

**ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ВОДИ ОСЕСИМЕТРИЧНИМ  
ФОКУСОВАНИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ****О.М. Терентьев, А.В. Ворфоломеев**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

e-mail: o.terentiev@kpi.ua, a.vorfolomeiev@kpi.ua

У дослідженні розглянуто вплив постійного осесиметричного фокусованого магнітного поля на домішки заліза у воді. Основну увагу надано встановленню з результатів експериментальних досліджень математичної моделі процесу знезалізнення води пристроєм магнітного очищення. При дослідженні очищення води осесиметричним фокусованим магнітним полем за параметр оптимізації вибрано ефективність знезалізнення, головні чинники експерименту – швидкість потоку води та частку відходів. Під час експериментального дослідження загальний вміст заліза у воді знижувався з 1,10 до 0,28 мг/дм<sup>3</sup> та з 0,62 до 0,23 мг/дм<sup>3</sup>, каламутність – з 5,91 до 0,88 мг/дм<sup>3</sup>. Встановлена регресійна модель ефективності знезалізнення води осесиметричним фокусованим магнітним полем є адекватною за F-критерієм Фішера при швидкості потоку 0,14-0,40 м/с та частці відходів 0,10-0,35 в.о. Розходження між побудованими із рівняння регресії кривими та експериментальними точками знаходиться у межах 2,57 % (0,016 в.о.). Для розрахунку найбільшої ефективності знезалізнення води при вказаній зміні головних чинників застосовано приведення регресійної моделі до канонічного вигляду, а також регресійне рівняння додатково вирішено методом ітерацій. Таким чином, найбільша ефективність знезалізнення води пристроєм магнітного очищення склала 0,777 в.о. при швидкості 0,31 м/с та частці відходів 0,10 в.о.

*Ключові слова:* знезалізнення води, магнітне поле, ефективність очищення, модель.

**Вступ**

Загальнодержавна програма «Питна вода України на 2006-2020 роки» визначає очищення води пріоритетним напрямком наукової діяльності. Способи очищення води поділяють на фізичні та хімічні. Використання хімічних способів пов'язано з використанням реагентів та складного устаткування з високими масогабаритними показниками. До того ж, хімічна обробка змінює хімічний склад води [1], у довгостроковій перспективі може завдавати шкоду навколишньому середовищу, життю і здоров'ю людей, тварин тощо. Крім того, внаслідок постійної зміни показників потоку води є неможливим точний розрахунок потрібної кількості реагентів [2]. Останнє зумовлює або недостатнє очищення, або забруднення води залишковими реагентами.

Магнітна обробка знайшла широке застосування в сучасній промисловості. Однак, поряд з розвитком методик розрахунків магнітних та електричних параметрів пристроїв для магнітної підготовки рідин, опублікуванням результатів виробничих випробувань, які підтверджують ефективність магнітної обробки, теоретичне пояснення її фізичних та фізико-хімічних процесів суперечливе. Роботи Класена В.І., Стукалова П.С. та інших містять відомості про зміни в магнітному полі таких властивостей води, як в'язкість, щільність, електропровідність, поверхневий натяг, потенціал тощо [3-5]. До способів, при яких магнітне поле впливає на структуру домішок, віднесено запобігання накипоутворенню, солевідкладенню на робочих поверхнях. У них хімічний склад оброблюваної рідини залишається зазвичай незмінним. Сюди відноситься спосіб очищення води від домішок шляхом їх зв'язування постійним магнітним полем у кристалічні утворення [1, 2, 6-8]. При цьому, наприклад, для кальцію під дією магнітного поля утворюються кристали арагоніту. На відміну від кальциту, вони не відкладаються у вигляді накипу на стінках труб. Останнє є важливим для систем опалення, так як накип зменшує тепловіддачу [1, 2]. Арагоніт є менш

стабільною за кальцит формою, так як енергія його основного електронного стану на 28 eВ більша [6]. Тому для формування кристалів арагоніту кінетична енергія заряджених йонів кальцію та карбонатів має бути збільшена. Це досягається впливом на розчин високої температури і (чи) тиску або дією спрямованого магнітного поля [6, 7]. В останньому випадку ефект досягається внаслідок синергетичної дії магнітного поля, наслідкових електромагнітних збурень у потоці та місцевих електричних полів навколо провідних поверхонь [6]. Внаслідок більшої енергії основного стану, а отже нестабільності, з часом арагоніт перетворюється на кальцит. За даними досліджень [2, 8] у випадку магнітної обробки води рівень арагоніту серед утворень не змінювався від початку обробки і за 200 годин після неї. Усі результати досліджень у цьому напрямку отримані експериментальним шляхом.

До способів, при яких магнітним полем керують рухом намагнічених частинок, відносяться магнітна сепарація, фільтрування. Використання способів обмежується вловлюванням феромагнітних включень. При магнітному фільтруванні феромагнітні домішки осаджуються на фільтруючому намагніченому завантаженні. Математичне моделювання процесів магнітного фільтрування на намагніченому завантаженні, методику розрахунку його ефективності наведено в [9]. При чому ефективність очищення практично не змінюється за час захисної дії фільтру (час фільтроциклу). Використання постійного магнітного поля змінного градієнту у виробничих пристроях очищення та теоретичні засади його функціонування описані в [10]. Очищувана вода з утвореними в ній феромагнітними агрегатами надходить у зону дії магнітного поля зі змінним градієнтом. При цьому гідравлічна крупність агрегатів збільшується. Швидкість їх направленої руху зростає при наближенні до поверхні магніту, тобто зростає з ростом магнітного силового чинника. Таке очищення передбачає попереднє введення в очищувану воду магнітосприйнятливої реактиву (магнетиту) і коагулянту або луку. Це є необхідним для створення агрегатів, до складу яких входять феромагнітні частинки магнетиту і продукти коагуляції з феромагнітними властивостями. Таким чином, даний спосіб очищення є магнітно-реагентним. У [11] описується використання для утворення магнітної пастки осцилюючого магнітного поля, що дозволяє локалізувати феро- та парамагнетичні частинки в певній області трубопроводу. У даній моделі неявно виражено параметри водного потоку.

