

УДК 628.16.086.4, 537.613

### ВИБІР НАМАГНІЧУВАННЯ КІЛЬЦЕВИХ МАГНІТІВ ПРИСТРОЮ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ФОКУСОВАНИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ

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

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»  
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: a.vorfolomeiev@kpi.ua

Розробка інноваційного способу очищення води фокусованим магнітним полем є актуальною задачею. Дослідження присвячене вибору магнітної системи, а саме, способу намагнічування кільцевих магнітів, за якого досягається максимальна довжина ефективної зони робочої камери пристрою очищення. Розглянуто два способи намагнічування кільцевих магнітів такого пристрою: радіальне і вісьове. Для знаходження розрахункових значень магнітної індукції побудована комп'ютерна модель магнітної системи пристрою очищення. Експериментально виміряно радіальну складову магнітної індукції в 22 точках, за вісьмома паралельними дослідями. Методом тригонометричної та поліноміальної інтерполяції визначено залежності, які дозволяють із точністю до 13,6 % встановити розподіл радіальної складової магнітної індукції в робочій камері. Визначена ефективна довжина робочої камери даного пристрою очищення при осьовому намагнічуванні магнітів складає 0,015 м, радіальному – 0,050 м. Для пристрою магнітного очищення обрано кільцеві магніти з радіальним намагнічуванням, при цьому визначена усереднена радіальна складову магнітної індукції в робочій зоні пристрою становить 27 мТл, осьової – 135 мТл.

**Ключові слова:** очищення, магніт, індукція, намагнічування.

### ВЫБОР НАМАГНИЧИВАНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ МАГНИТОВ УСТРОЙСТВА ОЧИСТКИ ВОДЫ ФОКУСИРОВАННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

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

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»  
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: a.vorfolomeiev@kpi.ua

Разработка инновационного способа очистки воды фокусированным магнитным полем является актуальной задачей. Данное исследование посвящено выбору магнитной системы, а именно способа намагничивания кольцевых магнитов, при котором достигается максимальная длина эффективной зоны рабочей камеры устройства очистки. Рассмотрены два способа намагничивания кольцевых магнитов такого устройства: радиальное и осевое. Для нахождения расчетных значений магнитной индукции построена компьютерная модель магнитной системы устройства очистки. Экспериментально измерено радиальную составляющую магнитной индукции в 22 точках, по восьми параллельным опытам. Методом тригонометрической и полиномиальной интерполяции определены зависимости, которые позволяют с точностью до 13,6 % установить распределение радиальной составляющей магнитной индукции в рабочей камере. Определенная эффективная длина рабочей камеры данного устройства очистки при осевом намагничивании магнитов составляет 0,015 м, радиальном – 0,050 м. Для устройства магнитной очистки выбраны кольцевые магниты с радиальным намагничиванием, при этом усредненная радиальная составляющая магнитной индукции в рабочей зоне устройства составляет 27 мТл, осевая – 135 мТл.

**Ключевые слова:** очистка, магнит, индукция, намагничивание.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** З огляду на постійно зростаюче споживання води [1], розробка інноваційних способів її очищення є актуальною задачею. В Україні це законодавчо затверджено в [2]. Магнітні способи обробки/очищення набули широкого розповсюдження та довели свою ефективність [3]. Позитивний досвід застосування очищення води фокусованим магнітним полем (визначення згідно з [4]) наведено в [5].

Метою даного дослідження є обґрунтування вибору намагнічування магнітів пристрою очищення води фокусованим магнітним полем.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Для створення такого поля в пристрої ключовою є довжина ділянок з постійно направленими векторами складових магнітної індукції (складові на цих ділянках не змінюють знак). Ця довжина визначає ефективну довжину робочої камери пристрою очищення, зі збільшенням якої збільшується ефективність очищення [6].

Таким чином завдання даного дослідження:

- встановити розподіл магнітної індукції в перерізі пристрою очищення (складові індукції, ефективну довжину робочої камери);
- обґрунтовано обрати спосіб намагнічування магнітів.

Для вирішення поставлених завдань розроблено і досліджено за попередньо складеною програмою два варіанти виконання пристрою магнітного очищення (рис. 1): з осьовим квазізустрічним і з радіальним намагнічуванням кільцевих магнітів.

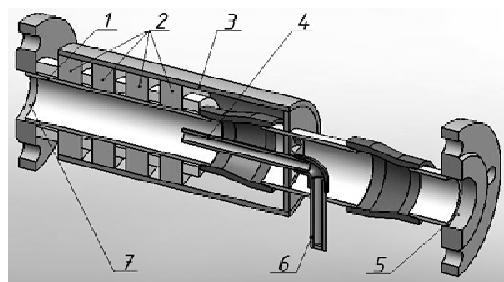


Рисунок 1 – Пристрій магнітного очищення

Пристрій магнітного очищення (рис. 1) містить немагнітну трубу 1, на якій розміщені чотири кільцеві магніти 2; кожух захисний 3; патрубок відведення відходів 6 із приймальною частиною 4; ввідний 7 і вивідний 5 патрубків з фланцями.

