

УДК 681.3:665.66(045)

<sup>1</sup>С.О. Пузік, канд. техн. наук  
<sup>2</sup>В.С. Шевчук, канд. техн. наук  
<sup>3</sup>В.С. Манзій, канд. техн. наук

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАЄКТОРІЙ ФЕРОМАГНІТНИХ ЧАСТИНОК ЗАБРУДНЕНЬ У МАГНІТНИХ ОЧИСНИКАХ

<sup>1</sup>НАУ, Інститут заочного і дистанційного навчання, e-mail: fapmobil@nau.edu.ua  
<sup>2,3</sup>НАУ, кафедра механіки

*Досліджено траєкторії осадження феромагнітних частинок забруднень в магнітних очисниках рідин і газів. Визначено, що траєкторії осадження частинок забруднення можна розглядати як прямі лінії.*

### Вступ

У деяких виробничих процесах можливе утворення залізовмісних (феромагнітних) фракцій за рахунок корозії та зносу елементів обладнання. Як правило, це негативно впливає на такі фактори:

- якість продукції;
- перебіг технологічних процесів;
- надійність обладнання;
- довговічність обладнання.

Тому очищення різноманітних рідинних та газових середовищ від такого роду забруднення завжди має актуальне значення.

Теоретичної залежності для розрахунку процесу очищення в магнітному полі не існує, тому на практиці використовують переважно експериментальні дані.

Магнітне очищення рідин дозволяє видаляти із рідини, що очищається, феромагнітні частинки розміром 0,1 мкм, подовжувати ресурс роботи звичайних фільтрів тонкого очищення.

Крім того, магнітна обробка рідини корисна ще й тим, що дрібні частинки забруднень намагнічуються, коагулюються і утворюють конгломерати достатньо великих розмірів 25–30 мкм, які успішно затримуються фільтрами з пористою перепоною.

Під час проектування магнітних очисників слід урахувати ефективність процесу магнітного очищення, яке залежить від таких факторів:

- потік рідини повинен проходити тонкими шарами через область з максимальною напруженістю магнітного поля;
- режим течії рідини повинен бути ламінарним;
- чим менша в'язкість рідини, тим ефективніше процес очищення;
- сила, яка діє на частинку з боку магнітного поля, обернено пропорційна квадрату відстані;
- напрямок потоку рідини повинен збігатися з напрямком силових ліній магнітного поля.

Для цього застосовується очищення в магнітних полях, які створюються в спеціальних пристроях – магнітних очисниках.

### Конструкція та принцип дії магнітного очисника

У процесі магнітного осаджування феромагнітних частинок основна роль належить намагнічуваним насадкам, які безпосередньо контактують з потоком очищуваних рідин або газів.

Для цього використовують, наприклад, підшипникові кульки, які утворюють ланцюжки з 10–12 кульок (рис. 1).

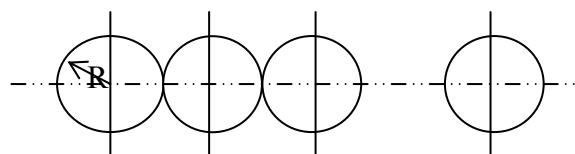


Рис. 1. Ланцюжок кульок

На рис. 2 показано силові лінії магнітного поля, які утворюють канал намагнічування радіуса  $r$ , відстань  $l$  між поверхнями суміжних кульок радіуса  $R$  на радіусі  $r$  каналу намагнічування.

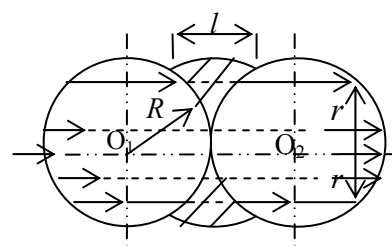


Рис. 2. Пара суміжних кульок в осьовому перерізі

Області, заштриховані на рис. 2, є осьовим перерізом зони магнітного захоплення феромагнітних частинок [1].

При попаданні в зону захоплення частинка ніби зависає в ній.