Фокусоване магнітне поле розглянуте в [12]. У той же час дослідження впливу фокусованого магнітного поля на видалення домішок з потоку води відсутні. Актуальним є проведення такого дослідження, що закладе підґрунтя для розробки нового способу очищення води. Згідно [13] домішки заліза у вигляді феромагнітних агломератів та феромагнітних форм оксиду заліза взаємодіють з магнітним полем. Також у магнітному полі пристрою очищення пришвидшуються процеси коагуляції заліза в інших формах [14, 15]. Тому для дослідження обрано очищення води фокусованим магнітним полем від домішок заліза.

**Метою** дослідження є розробка математичної моделі процесу знезалізнення води постійним осесиметричним фокусованим магнітним полем. Для досягнення поставленої мети сформульовані такі задачі:

1. Визначити параметр оптимізації та головні чинники при експериментальному дослідженні знезалізнення води осесиметричним фокусованим магнітним полем.
2. Встановити регресійну модель ефективності знезалізнення води осесиметричним фокусованим магнітним за результатами проведеного експерименту.
3. Встановити максимальну ефективність знезалізнення води в обраних межах зміни чинників експерименту.

#### **Планування експериментального дослідження**

Ефективність очищення води від домішок заліза (ефективність знезалізнення) обрано за головний параметр оптимізації, оскільки вона відповідає вимогам до таких параметрів,

описаних в [16]. Ефективність очищення  $\varepsilon_i$  визначалась як зменшення вмісту домішок заліза у воді відносно початкового, в.о. (відносних одиниць):

$$\varepsilon_{Fe} = (C_0 - C_k) / C_0, \quad (1)$$

де  $C_0$  і  $C_k$  – відповідно, початкова (до очищення) і кінцева (після очищення) концентрація загального заліза, мг/дм<sup>3</sup>.

У той же час каламутність води залежить від наявності в ній зважених частинок, у тому числі й домішок заліза. Тому каламутність води не було обрано змінною стану (не виконується вимога незалежності).

На ефективність очищення води від заліза магнітним полем впливають наступні групи чинників:

- параметри домішок (маса, радіус, наявність заряду та феромагнітних властивостей, початкова концентрація);
- параметри гідросистеми (швидкість потоку води, її густина, наявність збурень потоку);
- параметри пристрою очищення (розподіл індукції магнітного поля, розміри робочої камери).

З умов відповідності вимогам до чинників експерименту, наведеним в [16], і з приведених чинників ефективності очищення води за головні обрано:

- $x_1$  – швидкість потоку води, м/с;
- $x_2$  – частку відходів – відношення об'ємної витрати відходів до загальної витрати води через пристрій магнітного очищення, в.о.

Другий чинник вибрано з міркувань, що з наближенням до центральної осі пристрою магнітного очищення складова магнітної індукції, перпендикулярна до напрямку потоку, прямуватиме до 0. Таким чином на частину води, що перебуває в околі центральної осі, магнітне поле впливатиме менше, ніж на частину води біля стінок робочої камери. Тому на центральній осі пристрою очищення розміщено патрубок відведення відходів. Через нього частина потоку з околу центральної осі пристрою очищення відділяється від очищеного потоку і направляється у відходи.

Задача оптимізації – знайти значення швидкості потоку води та частки відходів для очищення постійним осесиметричним фокусованим магнітним полем, які б забезпечили максимальну ефективність очищення від заліза (зnezалізнення) при визначених обмеженнях на головні чинники. За невизначеної залежності ефективності магнітного znezалізнення води від обраних чинників для моделювання цього процесу серед класів регресійних моделей вибрано поліноміальний [17]. При цьому для спрощення моделі обрано другий її порядок. Якщо обрана модель не відповідатиме перевірці на адекватність, то ступінь полінома буде збільшено. Таким чином, математична модель оптимізації має вигляд:

$$\begin{aligned} \max y &= \max(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2), \\ x_{1\min} &\leq x_1 \leq x_{1\max} \quad (x_1 > 0), \quad x_{2\min} \leq x_2 \leq x_{2\max} \quad (x_2 > 0), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $y$  – параметр оптимізації (ефективність очищення води від заліза);  $b$  – коефіцієнти рівняння регресії;  $x_{i\min}$ ,  $x_{i\max}$  – відповідні обмеження чинників  $x_i$ .

Обрана регресійна модель оптимізації описується квадратичною залежністю параметра оптимізації від чинників. Для отримання такої моделі необхідно щонайменше 3 рівні варіювання кожного з чинників [18]. Тому з критерію мінімуму кількості дослідів [16, 19] число рівнів варіювання головних чинників дослідження прийнято рівним 3. При такому числі рівнів згідно [17] для дослідження ефективності очищення обрано центральний композиційний план. Так як число чинників дослідження менше за 5, то згідно [17] ядром центрального композиційного плану прийнято повночинниковий експеримент типу  $2^2 - 2$

чинники, 4 досліди. При такому ядрі плану виконується роздільна оцінка всіх лінійних і парних ефектів взаємодії головних чинників.

За критерій оптимальності плану вибрано ортогональний, так як при ньому всі коефіцієнти регресії визначаються незалежно один від одного. Таким чином зменшується об'єм розрахунків у порівнянні з ротатабельним планом [17]. Згідно з прийнятим критерієм оптимальності плану дослідження число дослідів у центрі плану рівне 1. Також до числа дослідів ядра плану додається 4 досліди «зіркових» точок. Плечем «зіркової» точки обрано  $\alpha=1$ . Таким чином загальне число дослідів дорівнює 9 (4 основних та 5 додаткових).

У табл. 1 наведено матрицю планування експериментального дослідження ефективності очищення води в умовних змінних відповідно до [17, 20]. Експериментальне дослідження проводилось із постійною часткою відходів і зміною швидкості потоку. Таким чином було сформовано 3 блоки по 3 експерименти кожен.