*Вибір способу розрахунку індукції магнітного поля.* Дослідження ефективності очищення води фокусованим магнітним полем потребують визначення характеристик магнітної системи пристрою очищення: осьової та радіальної складових магнітного поля, ефективної довжини робочої камери. Для цього встановлено теоретичні та експериментальні залежності розподілу магнітної індукції в пристрої очищення.

Для теоретичного розрахунку магнітного поля, створеного постійними магнітами, користуються напівемпіричними залежностями та методом скінчених елементів. У першому випадку розрахунок обмежується геометричними розмірами магнітів, їх розташуванням, магнітними властивостями. Напівемпіричні залежності для розрахунку складових магнітного поля кільцевих магнітів наведені в [7, 8]. Вони не враховують взаємодію магнітів між собою. Розрахунок магнітного поля методом скінчених елементів характеризується високою точністю [9, 10], але ускладнений великим об'ємом обчислень [11]. Тому обрано метод скінчених елементів із комп'ютерним розрахунком параметрів магнітного поля пристрою очищення. Для моделювання (рис. 2) використана програма ELCUT.

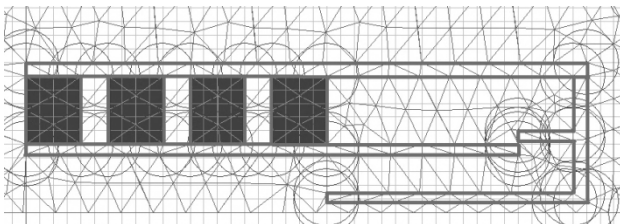


Рисунок 2 – Розрахункова схема моделі пристрою магнітного очищення з нанесеною сіткою скінчених елементів

*Розподіл магнітної індукції у пристрої з осьовим квазізустрічним намагніченням магнітів.* Експериментальні дослідження радіальної складової магнітної індукції  $B_r$  проводились на відстані 0,007 і 0,015 м від осі пристрою очищення. Число вимірювань у кожній точці вибрано рівним восьми при п'ятивідсотковому рівні значущості. Для оцінювання однорідності дисперсій взято табличне значення критерію Кохрена  $G_r=0,2299$  [12] для числа порівнюваних дисперсій, рівному 12, при кількості паралельних дослідів рівній вісім. Обчислене розрахункове значення критерію Кохрена –  $G_p=0,2019$  для відстані до осі пристрою 0,007 м та  $G_p=0,1177$  для 0,015 м. Так як  $G_p$  менше  $G_r$ , то дисперсії однорідні. Це підтверджує, що розподіл значень радіальної складової магнітної індукції в точці відповідає нормальному закону, а також, що вісім паралельних дослідів достатньо для визначення радіальної складової магнітної індукції в точці.

На рис. 3 приведені розрахункові та експериментальні криві розподілу радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення на відстані 0,007 та 0,015 м від неї.  $Z$  – координати точки відносно першого (зліва) магніту.

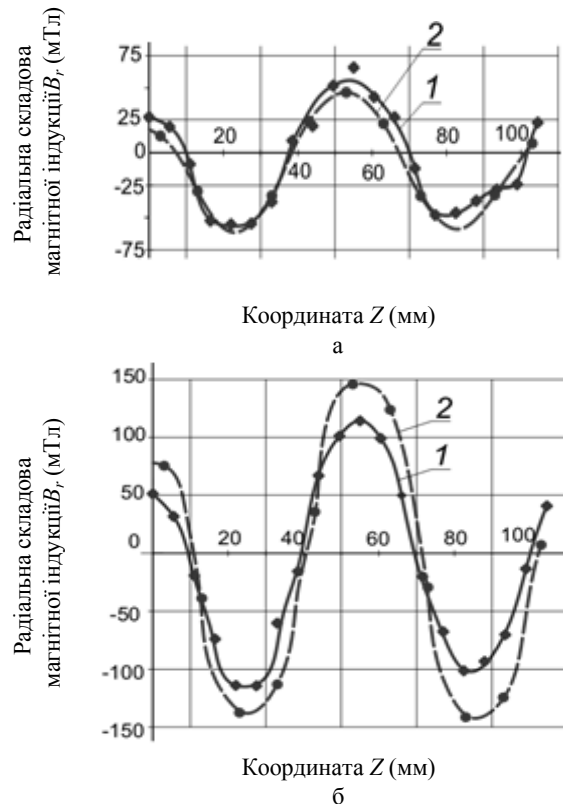


Рисунок 3 – Розрахункові (1) та експериментальні (2) криві розподілу радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення на відстані 0,007 м (а) та 0,015 м (б) від неї

