

Технічні науки

УДК 532.584:537.84

Dakhnenko V.L.

Ph.D. in Technical Sciences, Ass.Prof.

National Technical University of Ukraine

“Kyiv Polytechnic Institute”

Дахненко В. Л.

кандидат технічних наук, доцент, кафедри машин і
апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

EXPERIMENTAL RESEARCH OF KNOT OF CLEANING OF MAGNETIC FILTERS

ОСОБЛИВОСТІ МАГНІТНОГО ОСАДЖЕННЯ ФІЛЬТРУ- ВАННЯМ

Анотація: Досліджена загальна залежність процесу магнітофільтраційної технології очищення рідких речовин із визначенням ключових значень: магнітної сприйнятливості частинок, магнітного силового фактору зон захоплення насадкою частинок, профілю швидкості рідини в порах насадки. В результаті уточнене загальне рівняння процесу магнітофільтраційного очищення, в якому у якості параметру впливу магнітних сил використовується значення індукції магнітного поля насадки, замість напруженості зовнішнього магнітного поля.

Ключові слова: магнітне поле, осадження, напруженість магнітного поля, індукція магнітного поля.

Summary: Investigated the overall dependency of magnetic filtration technology process for liquid substances with identify of key values: magnetic susceptibility of particles, magnetic power factor of capturing particles zones by filling, velocity profile of the liquid in the pores of the filling. As a result, the overall refined equation of magnetic filtration of purification process, in which as the impact parameter magnetic forces uses the value of the magnetic field fillings instead of the external magnetic field.

Key words: magnetic field, deposition, magnetic field, induction magnetic field.

Принцип роботи магнітних сепараторів, фільтрів з намагнічуванням пористої (наприклад, кулькової) насадкою як основним органом цілком зрозумілий: при протіканні крізь пори цієї насадки рідини або газу, магнітосприйнятливі домішки, що знаходяться в середовищі (ферромагнітні, ферромагнітні, антиферромагнітні), особливістю яких є наявність магнітних властивостей [1], осаджуються на гранулах [2]. Модель процесу, у загальному випадку, передбачає рішення векторного диференціального рівняння руху частинки

$$\mathbf{F}_i + \mathbf{F}_\mu + \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_A = 0. \quad (1)$$

При цьому вираз для інерційної $\mathbf{F}_i$ магнітної $\mathbf{F}_\mu$ (для слабомагнітних часток малих розмірів), гідродинамічної $\mathbf{F}_c$ (сили тертя) і архімедової $\mathbf{F}_A$ сил мали вигляд:

$$\mathbf{F}_i = \rho_c \mathbf{W}_c d\mathbf{u}_c / d\tau ; \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_\mu = \mu_0 \kappa \mathbf{W}_c \mathbf{h} |grad \mathbf{h}| ; \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_c = 3\pi \delta \eta (\mathbf{u} - \mathbf{u}_c) \mathbf{k}_c ; \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_A = (\rho_c - \rho) \mathbf{W}_c \mathbf{g} . \quad (5)$$

Тут κ , $\mathbf{W}_c$, δ - магнітна сприйнятливність, об'єм й еквівалентний ефективний діаметр частинок; $\mathbf{h}$ - напруженість магнітного поля між гранулами в місці знаходження частинки; η - динамічна в'язкість несучого середовища (рідини, газу); $\mathbf{u}$, $\mathbf{u}_c$ - швидкість несучого компоненту й частинки; $\mathbf{k}_c$ - ди-

намічний коефіцієнт форми частинки; ρ , $\rho_{\text{ч}}$ – питома вага несучого середовища й частинки; g - прискорення вільного падіння; τ - час.

Для аналітичного описання процесу магнітного осадження й одержання рівняння магнітофільтраційного очищення рідин і газів пов'язані із необхідністю з'ясування й конкретизації ряду ключових питань, які виділяються вже на стадії постановки даної проблеми.

1. Яка магнітна сприйнятливість частинок κ , що входить в F_{μ} у свою чергу залежна від напруженості магнітного поля в місці її знаходження (напруженість поля h сягає 500...1000 кА/м)? Відповідні дані [1] дозволили з точністю до індивідуального коефіцієнта κ' встановити зв'язок κ з h .

$$\kappa = \kappa' / h^{0,8} \quad (6)$$

для реального діапазону $h=100\ldots600$ кА/м.