Таблиця 1. Матриця планування експерименту в умовних змінних

№ дослідів	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2$	$x_1'$	$x_2'$	$y$
1	+	+	+	+	+1/3	+1/3	$y_1$
2	+	-	+	-	+1/3	+1/3	$y_2$
3	+	+	-	-	+1/3	+1/3	$y_3$
4	+	-	-	+	+1/3	+1/3	$y_4$
5	+	+	0	0	+1/3	-2/3	$y_5$
6	+	-	0	0	+1/3	-2/3	$y_6$
7	+	0	+	0	-2/3	+1/3	$y_7$
8	+	0	-	0	-2/3	+1/3	$y_8$
9	+	0	0	0	-2/3	-2/3	$y_9$
$N_z$	9	6	6	4	2	2	

За нижній рівень варіювання швидкості потоку води вибрано 0,14 м/с – швидкість при мінімальній подачі, що досягається дроселюванням потоку через вентиль ВН12 експериментальної установки (див. рис. 1) при відкритому ВН10. За верхній рівень варіювання швидкості води вибрано 0,40 м/с – швидкість при максимальній подачі насоса експериментальної установки, що досягається при відкритих вентилях ВН12 та ВН10. За нульовий рівень із умови симетричності рівнів обрано швидкість 0,22 м/с, як найбільш рівновіддалену точку від нижнього (0,14 м/с) та верхнього рівнів (0,40 м/с), якої можна досягти дроселюванням потоку через вентиль ВН12 при змінній частці відходів.

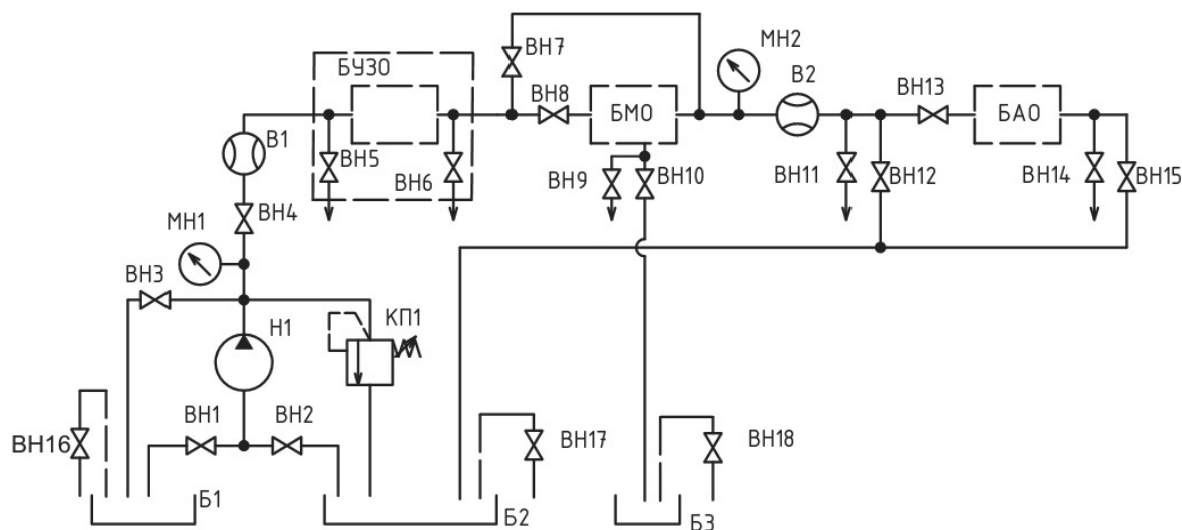


Рис. 1. Схема гідралічна принципова ультразвукової магнітної адсорбційної системи доочищення води.

За нижній рівень варіювання частки відходів вибрано 0,10 в.о. – найменшу частку відходів, що досягається дроселуванням потоку через вентиль ВН10. Із техніко-економічного обґрунтування зменшення кількості відходів за верхній рівень варіювання прийнято 0,35 в.о. З умови симетричності рівнів центрального композиційного плану за нульовий рівень частки відходів вибрано 0,20 в.о., як найбільш рівновіддалену точку від нижнього та верхнього рівнів, якої можна досягти дроселуванням потоку через вентиль ВН10.

### Засоби дослідження

Дослідження ефективності знезалізнення води фокусованим магнітним полем проводилось на ультразвуковій магнітній адсорбційній системі доочищення води (рис. 2). У роботі перебував лише блок магнітного очищення (БМО), блок адсорбційного очищення (БАО) та блок ультразвукової обробки (БУЗО) – відключені. При цьому відкриті лише вентиля ВН1, ВН4, ВН8, ВН10, ВН12 (рис. 1), а в БУЗО відключено живлення на його блоці керування (БК БУЗО) (рис. 2). Робоча камера блоку магнітного очищення має довжину 0,100 м і радіус 0,022 м. Чотирма постійними магнітами (N38, сплав неодим-залізо-бор) в ній створюється магнітне поле із усередненим значенням магнітної індукції близьким до 0,14 Тл. Більш детально конструкцію блоку магнітного очищення описано в [21]. Для визначення швидкості потоку води та частки відходів в пристрої магнітного очищення обрано ультразвукові витратоміри Hydrus Hydrometer (Німеччина) (В1, В2 на рис. 1) із максимальною похибкою вимірювання, що дорівнює 1 %. В якості вихідної взято воду зі свердловини на території садового товариства Бориспільського району Київської області.

