



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 57236

(13) C2

(51) 7 B01D35/06

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

## (54) МАГНІТНИЙ ФІЛЬТР

1

2

(21) 2002043603

(22) 29.04.2002

(24) 15.11.2004

(46) 15.11.2004, Бюл. № 11, 2004 р.

(72) Горобець Світлана Василівна, Горобець Оксана Юріївна, Гойко Ірина Юріївна

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

(56) SU 1152618 A, 30.04.1985

SU 1181714 A, 30.09.1985

SU 1487944 A1, 23.06.1989

US 3979288, 07.09.1976

(57) 1. Магнітний фільтр, що складається з неферомагнітного корпусу, магнітної системи, системи насадок з феромагнітних елементів, патрубків вводу та виводу рідини, який відрізняється тим, що співвідношення між розміром окремого елемента феромагнітної насадки і характерним розміром домішки  $\frac{a}{b}$  визначають так, щоб для нього реалізувався максимум функції:

$$Z_{\text{lef}}\left(\frac{a}{b}\right) = Z_{\text{II}}\left(\frac{2\chi V_N M^2}{3\eta ab V_0}, H_0^*\right) - 1 - \frac{b}{a},$$

де

$a$  - радіус феромагнітної кульки - окремого елемента високоградієнтної феромагнітної насадки (ВГФН);

$b$  - радіус кульки, що моделює неферомагнітну домішку;

$\chi$  - різниця між магнітною сприйнятливостю неферомагнітної домішки та магнітною сприйнятливостю рідини;

$$V_N = \frac{4}{3} \pi b^3;$$

$M$  - намагніченість феромагнітної кульки;

$\eta$  - динамічна в'язкість рідини;

$V_0$  - швидкість рідини відносно феромагнітної кульки;

$$H_0^* = \frac{H_0}{M},$$

де  $H_0$  - величина зовнішнього магнітного поля, при цьому положення точки максимуму функції визначають стандартними засобами пакета MathCard, де зону захоплення феромагнітною кулькою неферомагнітних частинок  $Z_{\text{II}}(C^*, H_0^*)$  визначають за

формулою:

$$Z_{\text{II}}(C^*, H_0^*) = A_0(H_0^*)C^* + A_1(H_0^*)C^{*2} + A_2(H_0^*)C^{*3} + A_3(H_0^*)C^{*4} + A_4(H_0^*)C^{*5} + A_5(H_0^*)C^{*6} + A_6(H_0^*)C^{*7} + A_7(H_0^*)C^{*8} + A_8(H_0^*)C^{*9} + A_9(H_0^*),$$

де

$Z_{\text{II}}$  - максимальна відстань в радіусах феромагнітної кульки від феромагнітної кульки площини, що перпендикулярна швидкості потоку рідини, з якої відбувається захоплення неферомагнітної домішки радіуса  $b$ , сприйнятливості  $\chi_b$ ;

