2}\sqrt{\delta\omega\tau_i}\right)} - \frac{1 + \frac{3}{2}\sqrt{\delta\omega\tau_j} - j\left(\frac{3}{2}\delta\omega\tau_j + \frac{3}{2}\sqrt{\delta\omega\tau_j}\right)}{1 + \frac{3}{2}\sqrt{\delta\omega\tau_j} - j\left(\left(1 + \frac{1}{2}\delta\right)\omega\tau_j + \frac{3}{2}\sqrt{\delta\omega\tau_j}\right)} \right|$$

$\tau_i = \frac{\rho_p d_i^2}{18\mu}$ - thời gian lắng đọng của hạt; δ - tỷ số giữa mật độ khí và mật độ hạt; ρ_p - khối lượng đơn vị của hạt; ω - vận tốc góc của sóng âm, rad/s ; d_i - đường kính hạt; μ - độ nhớt động học pha khí.



Hình 2. Nguyên lý và chạm các hạt do tương tác thủy

Thành phần hạt nhân tương tác thủy động lực học được xác định như sau:

$$\beta_{Hi,j} = \frac{(r_i + r_j)^2}{3\mu} \left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_j} \right) \int_0^\pi h(f_{21}) f_{21} \sin\theta d\theta$$

$$\text{Với } h(f_{21}) = \begin{cases} h(f_{21}) = 1, & \text{nếu } f_{21} \geq 0 \\ h(f_{21}) = 0, & \text{nếu } f_{21} < 0 \end{cases}$$

θ - góc giữa vector truyền sóng và phương nối tâm hai hạt tương tác, khi tính xác suất va chạm tích phân được lấy qua tất cả các góc; f_{21} - lực tương tác của các hạt xác định theo [6], đối với các hạt hình cầu đặt trong dung dịch lý tưởng không nén, được xác định theo công thức:

$$f_{21} = \frac{3\pi\rho_o U_o^2}{2} \cdot \frac{r_i^3 r_j^3}{(r_i + r_j)^4}$$

ρ_o - mật độ của pha khí.

Như vậy, sau khi thay các giá trị ta xác định được thành phần xác suất va chạm do tương tác thủy động lực học như sau:

$$\beta_{Hi,j} = \frac{2\sqrt{3\pi\rho_o U_o^2}}{9\mu} \frac{r_i^2 r_j^2}{r_i + r_j}$$

2.2. Mô hình khảo sát ảnh hưởng của sóng siêu âm đến hiệu suất lọc ở nồng độ hạt khác nhau



Hình 3. Mô hình hệ thống lọc bụi ly tâm với ống tiến xử lý

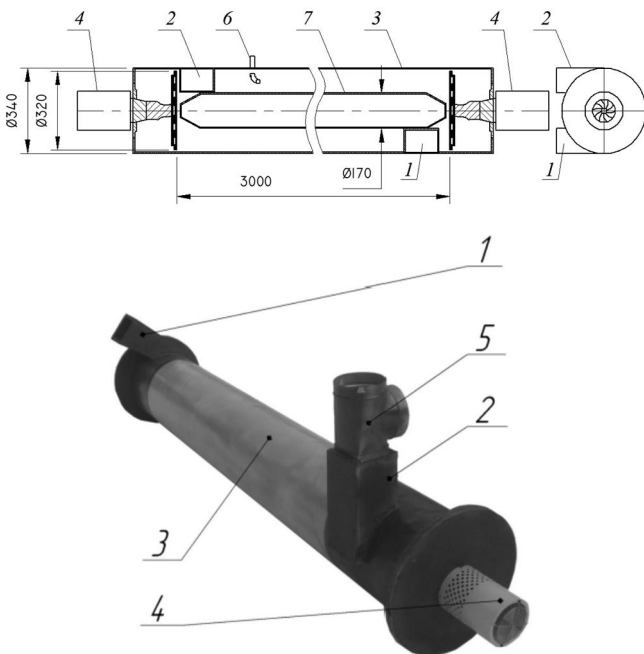
1 - Ống tiến xử lý; 2 - Xyclon; 3 - Ống dẫn dòng khí; 4 - Bộ tách dòng; 5 - Thiết bị phát sóng siêu âm; 6 - Quạt hút

Khảo sát ảnh hưởng của sóng siêu âm đến hiệu suất lọc bụi ở nồng độ hạt khác nhau được thực hiện với mô hình như hình 3.