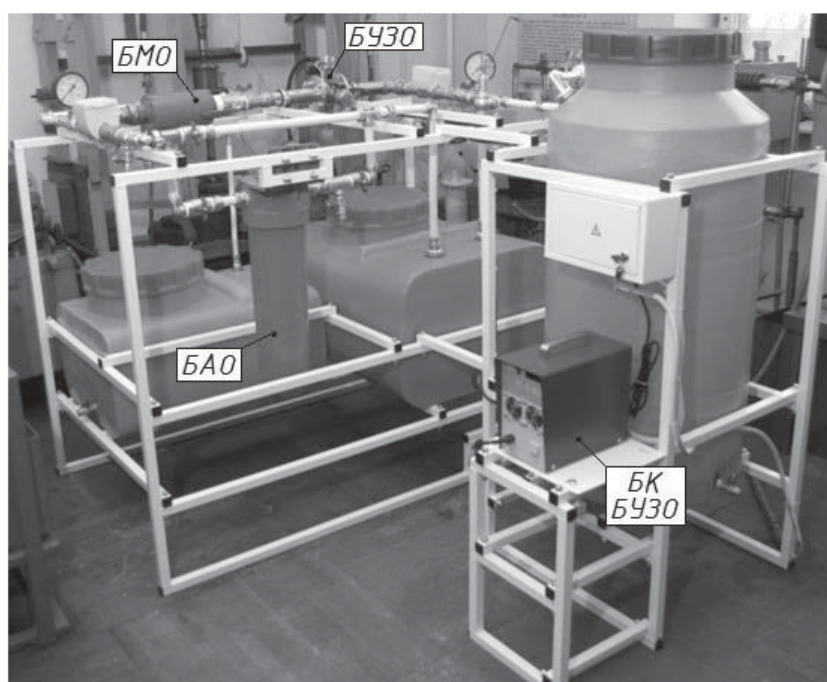


Рис. 2. Ультразвукова магнітна адсорбційна система доочищення води.

При дослідженні очищення води фокусованим магнітним полем від заліза визначення вмісту заліза та каламутності води проводилось в Лабораторії йонного обміну та адсорбції Хіміко-технологічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Загальна концентрація заліза у воді визначалася колориметричним методом за ГОСТ 4011-72 «Вода питьевая. Методы измерения массовой концентрации общего железа», каламутність – за ГОСТ 3351-74 «Вода питьевая. Методы определения вкуса, запаха, цветности и мутности». Відбір та транспортування проб до лабораторії проводилося згідно ДСТУ ISO 5667-3-2003 «Якість води. Відбір проб. Частина 3.

Керівництво по зберіганню і поводженню з пробами» з урахуванням ГОСТ 4011-72 «Вода питьевая. Методы измерения массовой концентрации общего железа».

### Результати дослідження

Під час експериментального дослідження загальний вміст заліза у воді знижувався з 1,10 до 0,28 мг/дм<sup>3</sup> та з 0,62 до 0,23 мг/дм<sup>3</sup>, каламутність – з 5,91 до 0,88 мг/дм<sup>3</sup>. При цьому загальний солевміст становив 194-235 мг/дм<sup>3</sup>, рН – 6,88-7,38. Визначена за (1) ефективність знезалізнення води в кожному досліді приведена в табл. 2.

Таблиця 2. Результати експериментальних досліджень

№ досліді	Швидкість потоку води, м/с	Частка відходів, в.о.	Ефективність знезалізнення, в.о.
1	0,40	0,35	0,68
2	0,14	0,35	0,62
3	0,40	0,10	0,74
4	0,14	0,10	0,68
5	0,40	0,20	0,63
6	0,14	0,20	0,53
7	0,22	0,35	0,69
8	0,22	0,10	0,75
9	0,22	0,20	0,61

Зниження концентрації заліза у воді при проходженні пристрою очищення зумовлене осіданням на його стінках феромагнітних агломератів та феромагнітних форм оксиду заліза. Також у магнітному полі пристрою очищення пришвидшувались процеси коагуляції заліза в інших формах. Згідно табл. 2 зі зростанням швидкості потоку води з 0,14 до 0,22 м/с ефективність знезалізнення збільшувалась. Подальше зростання швидкості потоку до 0,40 м/с призводило до зниження ефективності знезалізнення. Це пояснюється залежністю наявних у пристрої очищення гідравлічних збурень та сили, яка діє на феромагнітні домішки з боку потоку води, від швидкості потоку. Ця сила зі збільшенням швидкості потоку зростає квадратично. Феромагнітні домішки виносяться з пристрою очищення, не притягуючись до його стінок. Хаотичні гідравлічні збурення, з одного боку, перешкоджають притягуванню домішок і подальшому осадженню їх на стінках пристрою, з іншого – сприяють цьому. Останнє відбувається при переміщенні домішок в область із сильнішим магнітним полем (біля стінок пристрою).

На рис. 3 показана експериментальна залежність ефективності знезалізнення води від частки відходів. Крива залежності ефективності знезалізнення води від частки відходів має форму параболи. Ефективність знезалізнення при збільшенні частки відходів від 0,10 в.о. до 0,20 в.о. зменшується в 1,24 рази до 0,61 в.о. при швидкості потоку 0,20 м/с. Це пояснюється зростанням гідравлічних збурень. Подальше збільшення ефективності до 0,69 в.о. при частці витрат 0,35 в.о. пов'язане з утворенням воронки. Таким чином фіктивно збільшується радіус патрубка відведення відходів. Об'єм очищеної води в пристрої очищення проходить ближче до стінок пристрою, де магнітна індукція більша. Ці чинники підвищують ефективність осадження феромагнітних домішок на стінках пристрою. Підвищення частки відходів не є вигідним режимом для технології очищення магнітним полем, так як веде до зменшення об'єму кінцевого продукту.

На рис. 4 приведена експериментальна залежність ефективності зниження каламутності води від швидкості потоку.