$$C^* = \frac{2\chi V_N M^2}{3\eta ab V_0};$$

$$A_0(H_0^*) = pu_{10}H_0^* + pu_{11}H_0^{*2} + pu_{12}H_0^{*3} + pu_{13}$$

$$A_1(H_0^*) = pu_{20}H_0^* + pu_{21}H_0^{*2} + pu_{22}H_0^{*3} + pu_{23}$$

$$A_2(H_0^*) = pu_{30}H_0^* + pu_{31}H_0^{*2} + pu_{32}H_0^{*3} + pu_{33}$$

$$A_3(H_0^*) = pu_{40}H_0^* + pu_{41}H_0^{*2} + pu_{42}H_0^{*3} + pu_{43}$$

$$A_4(H_0^*) = pu_{50}H_0^* + pu_{51}H_0^{*2} + pu_{52}H_0^{*3} + pu_{53}$$

$$A_5(H_0^*) = pu_{60}H_0^* + pu_{61}H_0^{*2} + pu_{62}H_0^{*3} + pu_{63}$$

$$A_6(H_0^*) = pu_{70}H_0^* + pu_{71}H_0^{*2} + pu_{72}H_0^{*3} + pu_{73}$$

$$A_7(H_0^*) = pu_{80}H_0^* + pu_{81}H_0^{*2} + pu_{82}H_0^{*3} + pu_{83}$$

$$A_8(H_0^*) = pu_{90}H_0^* + pu_{91}H_0^{*2} + pu_{92}H_0^{*3} + pu_{93}$$

$$A_9(H_0^*) = pu_{100}H_0^* + pu_{101}H_0^{*2} + pu_{102}H_0^{*3} + pu_{103},$$

де

$$pu_{10}=0,030909657660937$$

$$pu_{11}=-5,409554764571022 \cdot 10^{-3}$$

$$pu_{12}=3,86619966686323 \cdot 10^{-4}$$

$$pu_{13}=0,030609012808387$$

$$pu_{30}=3,479824759909472 \cdot 10^{-6}$$

$$pu_{31}=-2,491520106838097 \cdot 10^{-7}$$

$$pu_{32}=-6,648752188130824 \cdot 10^{-9}$$

$$pu_{33}=5,377238958105615 \cdot 10^{-6}$$

$$pu_{50}=7,267561216312051 \cdot 10^{-11}$$

$$pu_{51}=2,022125800484876 \cdot 10^{-12}$$

$$pu_{52}=-5,822392330004314 \cdot 10^{-13}$$

$$pu_{53}=1,329638535641589 \cdot 10^{-10}$$

$$pu_{70}=2,374010119642177 \cdot 10^{-16}$$

$$pu_{71}=1,322392901764604 \cdot 10^{-18}$$

$$pu_{72}=-2,638208144288545 \cdot 10^{-18}$$

$$pu_{73}=4,69470068179731 \cdot 10^{-16}$$

$$pu_{90}=6,279719285135385 \cdot 10^{-23}$$

$$pu_{91}=4,785861059632438 \cdot 10^{-25}$$

$$pu_{92}=-8,133217084567022 \cdot 10^{-25}$$

$$pu_{93}=1,297408856510724 \cdot 10^{-22}$$

$$pu_{20}=-3,900177464848975 \cdot 10^{-4}$$

$$pu_{21}=4,352841492281859 \cdot 10^{-5}$$

$$pu_{22}=-1,430328514108652 \cdot 10^{-6}$$

$$pu_{23}=-5,068570094437011 \cdot 10^{-4}$$

$$pu_{40}=-1,990862114589314 \cdot 10^{-8}$$

$$pu_{41}=9,076747226066478 \cdot 10^{-10}$$

$$pu_{42}=1,102024286952273 \cdot 10^{-8}$$

$$pu_{43}=3,41003709429413 \cdot 10^{-8}$$

$$pu_{60}=-1,679719265895669 \cdot 10^{-13}$$

$$pu_{61}=2,53402095250826 \cdot 10^{-15}$$

$$pu_{62}=1,643881474536881 \cdot 10^{-15}$$

$$pu_{63}=-3,215063293748762 \cdot 10^{-13}$$

$$pu_{80}=-1,869591188490307 \cdot 10^{-19}$$

$$pu_{81}=-3,332129843276179 \cdot 10^{-22}$$

$$pu_{82}=2,269255228110903 \cdot 10^{-21}$$

$$pu_{83}=-3,789278544607901 \cdot 10^{-19}$$

$$pu_{100}=0,10723240954763$$

$$pu_{101}=0,081338667379587$$

$$pu_{102}=-8,73204571491892 \cdot 10^{-3}$$

$$pu_{103}=1,957540057113072.$$

2. Магнітний фільтр по п.1, який відрізняється

(13) C2

(11) 57236

(19) UA

тим, що система насадок з феромагнітних елементів розташована пошарово, а кількість прошарків феромагнітних гранул в системі насадок, необхідну для забезпечення заданої тонкості очистки, визначають за формулою:

$$n = 1 + \text{trunc} \left( \frac{\ln(1-P)}{\ln(1-p)} \right),$$

де  $\text{trunc}$  - функція, що повертає цілу частину чис-

ла;

$P$  - тонкість очистки в долях одиниці;

$$p = \frac{\pi Z_{II}^2}{A_0^2};$$

$A_0$  - відстань між окремими елементами насадки в прошарку в радіусах феромагнітної кульки.

Винахід відноситься до області одержання фільтрів для очищення робочих середовищ у магнітному полі та може використовуватись для очищення води від феромагнітних домішок у харчовій промисловості і дозволяє підвищити ефективність процесу очищення.

Відомі магнітні фільтри, які містять магнітну систему, феромагнітну насадку, розміщену в неферомагнітному корпусі і виконану у вигляді феромагнітних пластин з отворами [В.И. Гаращенко, А.В. Сандуляк, И.В. Волков. Магнитный железоотделитель. Ас. СССР №1152618, кл. B01D 35/06; C02F 1/48, Бюл. №16, 1985] або феромагнітних дисків з отворами [Нестерчук А.Р. Магнитный фильтр. Ас. СССР №1286246, кл. B01D 35/06, Бюл. №4, 1987].

Недоліком цих фільтрів є низька якість очищення через порівняно велику пористість фільтруючої насадки.

Відомо магнітний фільтр [Лозин И.Б., Сандуляк А.В. Магнитный фракционный фильтр-осадитель. Ас. СССР №1487944, кл. B01D 35/06, Бюл.23, 1989], який має феромагнітну насадку, виконану у вигляді шарів з феромагнітного матеріалу.

Цей фільтр має такий же недолік, що і приведений вище аналог.

В основу винаходу поставлена задача створення магнітного фільтру підвищеної продуктивності та ефективності процесу очищення шляхом розроблення засобів формування насадок, які дозволяють формувати насадки для магнітних фільтрів (сепараторів) із необхідними для конкретних умов очищення (сепарації) вимогами і можливостями по пропускній спроможності, тонкості очищення, ємності фільтра, магнітній сприйнятливості домішок, що уловлюються, величині зовнішнього магнітного поля і т.д.

Поставлена задача вирішується тим, що співвідношення між розміром окремого елемента феромагнітної насадки і характерним розміром домі-

шки  $\frac{a}{b}$ , визначають так, щоб для нього реалізувався максимум функції:

$$Z_{I\text{lef}} \left( \frac{a}{b} \right) = Z_{II} \left( \frac{2\chi_N M^2}{3\eta a b V_0}, H_0^* \right) - 1 - \frac{b}{a},$$

де  $a$  – радіус феромагнітної кульки – окремого елемента високоградієнтної феромагнітної насадки (ВГФН);

$b$  – радіус кульки, що моделює парамагнітну домішку;

$\chi$  – різниця між магнітною сприйнятливістю парамагнітної домішки та магнітною сприйнятливістю рідини

$$V_N = \frac{4}{3} \pi b^3$$

$M$  – намагніченість феромагнітної кульки;

$\eta$  – динамічна в'язкість рідини;

$V_0$  – швидкість рідини відносно феромагнітної кульки;

$$H_0^* = \frac{H_0}{M},$$

де  $H_0$  – величина зовнішнього магнітного поля.

Положення точки максимуму визначається стандартними засобами пакета MathCard. Зона захвату  $Z_{II}(C^*, H_0^*)$  визначається за формулою:

$$Z_{II}(C^*, H_0^*) = A_0(H_0^*)C^* + A_1(H_0^*)C^{*2} + A_2(H_0^*)C^{*3} + A_3(H_0^*)C^{*4} + A_4(H_0^*)C^{*5} + A_5(H_0^*)C^{*6} + A_6(H_0^*)C^{*7} + A_7(H_0^*)C^{*8} + A_8(H_0^*)C^{*9} + A_9(H_0^*),$$

