

## ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД НА УСТАНОВКАХ З ВОЛОКНИСТО- ПІНОПОЛІСТИРОЛЬНИМИ ФІЛЬТРАМИ

Т.П. ХОМУТЕЦЬКА, П.Д. ХОРУЖИЙ, О.В. РУБАН

Інститут водних проблем і меліорації НААН

*Наведено результати експериментальних досліджень процесу знезалізнення підземних вод на установках з біореакторами і контактними прояснювальними фільтрами. Встановлено залежності ефективності очищення води від швидкості її фільтрування і питомої брудомісткості фільтра.*

**Ключові слова:** підземні води, знезалізнення, біореактор, контактний прояснювальний фільтр

**Актуальність і стан вивчення питання.** Відомо, що в Україні понад 50% підземних вод мають підвищену кількість заліза, середній вміст якого становить 3–5 мг/дм<sup>3</sup>. Згідно з новими нормативами до якості питної води [1] вміст заліза у питній воді не повинен перевищувати 0,2 мг/дм<sup>3</sup> (донедавна цей норматив дорівнював 0,3 мг/дм<sup>3</sup>). Отже, вимоги до ефективності роботи водознезалізнювальних установок посилились і тепер мінімальна ефективність процесу знезалізнення води визначається за формулою

$$E_{\min} = 100 - \frac{20}{C_{\text{в}}}, \%, \quad (1)$$

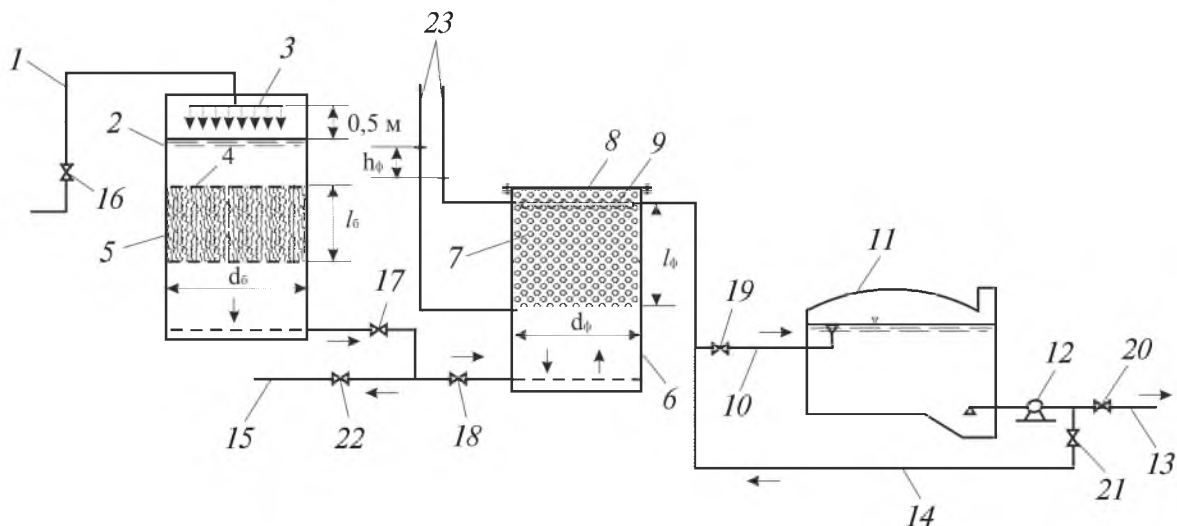
де  $C_{\text{в}}$  – вміст заліза у вихідній воді, мг/дм<sup>3</sup>.

Залежність (1) є гіперболою, яка асимптотично наближається до лінії, з ординатою на висоті  $E_{\min} = 100\%$ , коли  $C_{\text{в}}$  прямує до  $\infty$ .

Як видно з формули (1), при вмісті заліза у вихідній воді  $C_{\text{в}} = 2$  мг/дм<sup>3</sup>, величина  $E_{\min} = 90\%$ , а при  $C_{\text{в}} = 10$  мг/дм<sup>3</sup> –  $E_{\min} = 98\%$ , тобто ефективність роботи водознезалізнюваль-

них установок повинна бути дуже високою, чого досягти на традиційних станціях знезалізнення води практично неможливо.