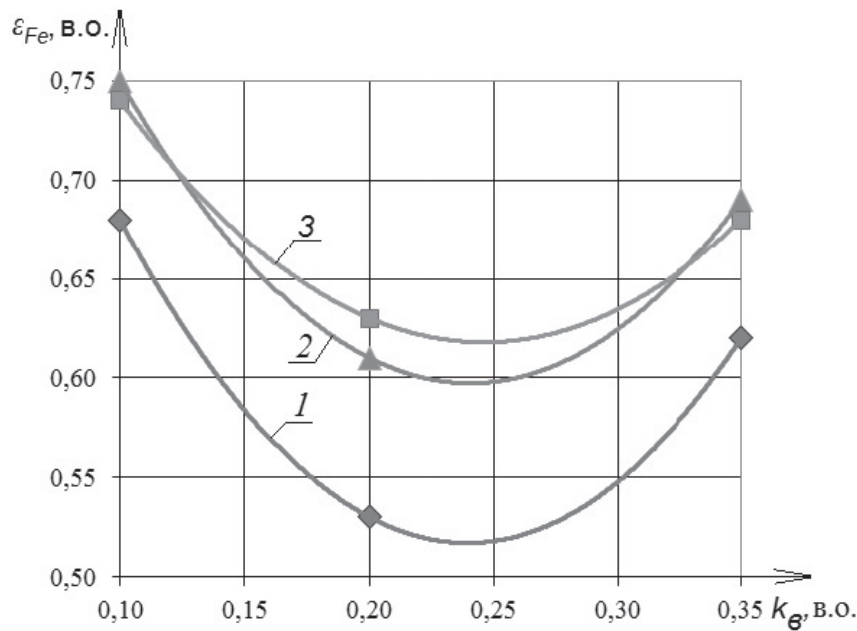


Рис. 3. Залежність ефективності знезалізнення води від частки відходів: 1 – для швидкості потоку 0,14 м/с; 2 – 0,22 м/с; 3 – 0,40 м/с.

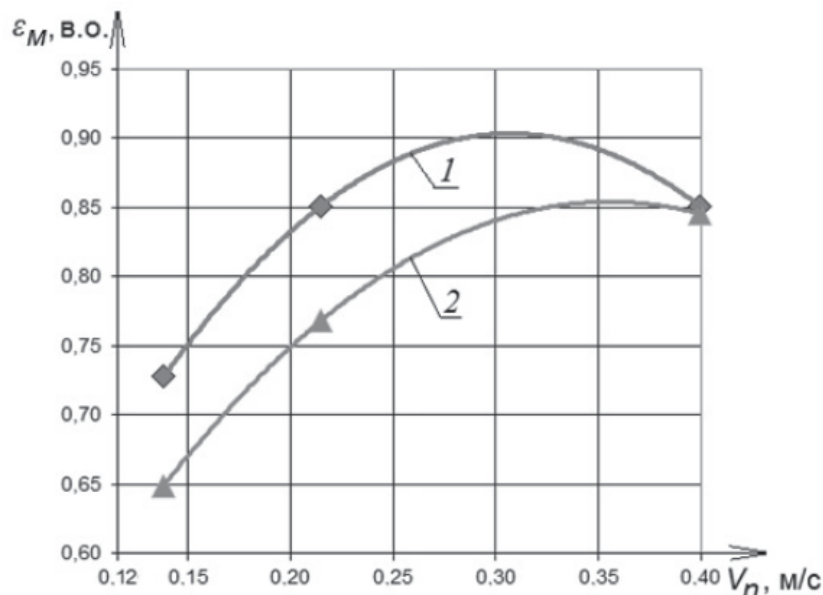


Рис. 4. Залежність ефективності зниження каламутності води від швидкості потоку: 1 – для частки відходів рівній 0,10 в.о.; 2 – 0,20 в.о.

Каламутність води залежить від загального вмісту у ній заліза. Тому залежність ефективності зниження каламутності води від швидкості потоку (рис. 4) загалом повторює залежність ефективності знезалізнення.

З експериментальних даних (див. табл. 2) та матриці планування експерименту в умовних змінних (табл. 1) розраховано коефіцієнти рівняння регресії (табл. 3).

Так як дублювання дослідів при експериментальному дослідженні не проводилось, додатково було проведено 4 паралельних дослідів в «нульовій точці» (0,22 м/с; 0,20 в.о.). За їх результатами дисперсія відтворюваності експерименту при 3 ступенях свободи склала  $3,6 \cdot 10^{-4}$ . Розрахована дисперсія коефіцієнтів регресії за 9 дослідів становить  $0,4 \cdot 10^{-4}$ . Обчислене за розрахункове значення  $t_p$  критерію Стюдента занесено до табл. 3. При 3 ступенях свободи і 5-ти відсотковому рівні значущості табличне значення критерію Стюдента  $t_m=3,18$  [17]. Із табл. 3, розрахункові значення  $t_p$  критерію Стюдента більші за табличні  $t_m$ . З цього випливає, що всі коефіцієнти рівняння регресії є значущими.

Таблиця 3. Розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії

№ досліду	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{12}$	$b_{11}$	$b_{22}$
1	0,68	0,68	0,68	0,68	0,23	0,23
2	0,62	-0,62	0,62	-0,62	0,21	0,21
3	0,74	0,74	-0,74	-0,74	0,25	0,25
4	0,68	-0,68	-0,68	0,68	0,23	0,23
5	0,63	0,63	0,00	0,00	0,21	-0,42
6	0,53	-0,53	0,00	0,00	0,18	-0,35
7	0,69	0,00	0,69	0,00	-0,46	0,23
8	0,75	0,00	-0,75	0,00	-0,50	0,25
9	0,61	0,00	0,00	0,00	-0,41	-0,41
Розраховане значення	0,712	2,204	-3,526	-0,082	-3,499	7,289
Критерій $t_p$	112,53	348,32	557,25	12,96	552,98	1151,96

Із таблиці 3 рівняння регресії, яке описує залежність ефективності знезалізнення води від швидкості потоку  $v_n$  та частки відходів  $k_n$ , в.о.:

$$\varepsilon_{Fe} = 0,712 + 2,204v_n - 3,526k_n - 0,082v_nk_n - 3,499v_n^2 + 7,289k_n^2, \quad (3)$$

$$0,14 \leq v_n \leq 0,40 \text{ (м/с)}, \quad 0,10 \leq k_n \leq 0,35 \text{ (в.о.)}.$$

Для перевірки адекватності отриманої моделі було обрано F-критерій Фішера. Розрахована дисперсія адекватності складає 0,000312. Звідси визначене розрахункове значення F-критерію Фішера –  $F_p=7,8$ . При п'ятивідсотковому рівні значущості табличне значення F-критерію Фішера при 3 ступенях свободи для меншої дисперсії та 3 ступенях свободи для більшої становить  $F_{таб}=9,3$  [17]. Так як розрахункове значення F-критерію Фішера менше за табличне ( $7,8 < 9,3$ ), отримана регресійна модель є адекватною при вибраному рівні значущості.

