

ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 544.032.53

О.М. Терентьев, О.А. Можаровська,
А.В. Ворфоломеев

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ “МАГНІТНОЇ ПАСТКИ” ДЛЯ ЗАТРИМАННЯ ІОНІВ ДОМІШОК РІДИНИ В НАПІРНОМУ ТРУБОПРОВОДІ І ЙОГО ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ

Вступ

Вдосконалення технологій підготовки питної води, методів і засобів фізико-хімічного очищення її передбачено на законодавчому рівні [1]. Фізичні способи обробки водного середовища сприяють вивільненню внутрішньої енергії самого середовища. Загальна кількість можливих комбінацій обробки водного середовища фізичними способами сягає 1048576 [2]. Кількість можливих комбінацій фізичних способів обробки водного середовища без використання однотипних способів становить 2699 [2]. Найбільш перспективним із них є використання різних комбінацій магнітного впливу на середовище. Головною перевагою магнітної обробки водного середовища порівняно з іншими фізичними методами є можливість керування рухом іонів у магнітному полі, а отже, безпосереднє видалення іонів домішок із потоку. Існуючі теорії розкривають лише певну частину фізичних або хімічних процесів, не даючи пояснення загальному ефекту магнітної обробки водного середовища. Тому виникає необхідність у встановленні закономірностей дії магнітного поля на домішки у водному середовищі для створення різного роду “магнітних пасток” для забруднюючих домішок. А отже, актуальним є проведення досліджень закономірностей дії “магнітної пастки” із врахуванням взаємодії заряджених частинок з середовищем, в якому вони рухаються.

Постановка задачі

Метою дослідження є створення магнітного уловлювача іонів домішок у водному середовищі з використанням принципу “магнітної пастки” із врахуванням взаємодії заряджених частинок з середовищем. Для її досягнення необхідно встановити закономірності руху іонів домішок у водному середовищі під впливом

поздовжнього магнітного поля, визначити необхідну індукцію магнітного поля для створення “магнітної пастки” іонам домішок у напірному трубопроводі та розробити рекомендації з проектування магнітного уловлювача іонів домішок у водному середовищі.

Закономірності руху іонів домішок у водному середовищі під впливом поздовжнього магнітного поля

Потік в'язкої рідини з молекулярно-кінетичної точки зору являє собою трансляційний рух іонів і молекул рідини в напрямку прикладеної сили. Розглянемо рух зарядженої частинки в постійному аксіально-симетричному магнітному полі. Індукція магнітного поля збільшується вздовж осі напірного трубопроводу — осі z (рис. 1). Внаслідок непаралельності силових ліній магнітного поля з вектором швидкості зарядженої частинки на неї діятиме сила Лоренца, яка закручуватиме частинку в площині, перпендикулярній осі z . Таким чином, у цій площині заряджена частинка рухатиметься по ларморовому колу з радіусом ρ , м [3]:

$$\rho = \frac{mv_{\perp}}{qB}, \quad (1)$$

де m — маса частинки, кг; $v_{\perp} = v \sin \alpha$ — складова повної швидкості частинки v , перпендикулярна лініям індукції магнітного поля, м/с; v — повна швидкість частинки, м/с; α — кут між напрямком силових ліній магнітного поля і вектором повної швидкості, град; q — заряд частинки, Кл; B — індукція магнітного поля, Тл.

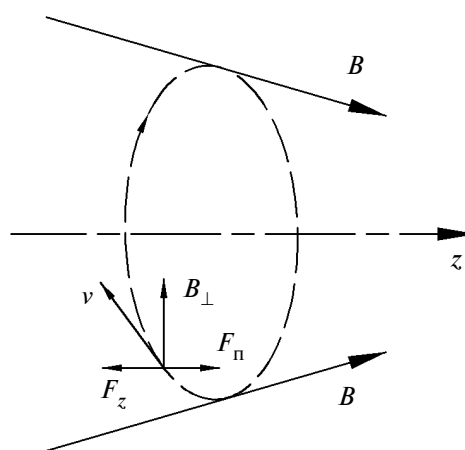


Рис. 1. Векторна схема дії сил на заряджену частинку в магнітному полі

Заряджена частинка, яка рухається по ларморовому колу, еквівалентна магнітному диполю з моментом μ , $A \cdot m^2$ [4]:

$$\mu = iS_{\perp}, \quad (2)$$

де i – елементарний коловий струм, зумовлений обертанням частинки, A ; S_{\perp} – площа ларморового кола, m^2 .