Để tăng khả năng kết tụ hạt, tăng hiệu suất lọc cần xác định điều kiện làm việc của các thiết bị lọc bụi và của thiết bị siêu âm. Để làm điều này, cần phải xác định quỹ đạo của chuyển động của các nhóm hạt được nạp vào ống xoáy. Ngoài ra, đường kính của các hạt kết tụ tăng tùy thuộc vào cường độ, tần số và thời gian siêu âm, nồng độ của các hạt phân tán trong ống xoáy.

Khảo sát ảnh hưởng của sóng siêu âm tới hiệu suất lọc bụi được thực hiện với ống thực nghiệm như hình 4, các thông số dữ liệu đầu vào: đường kính ống xoáy $D = 340mm$; Đường kính lõi ống $d = 170mm$; Chiều dài ống xoáy $L = 3000mm$; Đường kính đĩa phát sóng siêu âm $\varnothing 320mm$; Tần số sóng âm $f = 22kHz$; Dòng khí mang hạt Aerosil A-17; Đường kính ban đầu của hạt được khảo sát là $3\mu m$.

Dòng khí mang hạt được cung cấp bởi một máy phun lắp đặt phía trước đầu vào (1) như hình 4. Đầu ra được nối với thiết bị lọc bụi ly tâm Xyclon như hình 3. Lưu lượng dòng khí thay đổi bằng cách điều chỉnh quạt hút. Khảo sát thực hiện ở hai điều kiện: không có tác động sóng siêu âm và có tác động của sóng siêu âm. Sau mỗi thực nghiệm cân trọng lượng bụi thu được trong Xyclon để đánh giá hiệu suất lọc.



Hình 4. Ống dẫn tiền xử lý hạt bằng sóng siêu âm

1 - Đầu vào; 2 - Đầu ra; 3 - Ống ngưng tụ, 4 - Thiết bị phát sóng siêu âm; 5 - Bộ chia dòng khí ra; 6 - Ống lấy khí làm mẫu, 7 - Lõi ống

3. KẾT QUẢ KHẢO SÁT VÀ ĐÁNH GIÁ

Bảng 1 là hiệu suất của Xyclon khi thay đổi nồng độ hạt bụi trong khí. Hình 5 là biểu đồ so sánh hiệu suất lọc của Xyclon không có sóng siêu âm và khi có sóng siêu âm ở các nồng độ khác nhau.

Ở nồng độ hạt nhỏ (dưới $2g/m^3$), các hạt có khoảng cách xa nhau, xác suất va chạm dưới rung động của sóng âm là thấp, ảnh hưởng của sóng âm tới hiệu suất lọc bụi không đáng kể, cụ thể theo kết quả đo nồng độ hạt $1,912g/m^3$ hiệu suất lọc khi không có sóng siêu âm là 61,9% còn có sóng siêu âm là 65,12% tăng 3,22% hiệu suất.

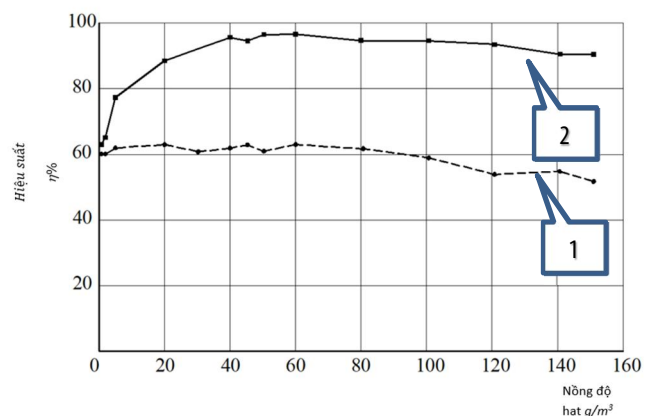
Tăng nồng độ hạt (dưới $20g/m^3$) gia tăng đáng kể hiệu suất lọc do các va chạm tăng lên và trong trường hợp đó các hạt bé sẽ bao bọc quanh các hạt lớn như môi chất của hạt lớn làm độ nhớt tăng lên, cụ thể đo ở nồng độ hạt $19,85g/m^3$ hiệu suất lọc khi không có sóng siêu âm là 62,97% có sóng siêu âm là 88,43% tăng 25,46% hiệu suất.