На рис. 5 представлена розрахована за отриманим рівнянням регресії (3) залежність ефективності знезалізнення води від швидкості потоку з нанесеними експериментальними точками. Розходження між побудованими із рівняння регресії кривими та експериментальними точками знаходиться у межах 1,94 % (0,0146 в.о.) при частці відходів 0,10 в.о., 2,38 % (0,0150 в.о.) при частці відходів 0,20 в.о. та 2,57 % (0,0160 в.о.) при частці відходів 0,20 в.о. Отримані розходження свідчать про узгодження регресійної моделі з експериментальними точками.

Поставлена задача оптимізації – пошук максимальної ефективності знезалізнення води. Для цього поліном 2-го порядку регресійної моделі (3) було приведено до канонічної форми. При цьому часткові похідні ефективності знезалізнення води прирівняно до нуля й обчислено визначник отриманої системи рівнянь:

$$\partial \varepsilon_{Fe} / \partial v_n = 2,204 - 0,082k_n - 6,998v_n, \quad (4)$$

$$\partial \varepsilon_{Fe} / \partial k_n = -3,526 - 0,082v_n + 14,578k_n, \quad (5)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 6,998 & 0,082 \\ 0,082 & 14,578 \end{vmatrix} = 102,01. \quad (6)$$



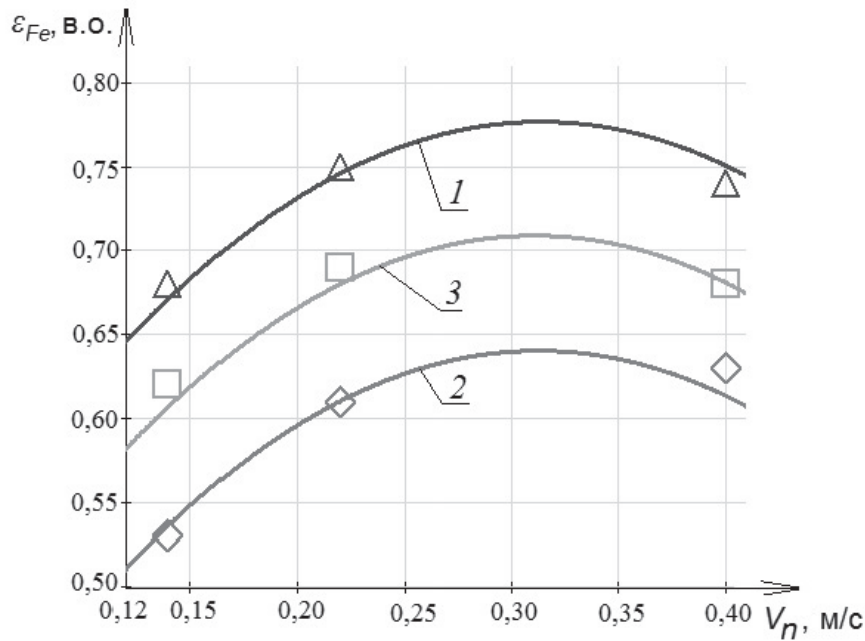


Рис. 5. Розрахована з рівняння регресії залежність ефективності знезалізнення води від швидкості потоку: 1 – для частки відходів рівній 0,10 в.о.; 2 – 0,20 в.о.; 3 – 0,35 в.о.

Так як визначник (6) не дорівнює нулю, досліджувана поверхня має центр. Обчислені координати центру становлять (0,31 м/с; 0,24 в.о.). При цьому значення параметра оптимізації в новому центрі координат складає 0,627 в.о. Вирішивши характеристичне рівняння, визначено коефіцієнти рівняння регресії у канонічній формі:

$$\varepsilon_{Fe} - 0,627 = -3,499v_n'^2 + 7,289k_e'^2. \quad (7)$$

Суми коефіцієнтів регресії у вихідному і канонічному рівняннях рівні і дорівнюють 3,16. Це засвідчує правильність приведення. Ефективність очищення, розраховану за (3), приведено у вигляді поверхні на рис. 6, а; розраховану за (7) – у вигляді контурних ліній (ізоліній) на рис. 6, б.