У роботі [2] показано, що одним із методів підвищення ефективності процесів видалення з води двовуглекислого заліза  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$  є застосування біохімічного його окиснення аеробними мікроорганізмами, закріпленими на джгутових нитках волокнистого завантаження біореактора (БР), та висхідного фільтрування води на контактному прояснювальному фільтрі (КПФ) з пінополістирольним плаваючим завантаженням. Схему такої водознезалізнювальної установки показано на *рис. 1*.



**Рис. 1. Технологічна схема установки для знезалізнення води на БР і КПФ:**  
 1 – подача вихідної води; 2 – БР; 3 – аератор; 4 – решітка; 5 – волокнисте завантаження; 6 – КПФ; 7 – пінополістирольне завантаження; 8 – кришка; 9 – ковпачковий дренаж; 10 – відведення очищеної води; 11 – РЧВ; 12 – насосна станція; 13 – подача води споживачам; 14 – подача води на промивання; 15 – скидання промивної води; 16–22 – засувки; 23 – п'єзометричні трубки

Біологічний метод знезалізнення води має низку переваг порівняно з фізико-хімічним методом, оскільки залізобактерії швидко окислюють  $\text{Fe}^{2+}$ , а отриманий осад з гідроксиду заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  накопичують у компактній формі.

При затриманні заліза на пінополістирольному фільтрі

беруть участь не тільки сили адгезії у фільтрувальному завантаженні, але й сили гравітації у підфільтровому просторі, де пластівці з гідроксиду заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  укрупнюються і випадають в осад як у прояснювачі із завислим осадом.

Водознезалізнювальна установка (рис. 1) працює так. Підземна вода по трубі 1 через аератор 3 подається на БР з волокнистим завантаженням 5, яке прикріплюється у натягнутому стані між решітками 4. Вода в аераторі, як у душовій сітці, розбризкується на дрібні крапельки, які падають із висоти не менше 0,5 м, що сприяє насиченню води киснем та виділенню з неї вуглекислого газу  $\text{CO}_2$  та інших газів для запобігання пухирцевій кольматації нижнього шару фільтрувального завантаження КПФ. У волокнистому завантаженні 5 відбувається біохімічне окиснення двовуглекислого заліза  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$  за допомогою мікроорганізмів з утворенням пластівців з гідроксиду заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . БР забезпечує також постійну швидкість фільтрування води протягом фільтроциклу: при збільшенні втрат напору на спорудах автоматично піднімається рівень води в БР. Очищена вода збирається ковпачковим дренажем 9 і по трубопроводу 10 відводиться в резервуар чистої води (РЧВ), з якого вона насосною станцією 12 по трубопроводу 13 подається споживачам.

У період фільтрування води відкрито засувки 16–20, а засувки 21 і 22 закрито. Під час промивання КПФ закривають засувки 16, 17 і 19 та відкривають засувки 21 і 22. Вода подається по трубопроводу 14 через ковпачковий дренаж 9 і рухається в КПФ у зворотному напрямку (зверху вниз), вимиваючи забруднення з пінополістирольного завантаження 7 і його підфільтрового простору. Промивна вода скидається по трубопроводу 15.

**Завдання, методика і результати досліджень.** Для визначення оптимальних конструктивних і технологічних параметрів БР і КПФ, що забезпечують мінімальні капітальні й експлуатаційні витрати при нормативних показниках якості очищеної води, ми провели експериментальні дослідження роботи установки з такими характеристиками: 1) БР був завантажений капроновими джгутовими нитками діаметром  $d_n = 2$  мм і довжиною  $l_6 = 0,8$  м у трубі  $d_6 = 144$  мм за розміщення джгутів на відстані 2 см один від одного; 2) КПФ був завантажений спіненим по-

лістиролом у трубі діаметром  $d_{\phi} = 144$  мм; еквівалентний діаметр гранул  $d_e = 3,22$  мм; коефіцієнт неоднорідності  $K_n = 2,52$ ; висота завантаження  $l_{\phi} = 1,0$  м.