Площа ларморового кола S_{\perp} (m^2) із врахуванням (1) обчислюється за формулою

$$S_{\perp} = \pi r^2 = \pi \left(\frac{mv_{\perp}}{qB} \right)^2 = \pi \left(\frac{mv \sin \alpha}{qB} \right)^2, \quad (3)$$

період обертання частинки по ларморовому колу T (с) [4] – за формулою

$$T = \frac{2\pi m}{qB},$$

елементарний коловий струм i , зумовлений обертанням частинки (А) [4] – за виразом

$$i = \frac{q}{T} = q \frac{qB}{2\pi m} = \frac{q^2 B}{2\pi m}. \quad (4)$$

Підставивши (3) і (4) в (2), отримаємо

$$\mu = iS_{\perp} = \frac{q^2 B}{2\pi m} \pi \left(\frac{mv \sin \alpha}{qB} \right)^2 = \frac{mv^2 \sin^2 \alpha}{2B}. \quad (5)$$

Проекція сили F_z , яка діє на магнітний диполь у магнітному полі, на вісь z (Н) [4] становить

$$F_z = -\mu \frac{\partial B}{\partial z}, \quad (6)$$

де $\frac{\partial B}{\partial z}$ – зміна індукції магнітного поля вздовж осі z , Тл/м.

Підставивши (5) в (6), отримаємо

$$F_z = -\frac{mv^2 \sin^2 \alpha}{2B} \frac{\partial B}{\partial z}, \quad (7)$$

де $\frac{mv^2}{2} = \text{const} = E_{\text{кін}}$ – кінетична енергія зарядженої частинки в постійному магнітному полі [4].

Магнітне поле, в якому справедлива умова $\rho \frac{|\text{grad} B|}{B} \ll 1$, є повільно змінним магнітним полем. У такому полі існує “адіабатичний інваріант” [4]:

$$\frac{\sin^2 \alpha}{B} = \text{const}. \quad (8)$$

Проекція сили F_z (див. рис. 1) направлена протилежно руху частинки, що визначається знаком “–” у (7), тобто сповільнює її рух уздовж осі z .

Крім сили, описаної вище, на частинку діє також сила, зумовлена напірними характеристиками потоку рідини F_{Π} (Н) [5]:

$$F_{\Pi} = \frac{150\eta QV}{\pi d^4},$$

де η – динамічна в'язкість середовища (в даному випадку води), Па·с; Q – витрата рідини, m^3/c ; V – об'єм частинки, m^3 ; d – діаметр трубопроводу, м.

Тоді для того щоб частинка не могла пройти бар'єр у вигляді приросту магнітного поля, має виконуватись умова

$$|F_z| \geq |F_{\Pi}|, \quad (9)$$

тобто поздовжня складова сили взаємодії зарядженої частинки з магнітним полем F_z має бути більша від сили F_{Π} , з якою діє на частинку потік.

Із співвідношення (9) отримаємо

$$\frac{\partial B}{\partial z} \geq \frac{300\eta QBV}{\pi d^4 mv^2 \sin^2 \alpha}. \quad (10)$$

Витрата рідини Q (m^3/c) обчислюється за формулою

$$Q = v_{\Pi} S = 0,25\pi v_{\Pi} d^2,$$

де v_{Π} – швидкість потоку, м/с; $S = 0,25\pi d^2$ – площа поперечного перерізу трубопроводу, m^2 .