де  $Z_{II}$  – максимальна відстань в одиницях  $a$  від уловлюючої феромагнітної кульки радіусу  $a$  площині, що перпендикулярна швидкості рідини, з якої відбувається захоплення слабомагнітної домішки радіусу  $b$ , сприйнятливості  $\chi_b$

$$C^* = \frac{2\chi_N M^2}{3\eta a b V_0}$$

$$A_0(H_0^*) = \rho u_{10} H_0^{*2} + \rho u_{11} H_0^{*2} + \rho u_{12} H_0^{*3} + \rho u_{13},$$

$$A_1(H_0^*) = \rho u_{20} H_0^* + \rho u_{21} H_0^{*2} + \rho u_{22} H_0^{*3} + \rho u_{23}$$

$$A_2(H_0^*) = \rho u_{30} H_0^* + \rho u_{31} H_0^{*2} + \rho u_{32} H_0^{*3} + \rho u_{33}$$

$$A_3(H_0^*) = \rho u_{40} H_0^* + \rho u_{41} H_0^{*2} + \rho u_{42} H_0^{*3} + \rho u_{43}$$

$$A_4(H_0^*) = \rho u_{50} H_0^* + \rho u_{51} H_0^{*2} + \rho u_{52} H_0^{*3} + \rho u_{53}$$

$$A_5(H_0^*) = \rho u_{60} H_0^* + \rho u_{61} H_0^{*2} + \rho u_{62} H_0^{*3} + \rho u_{63},$$

$$A_6(H_0^*) = \rho u_{70} H_0^* + \rho u_{71} H_0^{*2} + \rho u_{72} H_0^{*3} + \rho u_{73}$$

$$A_7(H_0^*) = \rho u_{80} H_0^* + \rho u_{81} H_0^{*2} + \rho u_{82} H_0^{*3} + \rho u_{83}$$

$$A_8(H_0^*) = \rho u_{90} H_0^* + \rho u_{91} H_0^{*2} + \rho u_{92} H_0^{*3} + \rho u_{93}$$

$$A_9(H_0^*) = \rho u_{100} H_0^* + \rho u_{101} H_0^{*2} + \rho u_{102} H_0^{*3} + 103, \text{ де}$$

$$\rho u_{10} = 0,030909657660937$$

$$\rho u_{11} = -5,409554764571022 \cdot 10^{-3}$$

$$\rho u_{12} = -3,86619966686323 \cdot 10^{-4}$$

$$\rho u_{13} = 0,030609012808387$$

$$\rho u_{20} = -3,900177464848975 \cdot 10^{-4}$$

$$\rho u_{21} = 4,352841492281859 \cdot 10^{-5}$$

$$\rho u_{22} = -1,430328514108652 \cdot 10^{-6}$$

$$\rho u_{23} = -5,068570094437011 \cdot 10^{-4}$$

$$\begin{aligned} \text{pu3}_0 &= 3,479824759909472 \cdot 10^{-6} \\ \text{pu3}_1 &= -2,491520106838097 \cdot 10^{-7} \\ \text{pu3}_2 &= -6,648752188130824 \cdot 10^{-9} \\ \text{pu3}_3 &= 5,377238958105615 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{pu5}_0 &= 7,267561216312051 \cdot 10^{-11} \\ \text{pu5}_1 &= -2,022125800484876 \cdot 10^{-12} \\ \text{pu5}_2 &= -5,822392330004314 \cdot 10^{-13} \\ \text{pu5}_3 &= 1,329638535641589 \cdot 10^{-10} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{pu7}_0 &= 2,374010119642177 \cdot 10^{-16} \\ \text{pu7}_1 &= 1,322392901764604 \cdot 10^{-18} \\ \text{pu7}_2 &= -2,638208144288545 \cdot 10^{-18} \\ \text{pu7}_3 &= 4,69470068179731 \cdot 10^{-16} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{pu9}_0 &= 6,279719285135385 \cdot 10^{-23} \\ \text{pu9}_1 &= 4,785861059632438 \cdot 10^{-25} \\ \text{pu9}_2 &= -8,133217084567022 \cdot 10^{-25} \\ \text{pu9}_3 &= 1,297408856510724 \cdot 10^{-22} \end{aligned}$$

Система насадок розташована пошарово, а розрахунок числа прошарків, що необхідне для забезпечення заданої тонкості очистки вираховується за формулою:

$$n = 1 + \text{trunc} \left( \frac{\ln(1-P)}{\ln(1-p)} \right),$$

де trunc – функція, що повертає цілу частину числа,

P – задана тонкість очистки в долях одиниці

$$p = \frac{\pi Z_{//}^2}{A_0^2},$$

де  $A_0$  – відстань між окремими елементами насадки в одиницях а.

Причинно-наслідковий зв'язок між запропонованими ознаками та очікуваним технічним результатом буде такий.

Для вибору відстаней між окремими елементами ВГФН та оптимального співвідношення між розміром окремого елемента ВГФН і дисперсністю домішки визначаємо зону захоплення парамагнітних домішок феромагнітною кулькою.

Як відомо, у зовнішньому магнітному полі феромагнітна кулька створює дипольне високоградієнтне поле. У результаті на пара- або діамагнітну частинку, поміщену в розчин рідини в околі феромагнітної кульки діє сила  $\vec{F} = \frac{1}{2} \cdot \chi \cdot V_N \cdot \text{grad} \vec{H}^2$ ,

обумовлена градієнтним магнітним полем, і ця сила врівноважується силою Стокса  $\vec{F} = -6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot b \cdot (\vec{v} - \vec{v}_0)$  при переміщенні сферичної неферомагнітної частинки у в'язкій рідині зі швидкістю  $\vec{v}$ . Тут  $\vec{H}$  – векторна сума однорідного зовнішнього поля  $\vec{H}_0$  і  $\vec{H}_d$  дипольного градієнтного поля, створеного феромагнітною кулькою, поміщеною у зовнішнє однорідне магнітне поле,  $\vec{v}_0$  – вектор швидкості рідини відносно феромагнітної кульки.