Найбільші розходження між розрахунковими і експериментальними кривими знаходяться в екстремальних точках, що відповідають амплітудним значенням радіальної складової індукції. Найбільші розходження між розрахунковими і експериментальними кривими  $B_r$  для відстані від осі пристрою 0,007 м становить 9,1 мТл, для відстані від осі пристрою 0,015 м – 31,9 мТл. При цьому не враховувався правий мінімум індукції, так як у ньому аномальність розподілу індукції пов'язана з неврахуванням у комп'ютерній моделі насичення в магнітопроводі. Так, розходження між розрахунковими і експериментальними кривими  $B_r$  в околі правого мінімуму становлять для відстані від осі пристрою 0,007 м – 12,4 мТл, для відстані від осі пристрою 0,015 м – 40,9 мТл. Це пояснюється тим, що в запропонованій моделі (рис. 2) магнітопровід між патрубком відведення відходів і захисним кожухом є суцільним, із постійною товщиною стінки. У пристрої ж очищення такий магнітопровід не є суцільним, так як потрібні отвори для відведення очищеної води. У досліджуваному пристрої як магнітопровід використано металічні пластини, приварені до патрубків відведення відходів. При моделюванні із суцільним магнітопроводом підсилюються збурення, які вносить провідний патрубок відведення відходів. На

рис. 3,а це виражається у вигляді зміни форми кривої розподілу в околі правого мінімуму радіальної складової магнітної індукції, на рис. 3,а, 3,б – зменшенням амплітудного значення  $B_r$  у тому ж околі. Так, амплітудне значення  $B_r$  для відстані від осі пристрою 0,007 м зменшилось на 15,2 % (8,6 мТл), для відстані від осі пристрою 0,015 м зменшилось на 11,1 % (12,8 мТл). Таким чином, із наближенням до вісі пристрою (до патрубку відведення відходів) збурення, які вносить патрубок у розподіл радіальної складової магнітної індукції, збільшуються. Різниця по фазах розрахункових і реальних кривих на рис. 3 пояснюється ускладненістю позиціонування зонду тесламетра НТ20. Зі збільшенням відстані від осі пристрою амплітудне значення радіальної складової магнітної індукції збільшується. Так амплітудне значення  $B_r$  для відстані від осі пристрою 0,007 м становить 46,7 мТл, для відстані від осі пристрою 0,015 м – 145,8 мТл (у вимірних точках). Таке збільшення пояснюється наближенням до внутрішньої грані кільцевих магнітів.

З експериментальних даних методом поліноміальної інтерполяції отримано інтерполуючі функції розподілу радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення для відстані від осі пристрою очищення:

– 0,007 м (рис. 3,а), мТл:

$$B_r(Z) = -0,042 Z^6 + 1,3295 Z^5 - 15,464 Z^4 + 79,46 Z^3 - 167,02 Z^2 + 91,223 Z - 1,3375; \quad (1)$$

– 0,015 м (рис. 3,б), мТл:

$$B_r(Z) = -0,0973 Z^6 + 3,2536 Z^5 - 40,161 Z^4 + 221,17 Z^3 - 510,38 Z^2 + 335,3 Z + 13,642; \quad (2)$$

де  $Z$  – координата точки вздовж осі пристрою очищення, см.

При обраному ступені поліному рівній шести, достовірність апроксимації (коефіцієнт детермінації) для відстані від осі пристрою 0,007 м становить 0,9988 в.о., для відстані від осі пристрою 0,015 м – 0,9945 в.о.

Для узагальнення отриманих залежностей (1), (2) використано метод тригонометричної інтерполяції. При цьому розподіл радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення апроксимовано до синусоїди. Отримана емпірична залежність розподілу радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення, мТл:

$$B_r = \frac{H_{cj}}{955} (6,8r + 13) \sin \left( \frac{\pi a}{a+b} - \frac{2\pi}{3} Z \right), \quad (3)$$

де  $H_{cj}$  – коерцитивна сила магнітного матеріалу за індукцією, кА/м;  $r$  – відстань від осі пристрою, мм;  $a$  – відстань між магнітами, мм;  $b$  – ширина кільцевого магніту, мм;  $Z$  – координата точки вздовж осі пристрою очищення, мм.

Фазу інтерполуючої синусоїди визначено, виходячи із геометричних розмірів кільцевих магнітів та їх взаємного розташування. Амплітуду зміни радіальної складової магнітної індукції встановлено в залежності від відстані до осі пристрою та матеріалу

магнітів. Отримані розрахункові точки методом лінійної інтерполяції було апроксимовано до прямих (рис. 4). При цьому достовірність апроксимації складала для матеріалу магнітів N38 – 0,9764 в.о., N38H – 0,9981 в.о., N38UH – 0,9972 в.о.

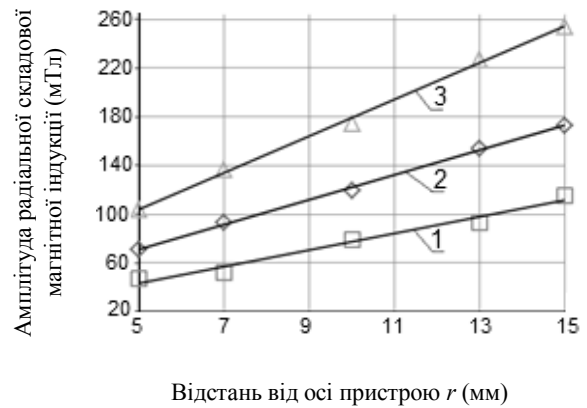


Рисунок 4 – Залежність амплітуди радіальної складової магнітної індукції від відстані до осі пристрою: 1 – для матеріалу магнітів N38 ( $H_{cj}=955$  кА/м); 2 – N38H ( $H_{cj}=1353$  кА/м); 3 – N38UH ( $H_{cj}=1990$  кА/м)

На рис. 5 показані розраховані за (3) криві розподілу радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення з нанесеними експериментальними точками.