Звідси отримаємо

$$v_{\Pi} d^2 = \frac{4Q}{\pi}. \quad (11)$$

Враховуючи (11) і те, що в початковий момент часу повна швидкість частинки дорівнює швидкості потоку рідини ($v = v_{\Pi}$), запишемо співвідношення (10) у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial z} &\geq \frac{300\eta QBV}{\pi d^4 mv^2 \sin^2 \alpha} = \\ &= \frac{300\pi\eta QBV}{16Q^2 m \sin^2 \alpha} = \frac{75\pi\eta BV}{4Qm \sin^2 \alpha}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$Q^2 = \frac{\pi^2 v^2 d^4}{16} \Rightarrow \pi d^4 v^2 = \frac{16Q^2}{\pi}.$$

Динамічна в'язкість рідини η , подача Q , об'єм V і маса m частинки – величини постійні. Адіабатичний інваріант (8) через наявність в'язкого середовища навколо частинки не може бути постійним. Запишемо (12) у вигляді

$$\frac{1}{B} \partial B \geq \frac{18,75\pi\eta V}{Q m \sin^2 \alpha} \partial z.$$

Проінтегрувавши цю нерівність, отримаємо значення індукції магнітного поля в кожній точці залежно від її координати по осі z $B = f(Z)$, Тл:

$$\ln B \geq \frac{18,75\eta V}{mQ} \frac{1}{\sin^2 \alpha_0} Z + C, \quad (13)$$

де C – стала інтегрування; α_0 – початковий кут між напрямком силових ліній магнітного поля і вектором повної швидкості, град; Z – координата точки по осі z .

З початкових умов, коли $Z = 0$, знаходимо, що $C = \ln B_0$, де B_0 – значення індукції магнітного поля в точці з координатою $Z = 0$.

Враховуючи (13), запишемо мінімальне необхідне значення індукції для кожної точки трубопроводу залежно від координати Z :

$$B(Z) = e^{\frac{18,75\eta V}{mQ} \frac{1}{\sin^2 \alpha_0} Z + \ln B_0} = e^{\frac{18,75\eta V}{mQ} \frac{1}{\sin^2 \alpha_0} Z} e^{\ln B_0} = B_0 e^{\frac{18,75\eta V}{mQ} \frac{1}{\sin^2 \alpha_0} Z}. \quad (14)$$

Отже, для затримання іонів домішок у водному середовищі, що проходить крізь “магнітну пастку”, необхідно створити в ній постійне аксіально-симетричне магнітне поле з індукцією, яка змінюється за експоненціальним законом згідно з (14). Швидкість зростання індукції магнітного поля обернено пропорційна витраті рідини і залежить від щільності домішок.

Для розрахунку індукції магнітного поля слід знати мінімальний із кутів α_0 для всіх заряджених частинок, які рухаються в магнітному полі. У практичних розрахунках вводиться поняття “конус втрат”, тобто береться кут α_0 , такий, що певна частина заряджених частинок не буде відбиватись від області з більшою високою індукцією магнітного поля, а проходить крізь неї.

Реалізація розподілу індукції магнітного поля “магнітної пастки”

Використовуючи (14), обчислюємо необхідну індукцію магнітного поля для створення “магнітної пастки” для іонів заліза, кальцію та магнію.

Вхідні дані:

$\eta = 1,005 \cdot 10^{-3}$ – динамічна в'язкість води, Па·с [6];

$$m_{Ca^{2+}} = 6,657288 \cdot 10^{-26}, \quad m_{Mg^{2+}} = 4,037061 \cdot 10^{-26},$$

$m_{Fe^{2+}} = 9,275854 \cdot 10^{-26}$ – маси іонів кальцію, магнію та заліза, кг [7];

$$V_{Fe^{2+}} = 1,047 \cdot 10^{-30}, \quad V_{Ca^{2+}} = 4,001 \cdot 10^{-30}, \quad V_{Mg^{2+}} =$$

$= 2,144 \cdot 10^{-30}$ – об'єми іонів кальцію, магнію та заліза, м³ [7];

$d = 0,07$ – внутрішній діаметр трубопроводу відповідно до ГОСТ 8732–78, м;

$Q = 0,0058$ – об'ємна витрата рідини через переріз трубопроводу згаданого діаметра (враховуючи, що $v_n = 1,5$ м/с – рекомендована швидкість рідини в трубопроводі [8]), м³/с;

$\alpha_0 = 1$ – “конус втрат”, град;

$B_0 = 0,02$ – значення початкової індукції (Тл) відповідає магнітній індукції в центрі кільцевого магніту К 154×76×13 25 ВА 170 ТУ 11707022 із залишковою індукцією 0,38 Тл.