Таким чином, неферомагнітна частинка, зв'язана в рідині, притягається до феромагнітної кульки, яка поміщена у зовнішнє магнітне поле. У результаті, неферомагнітна частинка осаджується на поверхню феромагнітної кульки. Визначимо зону захоплення як максимальну область в площині, перпендикулярній швидкості рідини відносно феромагнітної кульки, із якої відбувається захоплення слабوماгнітної домішки феромагнітною

$$\begin{aligned} \text{pu4}_0 &= -1,990862114589314 \cdot 10^{-8} \\ \text{pu4}_1 &= 9,076747226066478 \cdot 10^{-10} \\ \text{pu4}_2 &= 1,102024286952273 \cdot 10^{-10} \\ \text{pu4}_3 &= -3,4100370942941310 \cdot 10^{-8} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{pu6}_0 &= -1,679719265895669 \cdot 10^{-13} \\ \text{pu6}_1 &= 2,5340209525082610 \cdot 10^{-15} \\ \text{pu6}_2 &= 1,643881474536881 \cdot 10^{-15} \\ \text{pu6}_3 &= -3,21506329374876210 \cdot 10^{-13} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{pu8}_0 &= -1,86959118849030710 \cdot 10^{-19} \\ \text{pu8}_1 &= -3,332129843276179 \cdot 10^{-22} \\ \text{pu8}_2 &= 2,269255228110903 \cdot 10^{-21} \\ \text{pu8}_3 &= -3,789278544607901 \cdot 10^{-19} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{pu10}_0 &= -0,10723240954763 \\ \text{pu10}_1 &= 0,081338667379587 \\ \text{pu10}_2 &= -8,73204571491892 \cdot 10^{-3} \\ \text{pu10}_3 &= 1,957540057113072 \end{aligned}$$

кулькою. У загальному випадку зона захоплення залежить від радіуса неферомагнітної частинки, радіуса і намагніченості феромагнітної кульки, зовнішнього магнітного поля, в'язкості рідини, швидкості рідини і різниці  $\chi$  між магнітною сприйнятливістю неферомагнітної частинки і рідини.

З рівності сили з боку градієнтного магнітного поля силі Стокса випливає таке рівняння:

$$\vec{v} = C \cdot \text{grad} \vec{H}^2 + \vec{v}_0 \quad (1)$$

$$\text{де } C = \frac{\chi \cdot V_N}{12 \cdot \pi \cdot \eta \cdot b}, \quad (2)$$

Тоді записавши систему (1) в безрозмірному вигляді, маємо:

$$\vec{v}^* = C^* \cdot \text{grad}^* (\vec{H}^*)^2 + \vec{1}, \quad (3)$$

$$\text{Де } \vec{v}^* = \frac{\vec{v}}{v_0}, \vec{r}^* = \frac{\vec{r}}{a}, C^* = \frac{2 \cdot \chi \cdot V_N \cdot M^2}{3 \cdot \eta \cdot a \cdot b \cdot v_0}, \vec{1} = (0, 0, 1).$$

У випадку, коли швидкість потоку рідини паралельна зовнішньому магнітному полю градієнт квадрата магнітного поля записується в безрозмірних одиницях у такому вигляді:

$$\text{grad}^* (\vec{H}^*)^2 \cdot \vec{e}_x = \frac{x^*}{r^{*5}} \cdot \left( -\frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \left( \frac{4 \cdot z^{*2}}{r^{*5}} + \frac{1}{r^{*3}} \right) - \frac{5 \cdot H_0^* \cdot z^{*2}}{r^{*2}} + H_0^* \right),$$

$$\text{grad}^* (\vec{H}^*)^2 \cdot \vec{e}_z = \frac{z^*}{r^{*5}} \cdot \left( -\frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \frac{4 \cdot z^{*2}}{r^{*5}} - \frac{5 \cdot H_0^* \cdot z^{*2}}{r^{*2}} + 3 \cdot H_0^* \right)$$

тут  $\vec{e}_x$ ,  $\vec{e}_z$  – орти осі OX і OZ відповідно,

$$x^* = \frac{x}{a}, z^* = \frac{z}{a},$$

$$H_0^* = \frac{H_0}{M} \quad (4)$$

Система координат обрана так, що зовнішнє магнітне поле і швидкість рідини направлені уздовж осі OZ, причому, з огляду на циліндричну симетрію задачі, рух неферомагнітної частинки розглядається в площині XZ. Таким чином, у безрозмірній задачі зона захоплення  $Z_{//}$  неферомагнітних частинок феромагнітною залежить від двох безрозмірних параметрів  $C^*$  і  $H_0^*$ . Графік залежності  $Z_{//}$  в одиницях A від  $C^*$  для різноманітних значень безрозмірного параметра  $H_0^*$  зображено на Фіг. 1. Крива 1 відповідає  $H_0^* = 0,3$ , крива 2 –  $H_0^* = 0,5$ , крива 3 –  $H_0^* = 1$ , крива 4 –  $H_0^* = 3$ , крива 5 –  $H_0^* = 5$ .

У площині XY, перпендикулярній швидкості потоку рідини зона захоплення являє собою коло радіуса  $Z_{//}$ , через циліндричну симетрію. На Фіг. 2 показана зона захоплення в площині XY, перпендикулярній швидкості потоку рідини і зовнішнього магнітного поля.

На інтервалі значень  $C^*$  від 2 до 600 і  $H_0^*$  від 0,3 до 5 функція  $Z_{//}(C^*, H_0^*)$  з достатнім ступенем точності наближається аналітичною формулою:

$$Z_{//}(C^*, H_0^*) = A_0(H_0^*)C^* + A_1(H_0^*)C^{*2} + A_2(H_0^*)C^{*3} + A_3(H_0^*)C^{*4} +$$

$$A_4(H_0^*)C^{*4} + A_5(H_0^*)C^{*6} + A_6(H_0^*)C^{*7} + A_7(H_0^*)C^{*8} + A_8(H_0^*)C^{*9} + A_9(H_0^*),$$

де

$$A_0(H_0^*) = pu_{10}H_0^* + pu_{11}H_0^{*2} + pu_{12}H_0^{*3} + pu_{13},$$

$$A_1(H_0^*) = pu_{20}H_0^* + pu_{21}H_0^{*2} + pu_{22}H_0^{*3} + pu_{23}$$

$$A_2(H_0^*) = pu_{30}H_0^* + pu_{31}H_0^{*2} + pu_{32}H_0^{*3} + pu_{33}$$

$$A_3(H_0^*) = pu_{40}H_0^* + pu_{41}H_0^{*2} + pu_{42}H_0^{*3} + pu_{43}$$

$$A_4(H_0^*) = pu_{50}H_0^* + pu_{51}H_0^{*2} + pu_{52}H_0^{*3} + pu_{53}$$

$$A_5(H_0^*) = pu_{60}H_0^* + pu_{61}H_0^{*2} + pu_{62}H_0^{*3} + pu_{63},$$

$$A_6(H_0^*) = pu_{70}H_0^* + pu_{71}H_0^{*2} + pu_{72}H_0^{*3} + pu_{73}$$

$$A_7(H_0^*) = pu_{80}H_0^* + pu_{81}H_0^{*2} + pu_{82}H_0^{*3} + pu_{83}$$

$$A_8(H_0^*) = pu_{90}H_0^* + pu_{91}H_0^{*2} + pu_{92}H_0^{*3} + pu_{93}$$

$$A_9(H_0^*) = pu_{100}H_0^* + pu_{101}H_0^{*2} + pu_{102}H_0^{*3} + 10_{33}, \text{ де}$$

$$\begin{aligned} pu_{10} &= 0,030909657660937 & pu_{20} &= -3,900177464848975 \cdot 10^{-4} \\ pu_{11} &= -5,409554764571022 \cdot 10^{-3} & pu_{21} &= 4,352841492281859 \cdot 10^{-5} \\ pu_{12} &= -3,86619966686323 \cdot 10^{-4} & pu_{22} &= -1,430328514108652 \cdot 10^{-6} \\ pu_{13} &= 0,030609012808387 & pu_{23} &= -5,068570094437011 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} pu_{30} &= 3,479824759909472 \cdot 10^{-6} & pu_{40} &= -1,990862114589314 \cdot 10^{-8} \\ pu_{31} &= -2,491520106838097 \cdot 10^{-7} & pu_{41} &= 9,076747226066478 \cdot 10^{-10} \\ pu_{32} &= -6,648752188130824 \cdot 10^{-9} & pu_{42} &= 1,102024286952273 \cdot 10^{-10} \\ pu_{33} &= 3,577238958105615 \cdot 10^{-6} & pu_{43} &= -3,41003709429413 \cdot 10^{-8} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} pu_{50} &= 7,267561216312051 \cdot 10^{-11} & pu_{60} &= -1,679719265895669 \cdot 10^{-13} \\ pu_{51} &= -2,022125800484876 \cdot 10^{-12} & pu_{61} &= -2,53402095250826 \cdot 10^{-15} \\ pu_{52} &= -5,822392330004314 \cdot 10^{-13} & pu_{62} &= 1,643881474536881 \cdot 10^{-15} \\ pu_{53} &= 1,329638535641589 \cdot 10^{-10} & pu_{63} &= -3,215063293748762 \cdot 10^{-13} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} pu_{70} &= 2,374010119642177 \cdot 10^{-16} & pu_{80} &= -1,869591188490307 \cdot 10^{-19} \\ pu_{71} &= 1,322392901764604 \cdot 10^{-18} & pu_{81} &= -3,332129843276179 \cdot 10^{-22} \\ pu_{72} &= 2,638208144288545 \cdot 10^{-18} & pu_{82} &= 2,269255228110903 \cdot 10^{-21} \\ pu_{73} &= 4,69470068179731 \cdot 10^{-16} & pu_{83} &= -3,789278544607901 \cdot 10^{-19} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} pu_{90} &= 6,279719285135385 \cdot 10^{-23} & pu_{100} &= 0,10723240954763 \\ pu_{91} &= 4,785861059632438 \cdot 10^{-25} & pu_{101} &= 0,081338667379587 \\ pu_{92} &= -8,133217084567022 \cdot 10^{-25} & pu_{102} &= -8,73204571491892 \cdot 10^{-3} \\ pu_{93} &= 1,297408856510724 \cdot 10^{-22} & pu_{103} &= 1,957540057113072 \end{aligned}$$

У випадку, коли швидкість потоку рідини перпендикулярна зовнішньому магнітному полю градієнт квадрата магнітного поля записується в безрозмірних одиницях у такому виді:

$$\text{grad}^*(\vec{H}^*)^2 \cdot \vec{e}_z = \frac{z^*}{r^{*5}} \cdot \left( -\frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \left( \frac{4 \cdot x^{*2}}{r^{*5}} + \frac{1}{r^{*3}} \right) - \frac{5 \cdot H_0^* \cdot x^{*2}}{r^{*2}} + H_0^* \right),$$

$$\text{grad}^*(\vec{H}^*)^2 \cdot \vec{e}_y = \frac{y^*}{r^{*5}} \cdot \left( -\frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \left( \frac{4 \cdot x^{*2}}{r^{*5}} + \frac{1}{r^{*3}} \right) - \frac{5 \cdot H_0^* \cdot x^{*2}}{r^{*2}} + H_0^* \right),$$

$$\text{grad}^*(\vec{H}^*)^2 \cdot \vec{e}_x = \frac{x^*}{r^{*5}} \cdot \left( -\frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \frac{4 \cdot x^{*2}}{r^{*5}} - \frac{5 \cdot H_0^* \cdot x^{*2}}{r^{*2}} + 3 \cdot H_0^* \right),$$

тут  $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$  – орти осі OX, OY і OZ відповідно,

$$\text{дно}, x^* = \frac{x}{a}, y^* = \frac{y}{a}, z^* = \frac{z}{a}.$$

На Фіг. 3 показана зона захоплення в площині XY, перпендикулярної швидкості потоку рідини. Зовнішнє магнітне поле направлено уздовж осі OX. Система координат обрана так, що зовнішнє магнітне поле направлено уздовж осі OX і швидкість рідини направлена уздовж осі OZ.

Чисельно розрахована залежність максимального розміру зони захоплення X (у напрямку осі OX

у площині XY див. Фіг. 3) від  $C^*$  для різних значень безрозмірного параметра  $H_0^*$  зображена на Фіг. 4.