Причому у разі проходження до зони захоплення її швидкість  $V_{\text{ч}}$  можна порівняти зі швидкістю  $V_{\text{с}}$  очищуваних рідини чи газу, а шлях – з радіусом зони захоплення.

При цьому на частинку діють такі сили:

– магнітна:

$$F_M = \mu_0 k w_{\pm} H \text{grad} H,$$

де  $\mu_0$  – магнітна стала,  $\tilde{A}i/i$ ;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ;  $k$  – магнітна сприйнятливність;  $w_{\pm}$  – об’єм частинки;  $H$  – напруженість магнітного поля в місці знаходження частинки;  $\text{grad} H$  – градієнт напруженості поля;

– сила опору:

$$F_o = 3\pi d \mu V_{\pm},$$

де  $d$  – діаметр частинки;  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в’язкості;  $V_{\pm}$  – відносна швидкість частинки, бо частинка знаходиться в складному русі, переносному разом з рідиною або газом зі швидкістю  $V_e$  та в русі відносно цих середовищ;

– сила ваги:

$$G = \rho_{\pm} w_{\pm} g;$$

де  $\rho_{\pm}$  – щільність частинки;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння;

– архімедова сила:

$$F_a = \rho w_{\pm} g,$$

де  $\rho$  – щільність рідини або газу;

– переносна сила інерції:

$$F_e^{in} = \rho_{\pm} w_{\pm} \dot{a}_a,$$

де  $a_e$  – уповільнення потоку, рух якого в зоні захвату умовно можна розглядати, як рівносповільнений, тому  $a_e$  можна знайти за допомогою відомих з фізики залежностей:

$$\begin{cases} V = V_e - a_e t; \\ l = V_e t - \frac{a_e t^2}{2}. \end{cases}$$

Звідси

$$a_e = \frac{V_e^2}{2l}.$$

На рис. 3 показана частинка, що у початковий момент знаходилась на граничному радіусі  $r$  (в точці O) та діючі на неї сили.

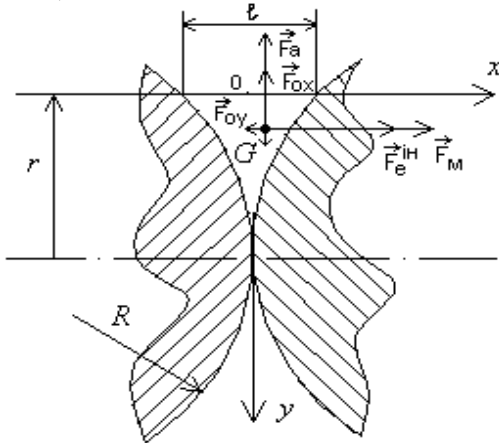


Рис. 3. Схема сил, які діють на частинку забруднення

### Складання і розв’язування систем диференціальних рівнянь руху частинок забруднення в різних середовищах

Згідно з працею [2] диференціальні рівняння відносного руху в проекціях на осі координат мають вигляд:

$$\begin{cases} m \dot{x} = F_{ix} + F_e^{xi} - F_{ox}; \\ m \dot{y} = G - F_{oy} - F_a, \end{cases} \quad (1)$$

де  $m = \rho_{\pm} w_{\pm}$  – маса частинки,  $F_{ox}$  та  $F_{oy}$  – складові сили опору  $F_o$ .

Після підстановки в рівняння (1) відповідних виразів та спрощень з урахуванням того, що

$$w_{\pm} \approx \frac{\pi d^3}{6},$$

одержуємо:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{\mu_0 k H \text{grad} H}{\rho_{\pm}} + \frac{V_e^2}{2l} - \frac{18 \mu}{\rho_{\pm} d^2} \dot{x}; \\ \ddot{y} = g \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_{\pm}} \right) - \frac{18 \mu}{\rho_{\pm} d^2} \dot{y}. \end{cases} \quad (2)$$

Розв’язування рівнянь (2) зручно виконувати методом поділу змінних. Це дало б змогу встановити характер траєкторії частинки у відносному русі.