Розподіл індукції магнітного поля, необхідної для створення “магнітної пастки” для іонів кальцію в напірному трубопроводі, наведено на рис. 2.

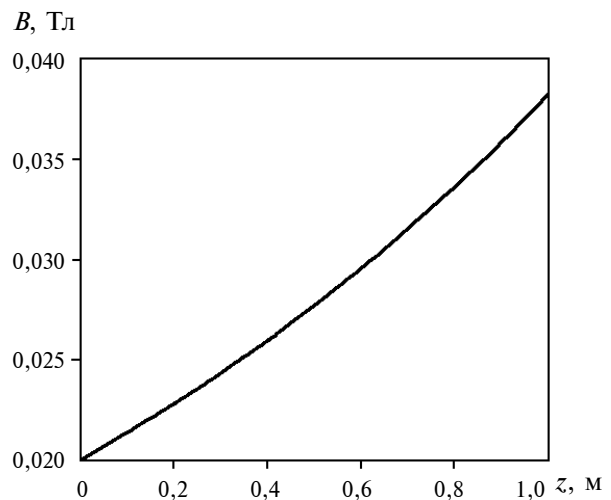


Рис. 2. Розподіл магнітної індукції вздовж осі z , необхідний для створення “магнітної пастки” для іонів кальцію у водному середовищі

При довжині магнітної пастки 1 м магнітна індукція вздовж осі z має змінитись від 0,020 до 0,038 Тл за експоненціальним законом.

Практичні рекомендації

Застосування для реалізації експоненціального розподілу індукції магнітного поля пристроїв з постійними магнітами є досить складним. Для розрахунку індукції магнітного поля, створеного постійним магнітом кільцевої форми, використовуються спеціальні числові методи та ЕОМ. Тому більш раціонально брати електромагніт, в якому вздовж осі буде змінюватися відношення кількості витків до довжини ділянки котушки. Таким чином, можна досягнути експоненціального розподілу магнітної індукції.

Індукція магнітного поля в соленоїді [9] записується у вигляді

$$B = \frac{\mu\mu_0 I \omega}{l},$$

де μ – відносна магнітна проникність води ($\mu = 1$ [6]); μ_0 – магнітна стала ($\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м [10]); I – струм в обмотці, А; l – довжина соленоїда, м.

Звідси кількість витків на ділянці соленоїда довжиною l становить

$$\omega = \frac{Bl}{\mu\mu_0 I}. \quad (15)$$

Для обчислення кількості витків на кожній ділянці, підставивши (14) в (15), знайдемо

$$\omega = \frac{B_0 e^{\frac{18,75V}{mQ} \frac{1}{\sin^2 \alpha_0} z}}{\mu\mu_0 I}.$$

Для отримання експоненціального розподілу індукції магнітного поля розіб'ємо соленоїд довжиною 440 мм на одинадцять ділянок довжиною 40 мм і візьмемо таку магнітну індукцію нульової секції: $B_0 = 0,02$ Тл. Нами зроблено пристрій (рис. 3), який складається з котушок індуктивності I , встановлених на трубі 5 та закріплених за допомогою двох упорних дисків 2, які посаджені на трубу з натягом. Котушки з упорними дисками поміщаються в корпус, який складається з нижньої 3 та верхньої 4 частин.

В таблиці наведено розрахунок необхідної кількості витків у кожній із секцій котушки індуктивності для отримання кривої, наведеної на рис. 2 (тут $l = 0,04$ м – довжина ділянки соленоїда, $I = 1$ А – струм в обмотці).

Оскільки кількість витків в обмотці має бути цілим, то необхідно розрізняти розрахункове значення магнітної індукції і фактичне, скореговане конструктивними особливостями. Відхилення між розрахунковим значенням магнітної індукції і фактичним становить $\pm 0,2\%$ (рис. 4). Як бачимо, використання одинадцяти секцій у котушці індуктивності забезпечує необхідну експоненціальну форму кривої розподілу індукції магнітного поля. При використанні п'яти секцій розбіжності в кривих становлять не більше 3,3 %, а дев'яти секцій – не більше 1,6 % (див. рис. 4).