Крива 1 відповідає  $H_0^* = 0.3$ , крива 2 –  $H_0^* = 0.5$ , крива 3 –  $H_0^* = 1$ , крива 4 –  $H_0^* = 3$ , крива 5 –  $H_0^* = 5$ .

Принцип розрахунку площі зон захоплення в площині XY у випадках, коли швидкість потоку рідини паралельна і перпендикулярна зовнішньому магнітному полю полягає у наступному. Для випадку, коли зовнішнє магнітне поле направлено уздовж швидкості потоку рідини (далі для стислості – при паралельній геометрії), очевидно, що площа зони захоплення  $S_{//}$  в площині XY обчислюється по формулі:

$$S_{//} = \pi(Z_{//})^2 \quad (5)$$

Якщо ж зовнішнє магнітне поле перпендикулярне швидкості потоку рідини (далі – при перпендикулярній геометрії), то площа зони захоплення  $S_{\perp}$  в площині XY обчислюється чисельно за результатами розв'язку рівняння (1) для розміру зони захоплення  $Z_{\perp}$  в різних напрямках радіус-вектора в площині XY. Наприклад, для  $H_0^* = 0.3$  у діапазоні зміни безрозмірного параметра  $C^*$  від 10 до 2000 площа зони захоплення при перпендикулярній геометрії від 1% до 10% більше, чим площа зони захоплення при паралельній геометрії. Графік залежності пощади зони захоплення в безрозмірних одиницях від параметра  $C^*$  для  $H_0^* = 0.3$  представлено на Фіг. 5. Крива 1 відповідає рівнобіжної геометрії, крива 2 – перпендикулярної геометрії.

Тому перпендикулярна геометрія є на 1-10% вигідніше, ніж паралельна в даному діапазоні зміни параметрів. Розрахунок площі зони захоплення значно простіше робити у випадку, коли швидкість рідини паралельна зовнішньому магнітному полю. Тому, приймаючи до уваги незначну відмінність площ зон захоплення в паралельній і перпендикулярній геометріях, можна брати для розрахунків формули, що стосуються паралельної геометрії.

Для вибору оптимальних співвідношень розмірів окремих елементів ВГФН і дисперсності домішок, які уловлюються, зроблено теоретичні й експериментальні роботи, які показали, що при  $a < b$  ефективна область уловлювання різко зменшується. Залежність ефективної області уловлювання від відношення  $\frac{a}{b}$  – показана на Фіг. 6.

При  $a = a_1 > b$  досягається максимум ефективної області уловлювання. При  $a > b$  ефективна область повільно зменшується в околі максимуму в залежності від відношення  $\frac{a}{b}$ . При цьому, чим менше дисперсність або сприйнятливості, домішок, що уловлюються, тим повільніше зменшується ефективна область уловлювання. Причому, положення максимуму зміщується у бік більшого співвідношення – для часток із меншою дисперсністю або (що те ж саме) із меншою магнітною сприйнятливостю. Залежність значення  $\frac{a}{b}$ , при якому реалізується максимум функції  $Z_{//\text{ef}}$  від сприйнятливості

представлено на Фіг. 7.

Тому для кожного з випадків необхідно обчислювати оптимальне співвідношення  $a$  і  $b$ , при якому досягається максимум функції:

$$Z_{\text{Ilef}}\left(\frac{a}{b}\right) = Z_{\text{II}}\left(\frac{2\chi V_N M^2}{3\eta ab V_0}, H_0^*\right) - 1 - \frac{b}{a}, \quad (6)$$

де положення точки максимуму знаходиться стандартними засобами пакета MathCard.

Оскільки реальні домішки мають розподіл по дисперсності, то доцільно визначати по формулі (6) оптимальні значення, а для мінімального і максимального значень радіуса домішки  $b$  для того, щоб для уловлювання найбільш дрібнодисперсної фракції домішок формувати ВГФН із меншими розмірами окремого елемента, чим для уловлювання домішок більших розмірів, тобто щоб формувати ВГФН, що має два або більше рівні очищення. Весь наступний алгоритм розрахунку буде викладатися для деякого довільного рівня.

Аналіз експериментальних результатів по розміру кластерів, уловлених феромагнітною кулькою, показав залежності аналогічні тим, що вище приведені для ефективних зон захоплення. Оскільки максимальність відношення об'єму уловлених домішок до об'єму феромагнітної кульки добре корелює із максимальною ефективною зоною уловлювання, розрахованої по формулі (6).

Нехай  $A_0$  – відстань між окремими елементами ВГФН при розташуванні окремих елементів у вузлах квадратної ґратки в радіусах окремого елемента.

Тоді, якщо  $Z_{\text{II}}$  набагато більше або близько 2, то доцільно вибирати  $A_0 = Z_{\text{II}}/\sqrt{2}$ . Якщо  $Z_{\text{II}} \leq 1$ , то доцільно вибирати  $A_0$  близько 3-4, або більше (щоб відстань між поверхнями окремих елементів ВГФН були близько одного радіуса феромагнітної кульки) для запобігання занадто великих втрат напорів в насадці.)

Для розрахунку числа прошарків, необхідних для забезпечення заданої тонкості очищення, треба знайти зв'язок тонкості очищення ВГФН та площі зони захоплення однієї феромагнітної кульки.

На Фіг. 8 представлена ВГФН, загальний вигляд;

ВГФН складається з корпусу 1, виконаного з неферомагнітного матеріалу, магнітної системи 2, системи феромагнітних кульок 3, які можуть бути жорстко закріплені у неферомагнітному корпусі паралельно зовнішньому магнітному полю, патрубків вводу 4 та виводу 5. Система феромагнітних кульок 3 складається з послідовно розташованих прошарків, кожний із яких являє собою квадратну ґратку феромагнітних кульок однакового діаметра, період ґратки  $A_0$  (у безрозмірних одиницях).

У випадку, коли  $Z_{\text{II}}$  багато більше або близько 2, і  $A_0 = Z_{\text{II}}/\sqrt{2}$ , достатньо одного прошарку феромагнітних кульок, щоб будь-яка слабимагнітна частка, що проходить через ВГФН, потрапила в область дії магнітних сил і була уловлена ВГФН. У цьому випадку кількість прошарків повинна вибиратися виходячи з вимог по ємності фільтра.