Для прикладу були використані дані з праці [3] для очистки води:

$$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3;$$

$$\mu = 10^{-3} \text{ П} \cdot \text{н/м}^2;$$

$$V_e = 6-8 \text{ см/с};$$

$$r/R = 0,2-0,3;$$

$$R = 20 \text{ мм},$$

для очистки повітря:

$$\rho = 1,3 \text{ кг/м}^3;$$

$$\mu = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2,$$

$$V_e = 4 \text{ м/с};$$

$$R = 3 \text{ мм},$$

також спільні дані:

$$\rho_{\pm} = 5100 \text{ кг/м}^3;$$

$$H \text{ grad} H = 18 \cdot 10^{13} - 9 \cdot 10^{13} \text{ А}^2/\text{м}^3;$$

$$k = 0,24 - 0,21;$$

$$l = 0,15 \text{ мм}.$$

Після підстановки числових даних у рівняння (2) та виконання всіх елементарних обчислень оста-

точно маємо, якщо  $\frac{r}{R} = 0,3$  та  $k = 0,22$ ,

$$V_e = 6 \text{ см/с};$$

$$d = 10^{-6} \text{ м};$$

$$H \text{ grad} H = 9 \cdot 10^{13} \text{ А}^2/\text{м}^3;$$

– для очистки води:

$$\begin{cases} \dot{x} = 4888,2 - 3,5 \cdot 10^6 \dot{x}; \\ \dot{y} = 7,89 - 3,5 \cdot 10^6 \dot{y}; \end{cases} \quad (3)$$

– для очистки повітря:

$$\begin{cases} \dot{x} = 58209,2 - 6 \cdot 10^4 \dot{x}; \\ \dot{y} = 9,8 - 6 \cdot 10^4 \dot{y}. \end{cases} \quad (4)$$

Розв'яжемо систему рівнянь (3) для очистки води:

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{x}}{4888,2 - 3,5 \cdot 10^6 \dot{x}} &= dt; \\ -\frac{1}{3,5 \cdot 10^6} \int_0^{\dot{x}} \frac{d(1396,6 \cdot 10^{-6} - \dot{x})}{1396,6 \cdot 10^{-6} - \dot{x}} &= \\ = -\frac{1}{3,5 \cdot 10^6} \ln |1396,6 \cdot 10^{-6} - \dot{x}|_0^{\dot{x}} &= \\ = -\frac{1}{3,5 \cdot 10^6} \ln \left| \frac{1396,6 \cdot 10^{-6} - \dot{x}}{1396,6 \cdot 10^{-6}} \right| &= \\ = -\frac{1}{3,5 \cdot 10^6} \ln \left| \frac{1396,6 \cdot 10^{-6}}{1396,6 \cdot 10^{-6} - \dot{x}} \right| &= t; \\ \frac{1396,6 \cdot 10^{-6}}{1396,6 \cdot 10^{-6} - \dot{x}} &= e^{3,5 \cdot 10^6 t}; \\ 1396,6 \cdot 10^{-6} &= 1396,6 \cdot 10^{-6} e^{3,5 \cdot 10^6 t} - e^{3,5 \cdot 10^6 t} \dot{x}; \\ \dot{x} &= 1396,6 \cdot 10^{-6} - 1396,6 \cdot 10^{-6} e^{-3,5 \cdot 10^6 t}; \\ x &= 1396,6 \cdot 10^{-6} t + \frac{1396,6 \cdot 10^{-6}}{3,5 \cdot 10^6} e^{-3,5 \cdot 10^6 t} \Big|_0^t = \\ &= 1396,6 \cdot 10^{-6} t + \frac{1396,6 \cdot 10^{-6}}{3,5 \cdot 10^6} e^{-3,5 \cdot 10^6 t} - \frac{1396,6}{3,5 \cdot 10^6}. \end{aligned}$$

Якщо  $t = 0, x = 0$ .