Ở nồng độ $60g/m^3$ hiệu suất lọc khi không có sóng siêu âm là 62,98% còn khi có sóng siêu âm là 96,61% tăng 33,63%, đây là nồng độ có hiệu suất lọc tăng cao nhất.

Nếu tiếp tục tăng lưu lượng khí (lớn hơn $60g/m^3$) hiệu suất lọc sẽ giảm. Do giảm tốc độ của hạt, giảm lực ly tâm.

Bảng 1. Kết quả đo hiệu suất ở các lưu lượng khí khác nhau

Nồng độ hạt (g/m^3)	Hiệu suất $\eta_o\%$ (có sóng siêu âm)	Hiệu suất $\eta\%$ (không có sóng siêu âm)
0,72	63,02	60,09
1,91	65,12	61,90
5	77,33	60,98
19,85	88,43	62,97
30,24	92,25	60,92
39,96	95,69	61,90
45,35	94,63	62,89
50,31	96,48	60,93
60	96,61	62,98
80,69	94,67	61,72
100,67	94,63	58,94
120,8	93,52	53,89
140,6	90,51	54,84
151	90,49	51,71



Hình 5. Ảnh hưởng nồng độ hạt tới hiệu suất lọc bụi

1- không có sóng siêu âm; 2- có sóng siêu âm

4. KẾT LUẬN

Sóng siêu âm có ảnh hưởng lớn đến quá trình kết tụ hạt, làm tăng kích cỡ hạt trong vùng lọc hiệu quả của các thiết bị lọc, hiệu suất lọc khi có sóng siêu âm tác động tăng lên đáng kể và thay đổi ở các nồng độ hạt khác nhau. Hiệu suất lọc phụ thuộc vào nhiều yếu tố (tần số sóng âm, cường độ sóng âm, kích thước hạt ban đầu, thời gian tác động sóng,...), trong đó nồng độ hạt dòng khí có ảnh hưởng tới hiệu suất lọc vì làm thay đổi độ nhớt của dòng khí mang bụi, hiệu suất lọc sẽ tăng lên khi nồng độ tăng và đạt cực trị khi nồng độ dòng khí nằm trong vùng tối ưu của quá trình kết tụ, hiệu suất lọc sẽ giảm nếu nồng độ hạt tăng vượt quá giá trị giới hạn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Sheng, C. D., 2006. *Modelling Acoustic Agglomeration Processes Using Direct Simulation Monte Carlo Method*. J. Aerosol Sci. 37: 16–36. (in English).
- [2]. Hoffmann, T.L., 1997. *An Extended Kernel for Acoustic Agglomeration Simulation Based on the Acoustic Wake Effect*. J. Aerosol Sci. 28:919–936. (in English)
- [3]. Song, L., 1990. *Modelling of Acoustic Agglomeration of Fine Aerosol Particles*. PhD Thesis, The Pennsylvania State University. (in English)
- [4]. Борискина, И.П. Влияние гидродинамического взаимодействия на движение частиц в идеальной жидкости [Текст] / И. П. Борискина, С. И. Мартынов // Труды СВМО.— 2003.
- [5]. Берснев, С.А. Физика атмосферных аэрозолей [Текст]/ С.А. Берснев, В.И. Грязин.— Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. 227 с.
- [6]. Seya, K., 1957. *Agglomeration of aerosols by ultrasonically produced water mist*. Ultrasonic symposium proceedings, pp. 583–584.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Van Cuong¹, Tran Trong Thang²

¹University of Transport and Communications

²Hanoi University of Industry