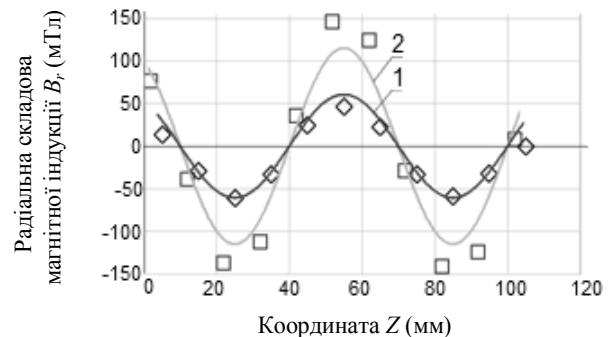


Рисунок 5 – Криві розподілу радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення з нанесеними експериментальними точками для відстані від осі пристрою 0,007 м (1) та 0,015 м (2)

Крива 1 розподілу радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення для відстані від осі пристрою 0,007 м проходить в околі експериментальних точок (рис. 5). Так найбільше розходження становить 22,2 % (13,3 мТл) і знаходиться в центральному максимумі. В інших точках розходження лежить в межах 8,2 % (2,7 мТл). Аномальність амплітуди у центральному максимумі пояснюється екрануванням магнітного поля сусідніми магнітами. У випадку наближення до внутрішньої грані магнітів (збільшення індукції магнітного поля) екранування магнітного поля нівелюється. Крива 2 розподілу  $B_r$  для відстані від осі пристрою 0,015 м погано узгоджується з експериментальними точками в околі максимуму та мінімумів індукції. Так розхо-

дження в околі максимуму та мінімумів індукції становить близько 24,8 % (36,5 мТл).

Наведені значення розходжень між кривими слідує із використання в (3) розрахункового значення амплітуди, тобто в (3) похибки визначення амплітуди, що виникли під час інтерполяції, накладаються на похибки, що виникли під час визначення  $B_r$  методом скінчених елементів. Для передпроектної оцінки розподілу радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення залежність (3) уточнено шляхом обмеження варіантом матеріалу магнітів N38. Це дає змогу використовувати експериментальні значення амплітуди  $B_r$  замість розрахункових. Тоді розподіл радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення, мТл:

$$B_r = (10,5r - 13,5) \sin\left(\frac{\pi a}{a + b} - \frac{2\pi}{3} Z\right). \quad (4)$$

На рис. 6 приведені розраховані за (4) криві розподілу радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення з нанесеними експериментальними точками.

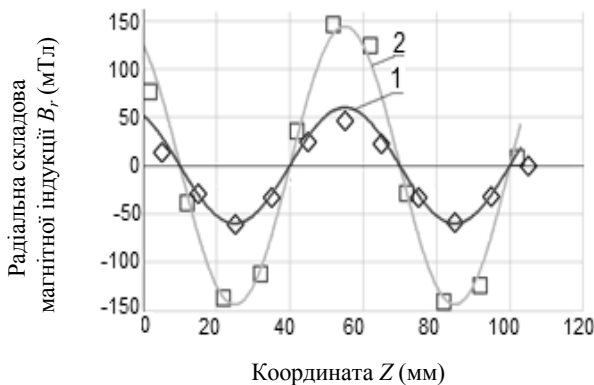


Рисунок 6 – Криві розподілу радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення з нанесеними експериментальними точками для відстані від осі пристрою 0,007 м (1) та 0,015 м (2) для матеріалу магнітів N38

На рис. 6 емпіричні криві розподілу радіальної складової магнітної індукції проходять в околі експериментальних точок.

Для випадку відстані від осі пристрою 0,007 м розходження між розрахованими за (4) і (3) точками та експериментальними точками рівні. Для відстані 0,015 м при розрахунку за (4) найбільше розходження становить 13,6 % (16,9 мТл).

Для дослідження співпадання розрахованої за (4) та експериментальної кривих за критерієм Колмогорова було побудовано графік накопичених значень радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення (рис. 7).

На рис. 7 найбільше відхилення між накопиченими розрахунковими та накопиченими експериментальними сумами становить 33,5 мТл. Сума розрахункових значень – 968,3 мТл. При 88 незалежних точках вимірювання критерій Колмогорова за  $\lambda=0,32$ . Звідси вірогідність того, що розрахункова та

експериментальна криві узгоджуються прямує до одиниці (при  $\lambda=0,40$  імовірність дорівнює 0,997, при  $\lambda=0,30-1,000$ ).