Роздивимося тепер випадок дуже дрібнодис-

перних домішок або дуже слабимагнітних, коли  $Z_{\text{II}} \leq 1$ ,  $A_0 = 4$ .

Можливість захоплення  $p$  парамагнітної домішки одним елементом ґратки в цьому випадку дорівнює:

$$p = \frac{S}{(A_0)^2},$$

де  $S$  – площа зони захоплення в безрозмірних одиницях в одній з геометрій (паралельній або перпендикулярній). Неважко одержати можливість захоплення  $P$  парамагнітної домішки  $n$  прошарками ґратки:

$$P = \left[1 - (1-p)^n\right] \quad (7)$$

$P$  – це фактично відсоток уловлених парамагнітних домішок – тонкості очищення (у долях одиниці). Знаючи  $P$  можна визначити необхідну кількість прошарків ґратки у ВГФН магнітного фільтра по формулі:

$$n = 1 + \text{trunc}\left(\frac{\ln(1-P)}{\ln(1-p)}\right), \quad (8)$$

де  $\text{trunc}$  – функція, що повертає цілу частину числа. Наприклад, якщо уловлюється домішка –

гадоліній із сприйнятливістю  $\chi = 135 \cdot 10^{-6}$ , зовнішнє магнітне поле 2000Е намагнічує залізну кульку до насичення, швидкість потоку рідини 0.02 см/с,  $A = 50 \cdot 10^{-4}$  см,  $B = 5 \cdot 10^{-4}$  см, в'язкість рідини 0.2 Ст,  $A_0 = 1000$  А,  $P = 0.95$ , то в результаті розрахунку по формулі (8) при паралельній геометрії  $n = 6$  прошарків ґратки у складі ВГФН.

Даний приклад ілюструє той факт, що можна вибрати  $A_0$  достатньо великим, щоб зменшити до необхідного значення гідравлічний опір. При цьому, знаючи зовнішнє магнітне поле, сприйнятливість і дисперсність домішок, що уловлюються, радіус феромагнітних кульок, швидкість і в'язкість рідини, можна розрахувати по формулі (8) кількість прошарків ґратки феромагнітних кульок у складі ВГФН, що забезпечить уловлювання магнітним фільтром заданого відсотка парамагнітних домішок.

Для забезпечення необхідної ємності фільтра проводимо оцінку числа прошарків ґратки окремих елементів ВГФН.

Введемо позначення

$$\Phi = \frac{\pi}{2} - \theta$$

$$\Phi_0 = \frac{\pi}{2} - \theta_0$$

де  $\theta_0$  – мінімальний кут між радіус-вектором точки осадження моношару парамагнітних домішок та віссю ОХ;

$\theta$  – кут між радіус-вектором домішки, що уловилась на поверхні кластеру в площині ZX, та віссю ОХ. Тут вибрана така система координат, що вісь ОZ спрямована вздовж зовнішнього магнітного поля та швидкості рідини, причому початок координат розташований в центрі феромагнітної кульки з кластером уловлених домішок.

Тоді на основі формули, отриманої в роботі [Горобець С.В. Формування кластерів уловлених феромагнітною насадкою парамагнітних домішок у

магнітному полі. Прогрессивные технологии и системы машиностроения. / Международный сборник научных трудов. - Вып.7. - 1999. - С. 47-49) форми кластеру уловлених домішок окремим елементом ВГФН сферичної форми, відношення об'єму уловлених домішок до об'єму феромагнітної кульки буде виражатися по формулі:

$$V = \left\{ - \int_{\Phi_0}^0 \pi e^{3k(\Phi_0 - \Phi)} \sin^2 \Phi (k \cos \Phi + \sin \Phi) d\Phi - \int_{\cos \Phi_0}^1 \pi (1 - Z^2) dZ \right\} \frac{3}{4\pi} \quad (9)$$

де  $k$  – коефіцієнт тертя

$\Phi_0 = (C^*, H_0^*)$  – кут осадження моношару домішок на феромагнітну кульку обчислюється по формулі (1).

При отриманні формули (9) враховано, що кластер, уловлених домішок на ВГФН є фігурою обертання.

У цьому випадку графік функції  $V\left(\frac{a}{b}\right)$  має ви-

гляд представлений на Фіг. 9, де залежність відношення об'єму уловлених домішок до об'єму феромагнітної кульки (окремого елемента ВГФН) від відношення  $a/b$ , розрахована по формулі (9) для таких параметрів:  $b=5\text{мкм}$ ,  $H_0=2000\text{Е}$ ,  $M=400\text{Гс}$ ,  $V_0=0.02\text{см/с}$ ,  $\eta=0.2\text{Ст}$ ,  $\chi=135 \cdot 10^{-6}$  – сприйнятливості гадолінія.

Але, якщо для оцінки припустити, що “магнітна сила” значно спадає на відстанях порядку  $ar_0$  і, таким чином, обмежити максимальний характерний розмір кластера цією відстанню:

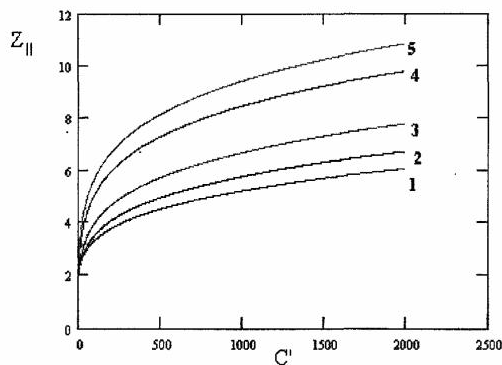
$$ar_0 = \sqrt[4]{\frac{\chi H_0 M V_N V_{\text{ФМ}}}{\pi \eta b}} \sqrt[4]{\frac{\rho_{\text{НФ}} V_N}{k_b T}},$$

то формула (9) прийме вид:

$$V = \left\{ - \int_{\Phi_0}^{\Phi_{\min}} \pi e^{3k(\Phi_0 - \Phi)} \sin^2 \Phi (k \cos \Phi + \sin \Phi) d\Phi - \int_{\cos \Phi_0}^1 \pi (1 - Z^2) dZ \right\} \frac{3}{4\pi} \quad (10)$$

$$\text{де } \Phi_{\min} = \Phi_0 - k^{-1} \lg \xi r_0$$

$$\xi r_0 > 1$$



Фіг. 1

$\xi$  – безрозмірний параметр порядку 1.