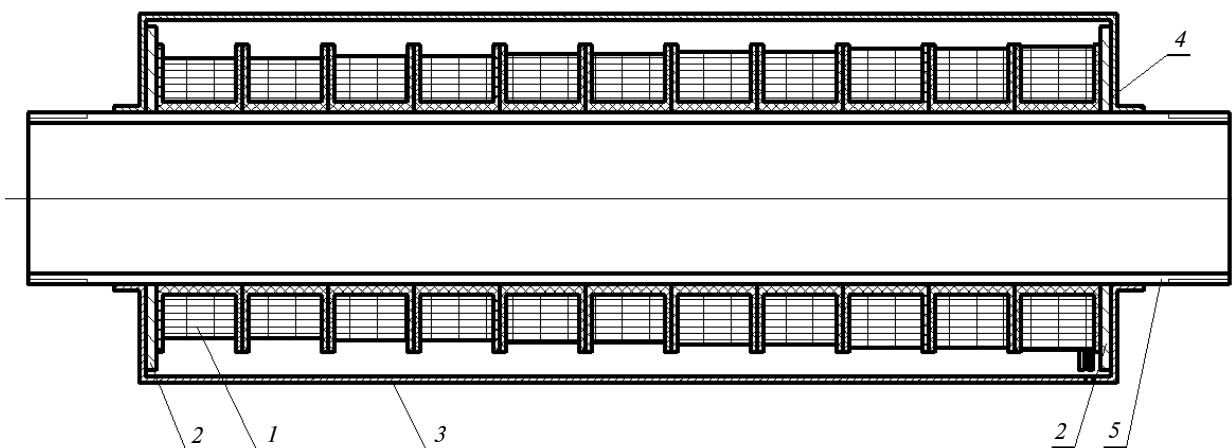


Рис. 3. Магнітний уловлювач

Таблиця. Розрахунок кількості витків у секції обмотки

Номер секції	Координата центра секції $Z_{цс}$, м	Розрахункова індукція B , Тл	Розрахункова кількість витків	Фактична кількість витків	Фактична індукція $B_{ф}$, Тл
0	0	0,02000	636,44	637	0,0200
1	0,02	0,02026	644,74	645	0,0203
2	0,06	0,02079	661,68	662	0,0208
3	0,10	0,02134	679,07	679	0,0213
4	0,14	0,02190	696,91	697	0,0219
5	0,18	0,02248	715,22	715	0,0225
6	0,22	0,02307	734,01	735	0,0231
7	0,26	0,02367	753,29	753	0,0237
8	0,30	0,02429	773,08	773	0,0243
9	0,34	0,02493	793,40	793	0,0249
10	0,38	0,02559	814,24	814	0,0256