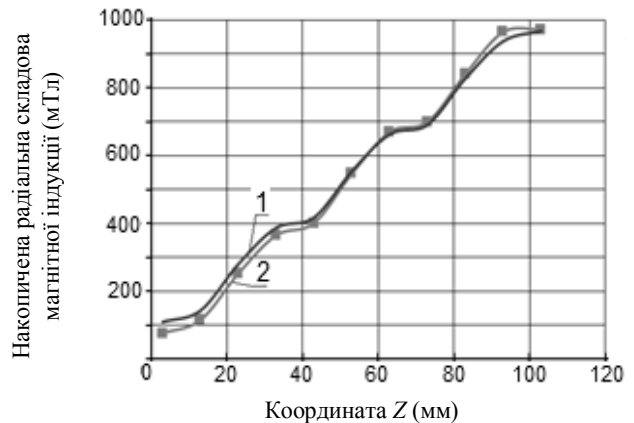


Рисунок 7 – Розрахункова (1) та експериментальна (2) криві накопичених значень радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення для відстані від осі пристрою 0,015 м

Таким чином, (4) рекомендовано для розрахунку розподілу радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення для кільцевих магнітів з внутрішнім та зовнішнім діаметрами рівними відповідно 50 та 100 мм, та матеріалом магнітів неодим–залізо–бор N38.

Розрахункові криві розподілу осьової складової магнітної індукції  $B_a$  уздовж осі пристрою очищення (рис. 8) за формою повторюють відповідні криві для радіальної. При цьому вони зсунуті за фазою: так при  $Z=10$  мм осьова складова магнітної індукції досягає амплітудного значення (мінімуму), а радіальна – нуля. Таким чином, ефективна довжина робочої камери пристрою очищення зменшується до 0,015 м.

*Розподіл магнітної індукції в пристрої очищення з радіально намагніченими магнітами.* Дослідження радіальної складової магнітної індукції  $B_r$  проводились на відстані 0,007 м і 0,015 м від осі пристрою очищення.

Кількість точок вимірювання дорівнювала 12. Число вимірювань у кожній точці вибрано рівним восьми при п'ятивідсотковому рівні значущості.

Для оцінювання однорідності дисперсій взято табличне значення критерію Кохрена  $G_r=0,2299$  [12] для числа порівнюваних дисперсій, що дорівнюють 12, при кількості паралельних дослідів, що дорівнює восьми.

Обчислене розрахункове значення критерію Кохрена –  $G_r=0,2180$  для відстані до осі пристрою 0,007 м та  $G_r=0,1223$  для 0,015 м. Так як  $G_r$  менше  $G_r$ , то дисперсії однорідні. Це підтверджує нормальний розподіл радіальної складової магнітної індукції та правильність вибору кількості паралельних дослідів.

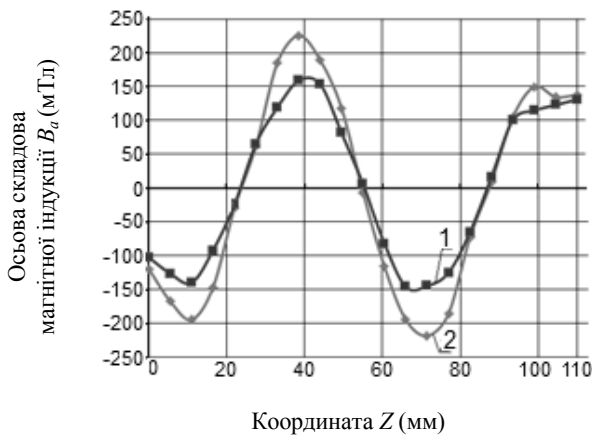


Рисунок 8 – Розрахункові криві розподілу осьової складової магнітної індукції на відстані 0,007 (1) та 0,015 м (2) від осі пристрою очищення

Розрахункові та експериментальні криві розподілу радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення приведені на рис. 9, 10.

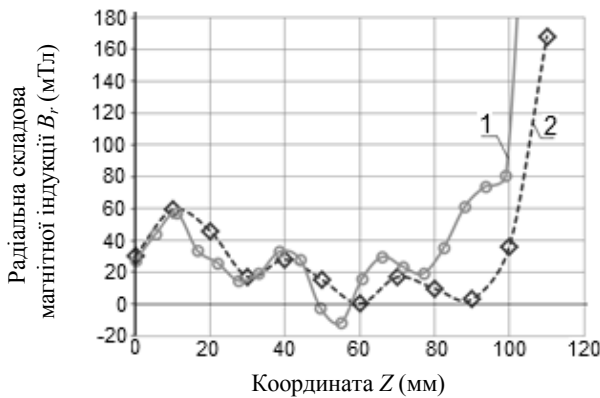


Рисунок 9 – Розрахункова (1) та експериментальна (2) криві розподілу радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою з радіальним намагнічуванням на відстані 0,007 м від осі