$r_0$  можна привести до виду

$$r_0 = \sqrt[4]{2H_0^* C^*} \sqrt[4]{\frac{\rho_{\text{НФ}} V_N V_0^2}{k_b T}},$$

У цьому випадку залежність  $V\left(\frac{a}{b}\right)$  – має ви-

гляд показаний на Фіг. 10, де залежність відношення об'єму уловлених домішок до об'єму феромагнітної кульки (окремого елемента ВГФН) від відношення  $a/b$ , розрахована по формулі (10) для таких параметрів:  $b=5\text{мкм}$ ,  $H_0=2000\text{Е}$ ,  $M=400\text{Гс}$ ,  $V_0=0.02\text{см/с}$ ,  $\eta=0.2\text{Ст}$ ,  $0.6$ ,  $\chi=135 \cdot 10^{-6}$  – сприйнятливості гадолінія.

Звідки отримуємо, що для домішок із заданою дисперсністю  $b$  існує оптимальне значення  $a$  радіуса частки, що уловлює, що маси уловлюваних домішок до маси феромагнітної кульки – ВГФН.

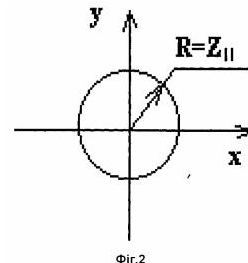
При цьому, даний розрахунок допомагає вибрати  $a$ , тобто один із параметрів ВГФН, що складається з окремих елементів так, щоб був виконаний принцип максимуму ємності при мінімумі матеріалоемності ВГФН.

Необхідно підкреслити, що даний розрахунок носить оцінний характер і ілюструє основні тенденції, що спостерігаються експериментально. Так, звичайно експериментальне значення оптималь-

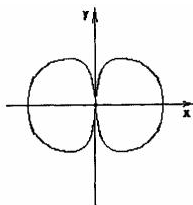
ного співвідношення  $\left(\frac{a}{b}\right)$  приймає значення від  $b$

до  $10b$ . У даному розрахунку безрозмірний параметр  $\xi$  дозволяє одержати достатньо точний збіг експериментальних і теоретичних даних, тому що зі зменшенням  $\xi$  положення максимуму грязеемності при мінімумі матеріалоемності зміщується

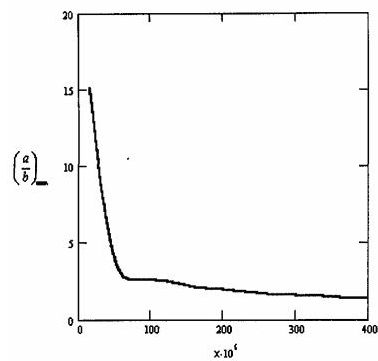
у бік менших значень  $\left(\frac{a}{b}\right)$ .



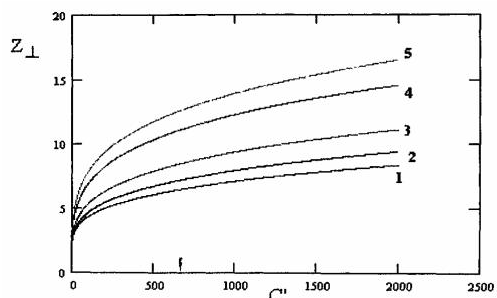
Фіг. 2



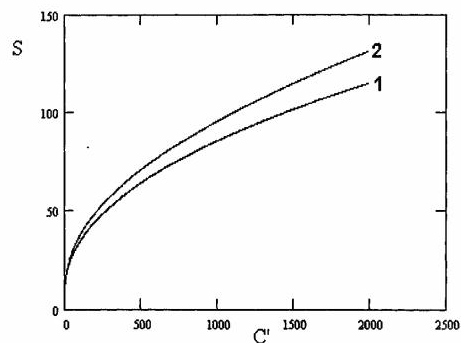
Фиг.3



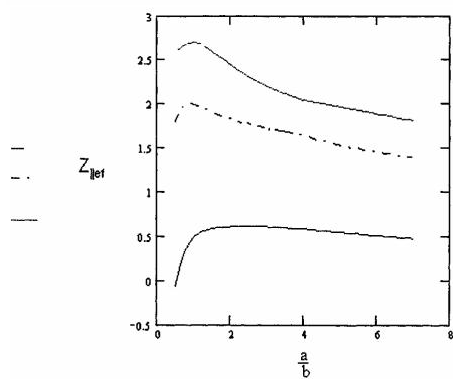
Фиг.7



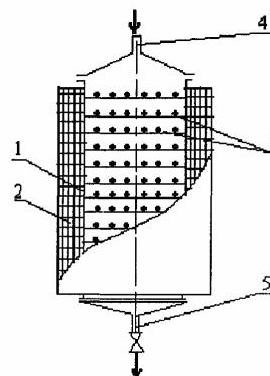
Фиг.4



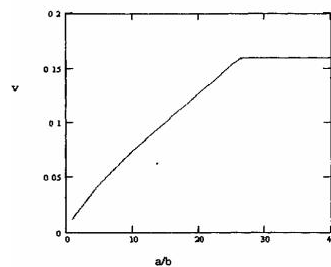
Фиг.5



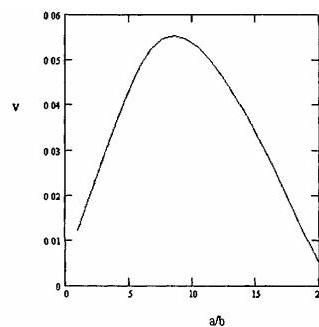
Фиг.6



Фиг.8



Фиг.9



Фиг.10