Якщо  $t > 0$ ,

$$\begin{aligned} x &= 0,0013966t + \frac{399 \cdot 10^{-12}}{e^{3,5 \cdot 10^6 t}} - 0,000399 \approx \\ &\approx 0,0013966t - 0,000399 \approx 0,00139t; \end{aligned}$$

$$d\dot{y} = (7,89 - 3,5 \cdot 10^6 \dot{y})dt;$$

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{y}}{7,89 - 3,5 \cdot 10^6 \dot{y}} &= dt; \\ -\frac{1}{3,5 \cdot 10^6} \int_0^{\dot{y}} \frac{d(2,25 \cdot 10^{-6} - \dot{y})}{2,25 \cdot 10^{-6} - \dot{y}} &= \\ = -\frac{1}{3,5 \cdot 10^6} \ln |2,25 \cdot 10^{-6} - \dot{y}|_0^{\dot{y}} &= \\ = \frac{1}{3,5 \cdot 10^4} \ln \left| \frac{2,25 \cdot 10^{-6}}{2,25 \cdot 10^{-6} - \dot{y}} \right| &= t; \\ \ln \left| \frac{2,25 \cdot 10^{-6}}{2,25 \cdot 10^{-6} - \dot{y}} \right| &= 3,5 \cdot 10^6 t; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{2,25 \cdot 10^{-6}}{2,25 \cdot 10^{-6} - \dot{y}} &= e^{3,5 \cdot 10^6 t}; \\ 2,25 \cdot 10^{-6} &= 2,25 \cdot 10^{-6} e^{3,5 \cdot 10^6 t} - e^{3,5 \cdot 10^6 t} \dot{y}; \\ \dot{y} &= 2,25 \cdot 10^{-6} - 2,25 \cdot 10^{-6} e^{-3,5 \cdot 10^6 t}; \\ y &= 2,25 \cdot 10^{-6} t + 0,64 \cdot 10^{-12} e^{-3,5 \cdot 10^6 t} - 0,64 \cdot 10^{-12}. \end{aligned}$$

Якщо  $t = 0, y = 0$ .

Якщо  $t > 0$ ,

$$\begin{aligned} y &= 2,25 \cdot 10^{-6} t + \frac{0,64 \cdot 10^{-12}}{e^{3,5 \cdot 10^6 t}} - 0,64 \cdot 10^{-12} \approx \\ &\approx 0,00000225t. \end{aligned}$$

Отже, у результаті розв'язування системи рівнянь для води (3) маємо:

$$\begin{cases} x \approx 0,0013966t - 0,000399 \approx 0,00139t, \\ y \approx 0,00000225t, \end{cases}$$

тобто траєкторією практично є пряма  $x \approx 0,00139t$ .

Розв'яжемо систему рівнянь (4) для повітря:

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{x}}{58209,2 - 6 \cdot 10^4 \dot{x}} &= dt; \\ -\frac{1}{6 \cdot 10^4} \int_0^{\dot{x}} \frac{d(0,97 - \dot{x})}{0,97 - \dot{x}} &= -\frac{1}{6 \cdot 10^6} \ln |0,97 - \dot{x}|_0^{\dot{x}} = \\ = -\frac{1}{6 \cdot 10^6} \ln \left| \frac{0,97 - \dot{x}}{0,97} \right| &= \frac{1}{6 \cdot 10^6} \ln \left| \frac{0,97}{0,97 - \dot{x}} \right| = t; \\ \ln \left| \frac{0,97}{0,97 - \dot{x}} \right| &= 6 \cdot 10^6 t; \\ \frac{0,97}{0,97 - \dot{x}} &= e^{6 \cdot 10^6 t}; \\ 0,97 &= 0,97 e^{6 \cdot 10^6 t} - e^{6 \cdot 10^6 t} \dot{x}; \\ \dot{x} &= 0,97t - 0,97 e^{-6 \cdot 10^6 t}; \\ \delta &= 0,97t + \frac{0,97}{6 \cdot 10^6} e^{-6 \cdot 10^6 t} \Big|_0^t = \\ &= 0,97t + \frac{0,97}{6 \cdot 10^6} e^{-6 \cdot 10^6 t} - \frac{0,97}{6 \cdot 10^6}; \\ x &= 0,97t + 0,00000016t - 0,00000016 \approx \\ &\approx 0,97t - 0,00000016 \approx 0,97t. \end{aligned}$$