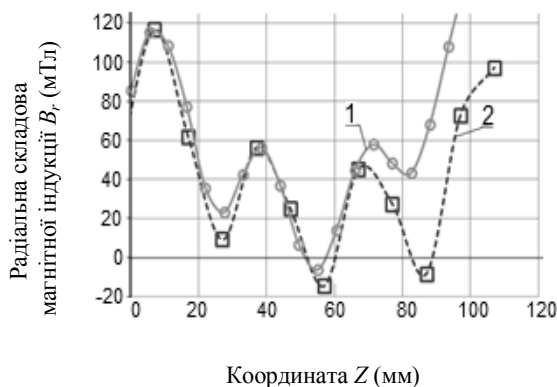


Рисунок 10 – Розрахункова (1) та експериментальна (2) криві розподілу радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою з радіальним намагнічуванням на відстані 0,015 м від осі

На рис. 9 розрахункова 1 та експериментальна 2 криві розподілу радіальної складової магнітної індукції загалом повторюють форму одна одної. Піки на кривих знаходяться в місцях розташування магнітів. При зміні координати  $Z$  від 0,085 до 0,110 м спосте-

рігається значне (із градієнтом від 8,27 Тл/м) зростання індукції. Це пов'язано із впливом на розподіл індукції патрубка відведення відходів із високою відносною магнітною провідністю (близько 7500 в.о.). Також при зміні  $Z$  від 0,085 м до 0,110 м спостерігається більш ніж двократне розходження розрахункових та експериментальних значень. Останнє є наслідком того, що у запропонованій комп'ютерній моделі магнітопровід суцільний і не враховано ефект насичення у сталі магнітопроводу.

На рис. 10 картина розподілу індукції подібна до зображеної на рис. 9. Піки на кривих більш виражені. Це пояснюється наближенням до внутрішньої грані кільця магнітів. На рис. 8, 9 піки в околі крайніх магнітів мають більшу амплітуду (приблизно в два рази), ніж в околі середніх. Останнє пов'язане з екрануванням середніх магнітів крайніми. При зміні  $Z$  від 0,085 до 0,110 м із вищезгаданих причин спостерігається зростання радіальної складової магнітної індукції із градієнтом від 8,11 Тл/м, а також більш ніж двократне перевищення розрахункових значень над експериментальними.

Розрахункові криві розподілу осьової складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення приведені на рис. 11. На ньому розрахункові криві 1 та 2 розподілу осьової складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення співпадають. Значні розходження значень (1,65–1,86 рази) спостерігаються при  $Z$  від 0,10 до 0,11 м. Це пояснюється різною відстанню до патрубка відведення відходів, а значить його більшим впливом на розподіл при меншій відстані. З іншого боку, із наближенням до граней кільцевих магнітів спостерігається викривлення кривої розподілу. На рис. 11 це виражається у вигляді локальних екстремумів. На кривій 2 на відрізку із  $Z$  від 0,04 до 0,07 м (між серединами двох середніх магнітів) аномальне викривлення кривої розподілу пов'язане із екрануванням магнітів сусідніми.

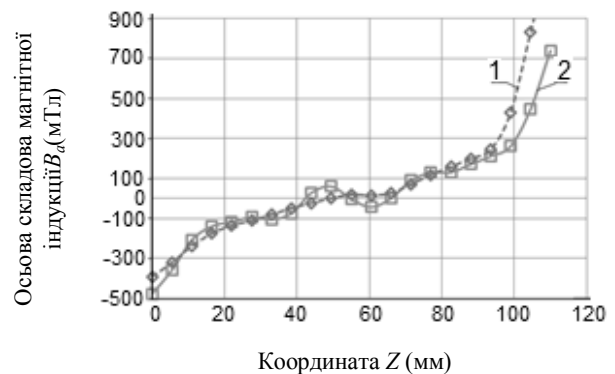


Рисунок 11 – Криві розподілу осьової складової магнітної індукції на відстані 0,007 (1) та 0,015 м (2) від осі пристрою з радіальним намагнічуванням

*Вибір намагнічування магнітів пристрою очищення.* Для пристрою очищення із осьовим намагніченням магнітів довжина відрізків із постійно направленим вектором складових магнітної індукції складає 0,030 м для  $B_r$  та  $B_a$ . При чому з урахуванням фазового здвигу довжина відрізків з постійно направленими векторами складових індукції становить 0,015 м (рис. 12,а). Для пристрою очищення з радіальним намагніченням – 0,025–0,110 м для  $B_r$  та

0,055 м для  $B_a$  (рис. 12,б). При цьому усереднений градієнт магнітної індукції для пристрою з осьовим намагніченням магнітів дорівнює 0,67 Тл/м, радіальним – 2,76 Тл/м. Тому для експериментальної апробації [5] вибрано пристрій із радіальним намагніченням магнітів. Виходячи з отриманих експериментальних даних, ефективна довжина робочої зони пристрою очищення прийнята за 0,050 м ( $Z$  змінюється від 0,060 до 0,110 м, рис. 12,б).