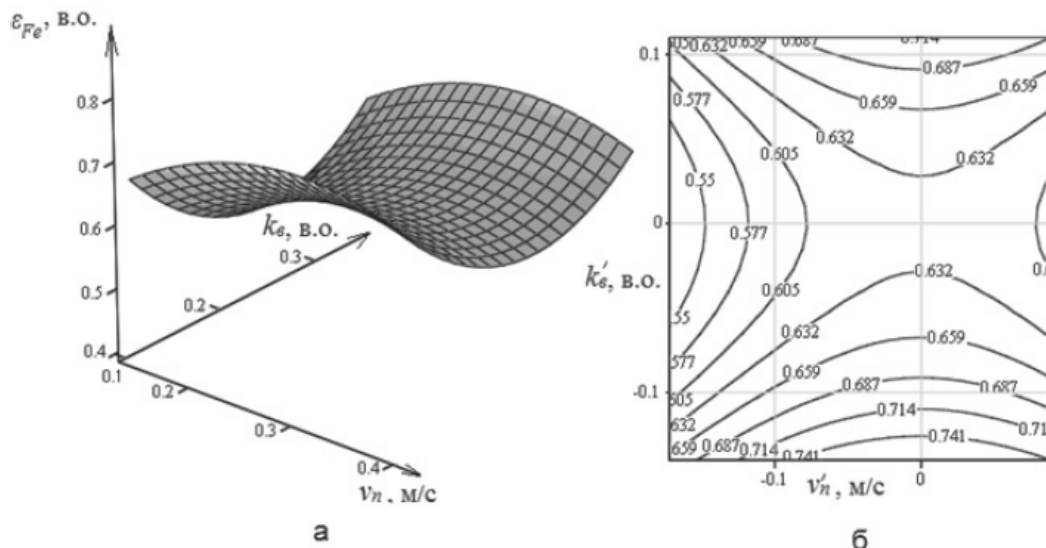


Рис. 6. Залежність ефективності знезалізнення води від швидкості потоку та частки відходів.

У рівнянні (7) коефіцієнти біля  $v_n'$  та  $k_e'$  мають різний знак. На рис. 6,б це виражається гіперболічним характером контурних ліній. Тобто тип поверхні ефективності знезалізнення – мінімакс [17]. У такому випадку оптимум (максимум ефективності) визначається при русі

вздовж осі  $k'_e$  при  $v'_n=0$  м/с ( $v_n=0,31$  м/с). Залежність ефективності знезалізнення від частки відходів досягає мінімуму в точці  $k'_e=0$  в.о. ( $k_e=0,24$  в.о.). Тому в проміжку від 0,10 до 0,35 в.о. максимум ефективності знезалізнення досягатиметься в крайніх точках. При швидкості потоку води 0,31 м/с ефективність її знезалізнення при частці відходів 0,10 в.о. становить 0,777 в.о., при 0,35 в.о. – 0,709 в.о. Таким чином, при зміні швидкості потоку від 0,14 до 0,40 м/с та зміні частки відходів від 0,10 до 0,35 в.о. найбільша ефективність знезалізнення дорівнює 0,777 в.о. при швидкості 0,31 м/с та частці 0,10 в.о. Для перевірки точки оптимуму ефективність очищення обчислено з рівняння (3) на ЕОМ шляхом ітерації з кроком 0,001 м/с та 0,001 в.о. Отримана таким чином ефективність знезалізнення становила 0,777 в.о. при швидкості 0,314 м/с та частці 0,100 в.о. Розходження між отриманими за двома способами точками з максимальною ефективністю знезалізнення по швидкості не більше 0,004 м/с (1,3 %). Це свідчить про вірність знаходження точки з максимальною ефективністю знезалізнення.

### Висновки

1. При дослідженні очищення води осесиметричним фокусованим магнітним полем за параметр оптимізації вибрано ефективність знезалізнення, головні чинники експерименту – швидкість потоку води та частку відходів.

2. Встановлена за результатами експерименту регресійна модель ефективності знезалізнення води осесиметричним фокусованим магнітним полем є адекватною за F-критерієм Фішера при швидкості потоку 0,14-0,40 м/с та частці відходів 0,10-0,35 в.о. Розходження між побудованими із рівняння регресії кривими та експериментальними точками знаходиться у межах 2,57 % (0,016 в.о.).

3. Найбільша ефективність знезалізнення води пристроєм магнітного очищення дорівнює 0,777 в.о. при швидкості 0,31 м/с та частці 0,10 в.о. При розрахунку значень чинників, при яких ефективність знезалізнення максимальна, методом ітерацій та шляхом канонізації рівняння регресії розбіжність по швидкості становила 1,3 % (0,004 м/с).

4. Подальшим перспективним напрямком дослідження є вивчення залежності ефективності знезалізнення води від параметрів пристрою магнітного очищення (наприклад, розподілу індукції магнітного поля), а також встановлення складу та структури домішок.

## ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЕ ВОДЫ ОСЕСИММЕТРИЧНЫМ ФОКУСИРОВАННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

О.М. Терентьев, А.В. Ворфоломеев

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

e-mail: o.terentiev@kpi.ua, a.vorfolomeiev@kpi.ua

*В исследовании рассмотрено влияние постоянного осесимметричного фокусированного магнитного поля на примеси железа в воде. Основное внимание предоставлено определению по результатам экспериментальных исследований математической модели процесса обезжелезивания воды устройством магнитной очистки. При исследовании очистки воды осесимметричным фокусированным магнитным полем в качестве параметра оптимизации выбрана эффективность обезжелезивания, главных факторов эксперимента – скорость потока воды и доля отходов. В ходе экспериментального исследования общее содержание железа в воде снижалось с 1,10 до 0,28 мг/дм<sup>3</sup> и с 0,62 до 0,23 мг/дм<sup>3</sup>, мутность – с 5,91 до 0,88 мг/дм<sup>3</sup>. Установленная регрессионная модель эффективности обезжелезивания воды осесимметричным фокусированным магнитным полем является адекватной по F-критерию Фишера при скорости потока 0,14–0,40 м/с и доле отходов 0,10–0,35 о.е. Различие между построенными из уравнения регрессии кривыми и экспериментальными точками находится в пределах*

2,57 % (0,016 о.е.). Для расчета наибольшей эффективности обезжелезивания воды при указанном изменении главных факторов применено приведение регрессионной модели к каноническому виду, а также регрессионное уравнение дополнительно решено методом итераций. Таким образом, наибольшая эффективность обезжелезивания воды устройством магнитной очистки составила 0,777 о.е. при скорости 0,31 м/с и доле отходов 0,10 о.е.

*Ключевые слова:* обезжелезивание воды, магнитное поле, эффективность очистки, модель.