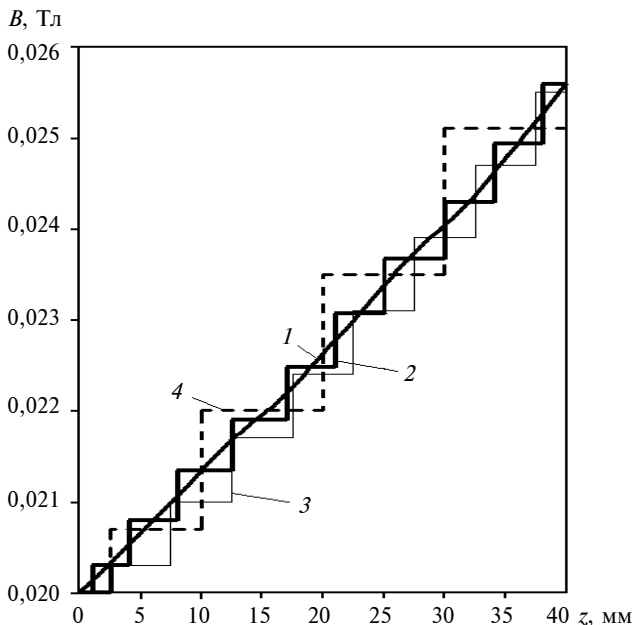
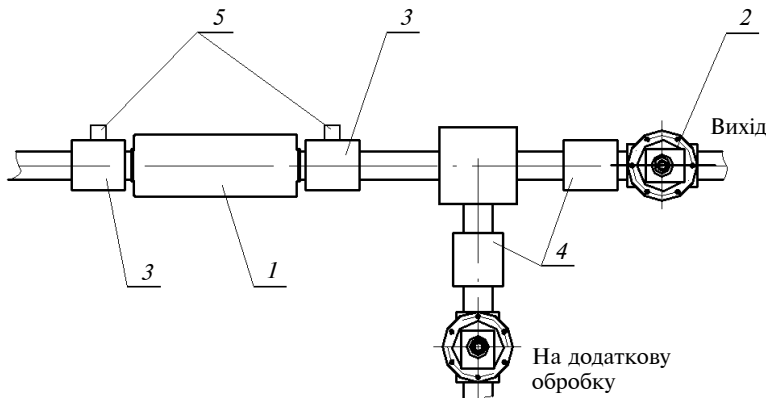
Рис. 4. Розподіл магнітної індукції вздовж осі z : 1 – необхідний; 2 – з використанням одинадцяти секцій у котушці; 3 – з використанням дев'яти секцій у котушці; 4 – з використанням п'яти секцій у котушці

Рис. 5. Схема блока магнітної очистки

Конструктивні рішення для проектування магнітного очищувача

Оскільки магнітний уловлювач тільки утримує заряджені частинки в певному об'ємі, то для видалення іонів домішок із потоку необхідно використовувати його у блоці з іншими пристроями.

Магнітний очищувач (рис. 5) – установка, яка складається з магнітного уловлювача 1, приєднаного до трубопроводу за допомогою з'єднувальних муфт 3. У вхідній та вихідній відносно уловлювача муфтах встановлюються прилади для контролю провідності води 5, а отже, кількості іонів домішок у ній. Якщо різниця між концентрацією домішок на вході та виході магнітного уловлювача менша за критичну, то блоком керування відключається живлення від уловлювача, закривається вихідний електромагнітний клапан і відкривається клапан, який пропускає рідину на додаткову обробку.

Через час, достатній для віднесення уловлених домішок потоком рідини з уловлювача на додаткову очистку, система повертається до попереднього стану: клапан на виході відкритий, а на зливі закритий. Електромагнітні клапани 2 приєднуються до труб за допомогою з'єднувальних муфт 4.

Висновки

1. Запропонований аналітичний вираз для розрахунку магніт-

ної індукції, необхідної для очищення рідини магнітним полем з використанням принципу "магнітної пастки", відрізняється від існуючих тим, що враховується магнітний вплив на частинку середовища, в якому вона рухається.

2. Для затримання іонів домішок у водному середовищі, що проходить крізь "магнітну пастку", необхідно створити в ній постійне аксіально-симетричне магнітне поле з магнітною індукцією, що змінюється за експоненціальним законом. При цьому ключову роль відіграє саме зміна значення магнітної індукції на елементарному відрізьку осі трубопроводу. Швидкість зростання індукції магнітного поля вздовж осі трубопроводу прямо пропорційна в'язкості рідини, а також обернено пропорційна витраті рідини і щільності домішок.

3. У практичних розрахунках введено поняття "конус втрат", тобто взято такий кут між початковою швидкістю частинки та індукцією магнітного поля, при якому певна частина заряджених частинок, в яких цей кут менший за взятий, не буде відбиватись від області з вищою індукцією магнітного поля, а проходитиме крізь неї. У подальших дослідженнях, визначивши характер розподілу кутів між індукцією магнітного поля та початковими швидкостями заряджених частинок, можна буде отримати частину цих частинок, які проходять через очищувач, а значить, встановити ступінь очищення рідини пристроєм і знайти оптимальне співвідношення між ступенем очищення та ресурсоспоживанням пристрою.

4. Розрахована магнітна індукція вздовж осі трубопроводу для утворення "магнітної пастки" для іонів кальцію при довжині пристрою 0,44 м і прохідному діаметрі 0,07 м змінюється від 0,02 до 0,0256 Тл.