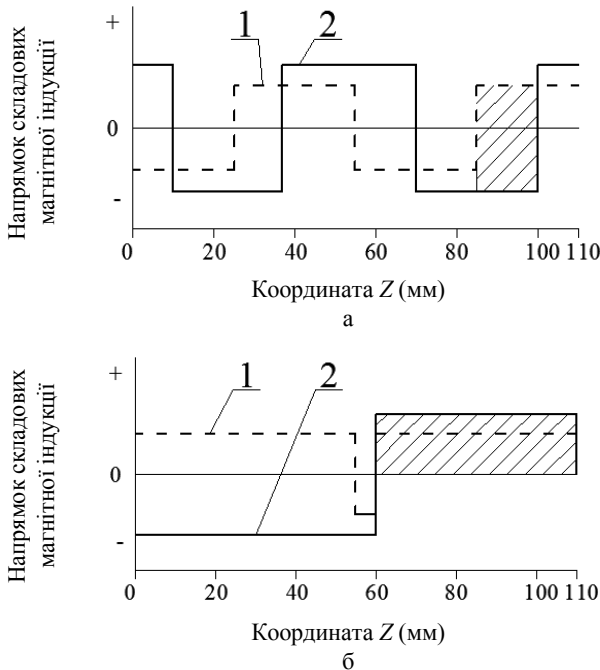


Рисунок 12 – Напрямок радіальної (1) та осьової (2) складових магнітної індукції на відстані 0,007 м від осі: а – осьове намагнічування; б – радіальне

Функцію розподілу радіальної складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення встановлено шляхом поліноміальної інтерполяції експериментальних даних:

– для відстані від осі пристрою очищення рівній 0,007 м, мТл:

$$B_r(Z) = -0,0068 Z^3 - 1,5971 Z^2 + 123,67 Z - 3136,1; \quad (5)$$

– для відстані від осі пристрою очищення рівній 0,015 м, мТл:

$$B_r(Z) = 0,0047 Z^3 - 1,1633 Z^2 + 94,912 Z - 2532,9; \quad (6)$$

де  $Z$  – координата точки вздовж осі пристрою очищення, мм.

Подібним чином функцію розподілу осьової складової магнітної індукції вздовж осі пристрою очищення для відстані від осі рівній 0,015 м, мТл:

$$B_a(Z) = 0,0206 Z^3 - 4,9465 Z^2 + 398,41Z - 10619; \quad (7)$$

Визначені інтегруванням з (5)–(7) середні значення радіальної складової магнітної індукції дорівнюють 23,5 мТл для відстані 0,007 м і 41,4 мТл для відстані 0,015 м, осьової – 222,2 мТл. Середнє значення радіальної складової магнітної індукції в робочій зоні пристрою становить 27 мТл, осьової – 135 мТл.

**ВИСНОВКИ.** Встановлена з експериментальних даних залежність дозволяє визначити розподіл радіальної складової магнітної індукції в пристрої очищення із квазізустрічним осьовим намагніченням кільцевих магнітів із відхиленням меншим за 13,6 %.

При довжині камери в 0,120 м встановлена ефективна довжина робочої камери при осьовому намагнічуванні магнітів складає 0,015 м, радіальному – 0,050 м.

Виходячи зі встановлених розподілів магнітної індукції, для створення в пристрої очищення фокусованого магнітного поля вибрано кільцеві магніти (матеріал неодим–залізо–бор, N38) з радіальним намагнічуванням. При цьому усереднена осьова складова магнітного поля у робочій зоні становить 0,135 Тл, радіальна – 0,027 Тл, ефективна довжина робочої камери – 0,05 м.

У подальших дослідженнях варто звернути увагу на зв'язок між амплітудою індукції магнітного поля в перерізі пристрою тазовнішим діаметром кільцевих магнітів.

*Автори висловлюють подяку технічному директору НПФ «Поліс-Н» (м. Харків), к.т.н. Круглову А.В. за співпрацю при виготовленні дослідних зразків пристрою очищення.*

#### ЛІТЕРАТУРА

1. The United Nations World Water Development: Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. – Paris: UNESCO, 2012. – Vol. 1. – 380 p.
2. Закон України «Про Загальнодержавну програму «Питна вода України на 2006-2020 роки»: [прийнятий Верховною Радою 3 березня 2005 р.] // Голос України. – 2005. – № 69 (15 квітня). – С. 10–12.
3. Ritu D. Ambashta, Mika Sillanpaa. Water purification using magnetic assistance: A review// Journal of Hazardous Materials. – 2010. – Vol. 180, iss. 1–3. – PP. 38–49.
4. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. – М.: Наука, 1972. – 224 с.
5. Терентьев О.М., Ворфоломеев А.В. Знезалізнення води осесиметричним фокусованим магнітним полем // Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті. – 2014. – № 1 (14). – С. 35–46.
6. Терентьев О.М., Ворфоломеев А.В. Эффективность использования магнитных устройств в системах очистки воды // Проблемы недропользования: сборник научных трудов. Часть II. – 2012. – С. 154–156.
7. Lang M. Fast calculation method for the for ce-sand stiff nesses of permanent-magnet bearings. 8<sup>th</sup> International // Symposium on Magnetic Bearing. – Mito, Japan, 2002. – PP. 26–28.
8. Ravaud R., Lemarquand G., Lemarquand V., Depollier C. Analytical Calculation of the Magnetic Field Created by Permanent-Magnet Rings // IEEE transactions on magnetics. – 2008. – Vol. 44, № 8. – PP. 1982–1989.