$$d\dot{y} = (9,8 - 6 \cdot 10^4 \dot{y})dt;$$

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{y}}{9,8 - 6 \cdot 10^4 \dot{y}} &= dt; \\ -\frac{1}{6 \cdot 10^4} \int_0^{\dot{y}} \frac{d(1,63 \cdot 10^{-4} - \dot{y})}{1,63 \cdot 10^{-4} - \dot{y}} &= \\ = -\frac{1}{6 \cdot 10^4} \ln |1,63 \cdot 10^{-4} - \dot{y}|_0^{\dot{y}} &= \\ = \frac{1}{6 \cdot 10^4} \ln \left| \frac{1,63 \cdot 10^{-4}}{1,63 \cdot 10^{-4} - \dot{y}} \right| &= t; \end{aligned}$$

$$\ln \left| \frac{1,63 \cdot 10^{-4}}{1,63 \cdot 10^{-4} - \dot{y}} \right| = 6 \cdot 10^4 t;$$

$$\frac{1,63 \cdot 10^{-4}}{1,63 \cdot 10^{-4} - \dot{y}} = e^{6 \cdot 10^4 t};$$

$$1,63 \cdot 10^{-4} = 1,63 \cdot 10^{-4} e^{6 \cdot 10^4 t} - e^{6 \cdot 10^4 t} \dot{y};$$

$$\dot{y} = 1,63 \cdot 10^{-4} - 1,63 \cdot 10^{-4} e^{-6 \cdot 10^4 t};$$

$$y = 1,63 \cdot 10^{-4} t + \frac{1,63 \cdot 10^{-4}}{6 \cdot 10^4} e^{-6 \cdot 10^4 t} - \frac{1,63 \cdot 10^{-4}}{6 \cdot 10^4}.$$

Якщо  $t = 0$ ,  $y = 0$ .

Якщо  $t > 0$ ,

$$y = 0,000163t + \frac{0,27 \cdot 10^{-8}}{e^{6 \cdot 10^4 t}} - 0,27 \cdot 10^{-8} \approx 0,000163t.$$

У результаті розв'язування системи рівнянь (4) маємо:

$$\begin{cases} x \approx 0,97t, \\ y \approx 0,000163t, \end{cases}$$

тобто траєкторією практично є пряма  $x = 0,97t$ , що збігається з напрямком силових ліній магнітного поля.

## Висновок

У результаті аналітичного дослідження траєкторії частинок забруднення в магнітних очисниках можна стверджувати:

- осадження частинок забруднення в рідинах відбувається за прямолінійними траєкторіями;
- аналогічно осаджуються частинки забруднень в газовому середовищі;
- кожна частинка забруднення має свою траєкторію осадження.

## Література

1. Сандуляк А.В. Магнитно-фильтрационная очистка жидкостей и газов. – М.: Химия, 1988. – 132 с.
2. Павловський М.А. Теоретична механіка. – К.: Техніка, 2002. – 510 с.
3. Пузік С.О., Манзій В.С., Шевчук В.С., Ланецький В.Г. Визначення траєкторій частинок забруднення в інерційному очиснику рідин // IV Міжнар. наук.-техн. конф. «Авіа-2002». – К.: НАУ. – 43.49–43.52 с.

Стаття надійшла до редакції 22.12.05.

Исследовано траектории осаждения ферромагнитных частиц загрязнения в магнитных очистителях жидкостей и газов. Определено, что траектории осаждения частиц загрязнения можно рассматривать как прямые линии.

The ways precipitation of ferromagnetic particles of soiling in the magnetic liquid and gas cleaners were explored. It was determined, that the ways of precipitation particles of soiling were discerned such as straight lines.