5. Розроблений магнітний уловлювач іонів домішок у водному середовищі відрізняється від існуючих тим, що як джерело магнітної індукції використано котушку індуктивності, розділену на секції з різною кількістю витків у кожній. Кількість витків визначають із врахуванням кривої розподілу необхідної магнітної індукції вздовж осі трубопроводу.

6. Зміна магнітної індукції вздовж осі z для створення "магнітної пастки" досягається за допомогою використання різної кількості витків у кожній із секцій котушки індуктивності. Для досягнення зміни індукції вздовж осі z від 0,02 до 0,0256 Тл необхідно виконати 637 витків у першій секції і 814 витків – в останній. При використанні одинадцяти секцій розходження між розрахунковим значенням магнітної індукції і фактичним буде $\pm 0,2\%$, при використанні дев'яти секцій – $1,6\%$, а п'яти – $3,2\%$. Використання одинадцяти секцій у котушці індуктивності забезпечує необхідну форму кривої індукції магнітного поля.

7. У подальших дослідженнях варто звернути увагу на енергетичні перетворення в процесі уловлювання іонів домішок, кінематику їх руху, взаємодію між іонами домішок, а також на розробку відповідної системи керування для забезпечення роботи магнітного очищувача.

О.М. Терентьев, Е.А. Можаровская, А.В. Ворфоломеев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ "МАГНИТНОЙ ЛОВУШКИ" ДЛЯ ЗАДЕРЖИВАНИЯ ИОНОВ ПРИМЕСЕЙ ЖИДКОСТИ В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ И ЕГО ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Исследовано закономерности движения ионов примесей в водной среде под влиянием продольного магнитного поля. Определена необходимая индукция магнитного поля для создания "магнитной ловушки" для ионов примесей в напорном трубопроводе. Разработаны рекомендации по проектированию магнитного уловителя ионов в водной среде.

O.M. Terentev, O.A. Mozharovska, A.V. Vorfolomeyev

DETERMINATION OF MAGNETIC INDUCTION DISTRIBUTION OF "MAGNETIC TRAP" FOR TRAPPING IONS OF LIQUID ADMIXTURES IN PRESSURE PIPELINE AND ITS APPLICATION

The paper studies the conformities of admixtures' ions motion in a water environment under the influence of the longitudinal magnetic field. We determine the necessary induction of the magnetic field to create the "magnetic trap" for the admixtures' ions in a pressure pipeline. Moreover, we provide some recommendations on designing the magnetic catcher of the admixtures' ions in a water environment.

1. Закон України про Загальнодержавну програму “Питна вода України на 2006–2020 роки” від 3 березня 2005 року, № 2455-IV.
2. Терентьев О.М., Можаровська О.А., Ворфоломеев А.В. Способи і засоби обробки робочої рідини гідросистем гірничих машин // Вісн. НТУУ “КПІ”. Сер. Гірництво. – 2008. – № 16. – С. 73–79.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учеб. пособ. для вузов в 10 т. Т. II. Теория поля. – 8-е изд. – М.: Физматлит, 2001. – 536 с.
4. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях: Учеб. пособ. – М.: Наука, 1972. – 224 с.
5. Хорин В.Н. Объемный гидропривод забойного оборудования. – М.: Недра, 1980. – 416 с.
6. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики. – К.: Наук. думка, 1989. – 864 с.
7. Глинка Н.Л. Общая химия. – 23-е изд. – Л.: Химия, 1983. – 704 с.
8. Грачев И.Г., Низовцев В.М., Пирогов С.Ю., Савищенко Н.П., Юрьев А.С. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем. – СПб.: АНО НПО “Мир и семья”, 2001. – 1154 с.
9. Немцов М.В., Шамаев Ю.М. Справочник по расчёту параметров катушек индуктивности. – М.: Энергоиздат, 1981. – 136 с.
10. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма: Учеб. пособ. для вузов. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1991. – 288 с.

Рекомендована Радою
Інституту енергозбереження
та енергоменеджменту НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
23 жовтня 2008 року