2. Який магнітний силовий фактор $h|\text{grad}h|$ у поровому просторі, що входить в F_{μ} ? На підставі моделі поканального намагнічування гранульованого середовища [2...4] теоретично й експериментально встановлений профіль магнітної проникності каналів намагнічування (по ланцюжках куль), що дало можливість знайти вираз

$$h = \frac{H\mu}{1 + 0,5\left(\frac{r}{R}\right)^2(\mu-1)}; \quad h|\text{grad}h| = \frac{H^2\mu^2(\mu-1)\frac{r}{R}}{R\left(1 + 0,5\left(\frac{r}{R}\right)^2(\mu-1)\right)^3}, \quad (7)$$

де H - напруженість зовнішнього магнітного поля; μ - магнітна проникність матеріалу гранул; R - радіус гранул (куль); r - відстань від точки контакту куль до точки спостереження в зазорі. Згідно (7) силовий фактор при $r/R=2,5(\mu-1)^{-0,5}$ має максимум.

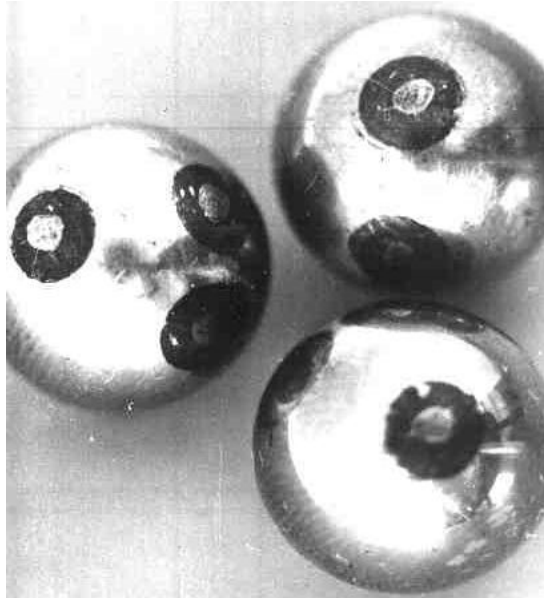


Рис. 1. Локалізація зон захоплення (по осаду) в зоні точок контакту гранул-куль; для наочності контакт куль, вилучений з насадки, порушений.

3. Який профіль швидкості u рідини або газу в порах досить складної форми, що вхіднить в F_c ? З використанням експериментальних даних [5], а також результатів застосування залежності стоксового обтікання кулі стосовно до специфічних умов руху рідини у вікні між чотирма кулями [2] отримано, що в зоні точки контакту куль

$$u=33 \cdot v \cdot (1-R/r_0) \approx 16 \cdot v \cdot (r/R), \quad (8)$$

де u - швидкість фільтрування; r_0 – модуль радіус-вектора, що виходить із центру кулі в точку порового простору.

4. Який внесок сил (2)...(5) у рівняння (1)? Які з них домінують, а якими в умовах тонкої магнітофільтраційного очищення можна знехтувати? Порівняльну оцінку сил, зокрема немагнітних (2), (4), (5), зручно здійснювати для випадку знаходження частинки в безпосередній близькості до границі зони магнітного захоплення, що локалізується в околиці точки контакту гранул, що приблизно $r/R=0,2...0,3$ [2, 6] (рис. 1), де силовий фактор згідно (7) наближається до максимального, а швидкість потоку згідно (8) усе більше послабляється. В оцінках можна прийняти такі допущення: при влученні частинки в зону захоплення вона зависає в ній; при підході

частинки до цієї зони її швидкість співмірна зі швидкістю несучого компонента; шлях гальмування частинки співмірний із радіусом границі зони захоплення. Тоді виходить, що для випадку очищення рідин або газів від частинок розмірами $\delta \leq 50$ мкм інерційну силу F_i можна не враховувати, тому що вони на два порядки менше силам тертя F_c ; при цьому $F_A \ll F_c$ [2].

Отже, якщо брати Лише явно домінуючі сили (магнітну, силу тертя), а для найбільш розповсюдженого випадку тонкого магнітофільтраційного очищення, (очищення від високодисперсних часток), коли інерційні сили порівняно малі, рівняння (1) спрощується:

$$F_\mu + F_c = 0, \quad (1)$$

і у скалярному вигляді записується як умова захоплення:

$$F_\mu \geq F_c = 0, \quad (10)$$

яке часто використовується в подібного роду задачах. Правильність умови (10) і закономірностей, що впливають із нього, магнітного осадження підтверджується багатьма експериментальними даними.