9. Резинкина М.М. Численный расчет магнитного поля и магнитного момента ферромагнитных тел сложной пространственной конфигурации // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79, № 8. – С. 8–17.

10. Шульженко Н.Г., Пантелют М.Г., Руденко Е.К., Сафонов А.Н. Расчёт трёхмерных стационарных магнитных полей методом конечных элементов // Электротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 5. – С. 40–43.

11. Терзян А.А., Сукиасян Г.С., Пароникян А.Е. О расчете магнитных полей методом конечных элементов с динамической композицией элементов дискретизации // Известия Национальной академии наук Армении и ГИУА. Серия технических наук. – 2005. – Т. 58, № 2. – С. 332–339.

12. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

## SELECTION OF MAGNETIZATION OF RING MAGNETS FOR WATER PURIFICATION DEVICE BY FOCUSED MAGNETIC FIELD

**O. Terentiev, A. Vorfolomeiev**

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

prosp. Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: a.vorfolomeiev@kpi.ua

Development of innovative method of water purification by focused magnetic field has significant importance. This research is devoted to the selection of the magnetic system (the technique of ring magnets magnetization), which provides the maximum length of effective zone of purification device working chamber. The radial and axial magnetization of ring magnets of such device has been considered. To find the calculated values of magnetic induction the computer model of magnetic system of purification device has been developed. The experimental measurements of radial component of magnetic induction have included 22 points, and 8 parallel tests in each point. By method of trigonometric and polynomial interpolation the dependence (which provides the accuracy up to 13.6%) of radial component of the magnetic induction in the working chamber has been defined. The effective length of working chamber of purification device with the axial magnetization of magnets is 0.015 m, radial – 0,050 m. Thus, the ring magnets with the radial magnetization have been selected for magnetic purification device. Consequently the average radial component of the magnetic induction in the working zone of such device is 27 mTl, axial – 135 mTl.

**Key words:** purification, magnet, induction, magnetization.

### REFERENCES

1. The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk, (2012), vol. 1, UNESCO, Paris, France.

2. The Law of Ukraine no. 3933-VI (2005) "On General State Program "Drinking water of Ukraine for years 2005-2020", *Off. Verkh Rad Ukraine*, no. 15:243.

3. Ritu, D. Ambashta, A., and Sillanpaa, M. (2010), "Water purification using magnetic assistance: A review", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 180, iss. 1–3, pp. 38–49.

4. Artsimovich, L.A., Luk'yanov, S.Yu., (1972), *Dvizhenie zaryazhennykh chastits v elektricheskikh i magnitnykh poliakh* [Movement of charged particles in electrical and magnetic fields], Nauka, Moscow, USSR.

5. Terentiev, O.M., Vorfolomeiev, A.V. (2014), "Water deferrization by axisymmetric focused magnetic field", *Voda i vodochysni tekhnologii. Naukovo-tekhnichni visti*, no. 1 (14), pp. 35–46.

6. Terentiev, O.M., Vorfolomeiev, A.V. (2012), "Efficiency of use of magnetic devices in water purification systems", *Problemy nedropolzovaniya: sbornik nauchnykh trudov*, vol. 2, pp. 154–156.

7. Lang, M. (2002), "Fast calculation method for the forces and stiffnesses of permanent-magnet bearings",

*8<sup>th</sup> International Symposium on Magnetic Bearing*, Japan, 2002, Mito, pp. 26–28.

8. Ravaud, R., Lemarquand, G., Lemarquand, V., and Depollier, C. (2008), "Analytical Calculation of the Magnetic Field Created by Permanent-Magnet Rings", *IEEE transactions on magnetics*, vol. 44, no. 8, pp. 1982–1989.

9. Rezinkina, M.M. (2009), "Numerical calculation of the magnetic field and magnetic moment of ferromagnetic bodies with a complex spatial configuration", *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, vol. 79, no. 8, pp. 8–17.

10. Shulzhenko, N.G., Pantelyat, M.G., and Safonov, A.N. (2009), "Calculation of three-dimensional stationary magnetic fields by finite-element method", *Elektrotekhnika i Elektromekhanika*, vol. 5, pp. 40–43.

11. Terzyan, H.A., Sukiasyan, H.S., and Paronikyan, A.E. (2005), "On calculation of magnetic fields by finite-element method with dynamic composition of discretization elements", *Izvestiya Natsionalnoy akademi nauk Armeniia GIUA. Seriya tekhnicheskoye nauki*, vol. 58, no. 2, pp. 332–339.

12. Spiridonov, A.A. (1981), *Planirovaniye eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Experiment planning in the investigation of technological processes], Mashinostroeniye, Moscow, USSR.

Стаття надійшла 24.03.2015.