## WATER DEFERRIZATION BY AXISYMMETRIC FOCUSED MAGNETIC FIELD

**O.Terentiev, A.Vorfolomeiev**

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnical Institute"

e-mail: o.terentiev@kpi.ua, a.vorfolomeiev@kpi.ua

*The research considers the influence of permanent axisymmetric focused magnetic field on iron impurities in the water. The key attention is provided to determining (from experimental results) of mathematical model of water deferrization process by magnetic device. The deferrization efficiency has been chosen as the parameter of optimization, and the water flow rate and the part of waste – as the main factors of the experiment for research of water purification by axisymmetric focused magnetic field. During the experiment the total iron in water was reduced from 1.10 to 0.28 mg/dm<sup>3</sup> and from 0.62 to 0.23 mg/dm<sup>3</sup>, turbidity – from 5.91 to 0.88 mg/dm<sup>3</sup>. Determined regression model of efficiency of water deferrization by focused axisymmetric magnetic field is adequate to Fisher's F-test at the flow rate 0,14-0,40 m/s and the part of waste 0,10-0,35. The difference between regression curves and the experimental points is 2.57 %. To calculate the maximal effectiveness of water deferrization the regression model was reduced to canonical form, and additionally the regression equation was solved by iteration. Thus the maximal efficiency of water deferrization by magnetic device was 0.777 at the flow rate 0.31 m/s and the part of waste 0.10.*

*Keywords:* water deferrization, magnetic field, efficiency of purification, model

### Список літератури

1. Gabrielli C. Magnetic water treatment for scale prevention / C. Gabrielli, R. Jaouhariy, G. Maurin, M. Keddam // Water Resources. – 2001. – Vol. 35, N. 13, – p. 3249–3259.
2. Botello-Zubiate M.E. Influence of magnetic water treatment on the calcium carbonate phase formation and the electrochemical corrosion behavior of carbon steel / M.E. Botello-Zubiate, A. Alvarez, A. Martinez-Villafane // Journal of Alloys and Compounds. – 2004. – No. 369. – p. 256-259.
3. Klassen V.I. Magnetization of water systems/ V.I. Klassen/ Khimiya : Moscow, 1982. – 296 p.
4. Stukalov P.S. Magnetic water treatment/ P.S. Stukalov, E.V. Vasiliev, N.A. Glebov // Sudostroenie. – Leningrad, 1969. – 192 с.
5. Amiri M.C. On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment / M.C. Amiri, A. Dadkhah Ali // Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering. Aspects. – 2006. – No. 278. – p. 252–255.
6. Kobe S. Nucleation and crystallization of CaCO<sub>3</sub> in applied magnetic fields / S. Kobe, G. Drazic, A.C. Cefalas et al. // Crystal Engineering. – 2002. – No. 5 – p. 243-253.
7. Wang L. Preparation of Uniform Needle-Like Aragonite Particles by Homogeneous Precipitation / L. Wang, I. Sondi, E. Matijevic // Journal of Colloid and Interface Science. – 1999. – No. 218. – p. 545-553.
8. Coey J.M.D. Magnetic water treatment / J.M.D. Coey, S. Cass // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2000. – No. 209 – p. 71-74.

9. *Harashchenko V.* Mathematical modeling of processes of magnetic filtration and regeneration and evaluation of their effectiveness. -Visnyk TNTU [Bulletin of TNTU]. – 2012. – Vol. 66. – N. 2. – p. 242-248.
10. *Hiról M.M.* Magnetic reagent water treatment in magnetic settlers and combined magnetic units/ M.M. Hiról, N.M. Prokopchuk, M.V. Bernatskyy //Utilities of cities. – 2002. – N. 45. – p. 63-73.
11. *Bar'iakhtar V.H.* Magnetic trap for localization of microparticles in liquid flow / V.H. Bar'iakhtar, Iu.I. Horobets', M.M. Potiomkin //Research Bulletin of NTUU "KPI".– 2009. – № 3 (65) – p. 143-147.
12. *Artsimovich L.A.* Movement of charged particles in electrical and magnetic fields/ L.A. Artsimovich, S.Yu. Luk'yanov //Nauka: Moscow, 1972. – 224 p.
13. *Martynova I.O.* On the mechanism of the influence of magnetic field on aqueous solutions of salts / I.O. Martynova, B.T. Gusev, E.A. Leont'yev //Progress of physical science. – 1969. – Vol.98 – No. 1 – p. 195-199.
14. *Gokon N.* Magnetic coagulation and reaction rate for the aqueous ferrite formation reaction / N. Gokon, A. Shimada, H. Kaneko et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2002. – Vol. 238, Issue 1. – p. 47–55.
15. *Zabulonov Yu.L.* On the influence of electromagnetic fields on the stability of colloids by the example of iron hydroxide / Yu.L. Zabulonov, V.M. Kadoshnikov, Yu.V. Litvinenko // Collection of scientific works of Institute of Environmental Geochemistry. – 2009. – N. 17 – p. 63-66.
16. *Adler Yu.P.* Experiment planning in the search for optimum conditions/ Yu.P. Adler, E.V. Markova, Yu.V. Granovskiy // Nauka: Moscow, 1976. – 279 p.
17. *Spiridonov A.A.* Experiment planning in the investigation of technological processes/ A.A. Spiridonov // Mashinostroyeniye: Moscow, 1981. – 184 p.
18. *Loyko V.I.* Metodology of system analysis of applied processes of acoustomagnetic water treatment/ V.I. Loyko, A.V. Korzhakov, S.A. Korzhakova // Scientific electronic journal of KubGAU. – 2005. – No. 01(9). – 30 p.
19. *Bondar' A.G.* Experiment planning in chemical technology/ A.G. Bondar', G.A. Statyukha //– Kyiv: Vyscha shkola, 1976. – 184 p.
20. *Zhirabok A.N.* Experiment planning for mathematical models constructing/ A.N. Zhirabok // Soros Educational Journal. – 2001. – Vol. 7. – N. 9. – p. 121-127.
21. *Terent'ev O.M.* Efficiency of magnetic devices using in water purification systems/ Terent'ev O.M., Vorfolomeev A.V. // Issues of natural resources use.– 2012. – Vol. 2. – p.154-156.