Таким чином, використовуючи умову (10), а також залежності (3), (4), (6)...(8), можна безпосередньо дати характеристику зон захоплення. При цьому варто врахувати дві важливі обставини. Перше - особливістю магнітофільтраційного очищення є локальне (приконтактне) формування сприятливого для захоплення часток магнітного поля й поля швидкості потоку в гранульованій насадці, захоплення часток у такій насадці є "бар'єрним": зони захоплення виконують роль "перешкод" для проходження частинки крізь насадку, а тому знаходження траєкторії руху частинки (дрейфу) крізь гранульовану насадку навряд чи може бути вирішена. Друге - істотним є факт симетрії зон захоплення (рис. 1), що вказує на своєрідне майже кругове обтікання зон захоплення середовищем, що очищається; отже, незважаючи на те, що профіль швидкості несучого компонента згідно (8) відомий лише в площині вікна чарунки насадки, проте результати,

які можуть бути отримані при розкритті умови (10) для такого окремого випадку, цілком справедливі для всієї зони захоплення.

Формули для радіуса $\hat{r}_*$ поясу зони магнітного захоплення навколо точки контакту кульок (із врахуванням їх магнітних властивостей), а також радіуса "поверхні" цієї зони r_* (з центром у точці контакту куль) після логарифмічної лінеаризації одержаних залежностей [2] приймають вигляд

$$\frac{\hat{r}_*}{R} = \left(\frac{a_r k \delta^2 H f}{\eta v R} \right)^{\frac{1}{3}}; \quad \frac{r_*}{R} = \frac{a_\rho}{a_r} \left(\frac{\hat{r}_*}{R} \right)^3 \frac{\rho_* / R}{\rho_* / R - 1}. \quad (11)$$

де a_r, a_ρ — коефіцієнти; ρ_* - модуль радіуса-вектора "поверхні" цієї зони; f - показник степені при H (найбільш часто $f=3/4$); ρ_0 - формальний радіус зони захоплення (як радіус сферичної "поверхні" зони). Слід відзначити, що "поверхня" зони захоплення як геометричне місце точок перетину r_* і ρ_* виявляється не сферичною, як це прийнято вважати, а сідлоподібної [2].

Якщо кулькове середовище представити у вигляді найбільш імовірних квадратно-ромбічних чарунок [2], то з точністю до індивідуальних коефіцієнтів a_σ і a_Ω визначаються такі параметри, як ефективний перетин σ і ефективний об'єм Ω для чарунки, а також імовірність p захоплення частинок чарункою.

$$\frac{\sigma}{R^2} = \frac{8}{3} a_\sigma \left(\frac{r_0}{R} \right)^3; \quad \frac{\Omega}{R^3} = 2 a_\Omega \pi \left(\frac{r_0}{R} \right)^4; \quad \frac{r}{\hat{r}_*} = 1,3; \quad p = \alpha d \sim \frac{\sigma}{d^2}. \quad (12)$$

тут $d = 2R$ - діаметр гранул; α - коефіцієнт поглинання, що входить у загальний вид рівняння магнітофільтраційного очищення

$$\psi = \lambda [1 - \exp(-\alpha L)], \quad (13)$$

де ψ - показник (ефективність) очищення; λ - частка активної (ферромагнітної, ферримагнітної, антиферромагнітної) фракції домішок.

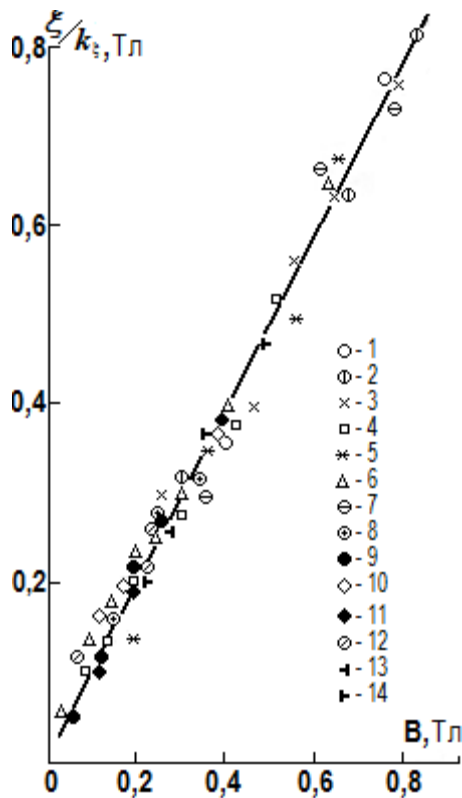


Рис. 2. Залежність відносного логарифмічного показника магнітофільтраційного очищення рідин і газів від середньої індукції в насадках для різних середовищ: 1...3 - рідкий аміак; 4 - газоподібний аміак; 5 - аміачна вода; 6 - пара; 7 - живильна вода енергоблоку ДРЕС; 8 - виробничий конденсат ТЕЦ; 9 - вода прокатного стану; 10 - водна суспензія домішок дренажного конденсату ДРЕС; 11 - те ж, АЕС; 12 - водна суспензія домішок рідкого аміаку з аміакопроводу; 13 - дренажний конденсат АЕС; 14 - турбінний конденсат ТЕЦ.

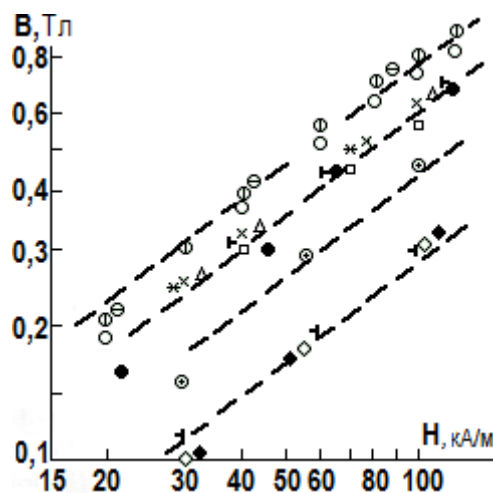


Рис. 3. Криві намагнічування насадок із кульок і стружки, що використувались при магнітофільтраційному очищенні рідин і газів. Позначення ті, що й на рис. 2.

Беручи до уваги (11) і (12), а також з огляду на роль щільності упаковки насадки γ , з точністю до узагальненого коефіцієнта a_n рівняння (13) записується у вигляді

$$\frac{\psi}{\lambda} = 1 - \exp\left(-\frac{a_n \kappa H^f \delta^2 \gamma L}{\eta v d^2}\right); \quad \xi = \alpha L = \frac{a_n \kappa H^f \delta^2 \gamma L}{\eta v d^2}, \quad (14)$$

де $\xi = -\ln(1 - \psi/\lambda)$ - логарифмічний показник очищення. Це рівняння узгоджується із експериментальними даними, у тому числі [2, 6] з даними по очищенню реальних і модельних середовищ як із використанням кульок, так і гранул більш складної форми у якості насадок.

Аналіз кривих намагнічування різноманітних насадок [2] в умовах, близьких до ідеальних, показав, що в діапазоні практичного використання магнітного поля $H=30\dots100$ кА/м ці криві майже степенні, тобто середня індукція поля в насадці $B \sim H^f$ з показником степені $f=0,6\dots0,9$, а для більшості насадок $f=0,7\dots0,8$. Приймаючи $f=0,75$, рівняння (14) можемо записати і у вигляді

$$\frac{\psi}{\lambda} = 1 - \exp\left(-\frac{a_b \kappa \delta^2 \gamma L}{\eta v d^2} B\right); \quad \xi = \alpha L = \frac{a_b \kappa \delta^2 \gamma L}{\eta v d^2} B = k_\xi B. \quad (15)$$

І дійсно, для більшості рідких і газоподібних середовищ при індивідуальних значеннях параметра k_ξ чітко простежується передбачувана рівнянням (15) зв'язок $\xi \sim B$ (рис. 2). Використані для переводу H в B відповідні криві намагнічування насадок показані на мал. 3, звідки видно, що в практичному діапазоні магнітного поля, для більшості насадок у реальних умовах намагнічування також $B \sim H^f$ при $f \cong 0,7\dots0,8$. Отже, параметр B у ряді випадків може виявитися більше кращим у порівнянні із параметром H , що традиційно використовується, особливо якщо має місце фактор розмагні-

чування насадки (як квазісуцільного тіла) при різній формі й геометрії насадки, особливостях її сполучення з елементами системи намагнічування очисного пристрою.

Література

1. Сандуляк А. В. Магнитная восприимчивость частиц, способных к магнитному осаждению // Магнит, гидродинамика. - 1986. - № 3. - С. 14 ... 18.
2. Сандуляк А. В. Очистка жидкостей в магнитном поле. - Львов, 1984. - 167 с.
3. Сандуляк А. В. Модель намагничивания пористой среды // Журн. техн. физики - 1982. - Т. 52, вып. 11. - С. 2267...2269.
4. Сандуляк А. В. Намагничивание цепочки шаров // Техн. электродинамика. - 1984. - № 5. - С. 108...111.
5. Волков В. И., Данилов И. С., Жак В. Д., Мухин В. А., Накоряков В. Е., Титков В. И., Томсонс Я. Я. Исследование гидродинамики пристенного слоя на модели кубической упаковки // Журн. прикл. механики и техн. физики. - 1980. - № 6. - С 58...64.
6. Сандуляк А. В. Физическая модель осаждения ферромагнитных частиц в намагниченной гранулированной среде // Докл. АН УССР. - 1983. - № 9. - С. 49...53.