Вміст заліза у вихідній воді становив  $C_b = 2,8$  мг/дм<sup>3</sup>. Отже, мінімальна ефективність роботи установки за формулою (1) така:

$$E_{\min} = 100 - \frac{20}{2,8} = 92,9\% .$$

Дослідження на установці зводились до визначення залежностей:

$$C_{\phi,i} = f(V_{\phi,j}, G_{\pi,i}) ; \quad (2)$$

$$h_{\phi,i} = f(V_{\phi,j}, G_{\pi,i}) , \quad (3)$$

де  $C_{\phi,i}$  – вміст заліза у профільтрованій воді, мг/дм<sup>3</sup>;  $h_{\phi,i}$  – втрати напору на КПФ, м;  $V_{\phi,j}$  – швидкість фільтрування води на КПФ, м/год;  $G_{\pi,i}$  – питома брудомісткість завантаження КПФ, кг/м<sup>2</sup> ( $i$  – порядковий номер часу фільтрування води в межах фільтроциклу;  $j$  – порядковий номер змінюваної швидкості фільтрування води).

Результати експериментальних досліджень наведено у *табл. 1*.

Відбирали проби для визначення вмісту заліза в очищеній воді через 8 год. Ефективність знезалізнення води встановлювали за формулою:

$$E_i = \frac{C_b - C_{\phi,i}}{C_b} \cdot 100\% ; \quad (4)$$

накопичення забруднень за кожен інтервал роботи фільтра – за формулою

$$\Delta G_{\pi,i} = \frac{K_n V_{\phi} C_b E_{\text{ср}} T_{\phi}}{1000} , \text{ кг/м}^2 , \quad (5)$$

а питому брудомісткість фільтра, тобто кількість осаду  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , затриманого на фільтрі від початку фільтроциклу до даного моменту часу з розрахунку на 1 м<sup>2</sup> площі фільтра, – наступним чином:

**1. Результати експериментальних досліджень процесів знезалізнення води на установці з БР і КПФ**

$T_{\phi}$ , год	$C_{\phi}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$E$ , %	$\Delta G_{п}$ , кг/м <sup>2</sup>	$G_{п}$ , кг/м <sup>2</sup>	$h_{\phi}$ , м	$K_{\phi}$ , м/год
$V_{\phi} = 7 \text{ м/год}$						
0	0,24	91,6	0	0	0,03	220
8	0,21	92,6	0,27	0,27	0,03	220
16	0,18	93,5	0,28	0,55	0,06	117
24	0,14	95,0	0,28	0,83	0,08	88
32	0,10	96,6	0,29	1,12	0,11	64
40	0,07	97,5	0,29	1,41	0,14	50
48	0,05	98,4	0,29	1,70	0,17	41
56	0,04	98,6	0,30	2,00	0,20	35
64	0,05	98,4	0,30	2,30	0,23	30
72	0,06	98,0	0,29	2,59	0,26	27
80	0,08	97,0	0,29	2,88	0,29	24
88	0,13	95,5	0,29	3,17	0,32	22
96	0,20	92,8	0,28	3,45	0,35	20
104	0,24	91,3				
$V_{\phi} = 9 \text{ м/год}$						
0	0,25	91,1	0	0	0,04	220
8	0,23	91,8	0,35	0,35	0,05	180
16	0,21	92,6	0,35	0,70	0,10	90
24	0,17	93,9	0,36	1,06	0,16	56
32	0,13	95,2	0,36	1,42	0,21	43
40	0,11	96,2	0,37	1,79	0,27	33
48	0,08	97,2	0,37	2,16	0,32	28
56	0,06	97,7	0,38	2,54	0,38	24
64	0,08	97,3	0,38	2,92	0,44	20
72	0,10	96,5	0,38	3,29	0,49	18
80	0,21	92,6	0,36	3,65	0,55	16
96	0,25	91,0				
$V_{\phi} = 11 \text{ м/год}$						
0	0,26	90,6	0	0	0,05	220
8	0,24	91,3	0,43	0,43	0,08	92
16	0,22	92,2	0,43	0,86	0,17	44
24	0,19	93,3	0,44	1,3	0,25	29
32	0,16	94,4	0,44	1,74	0,34	22
40	0,13	95,3	0,45	2,19	0,42	17
48	0,10	96,3	0,45	2,64	0,51	16
56	0,10	96,3	0,46	3,1	0,60	15
64	0,10	96,3	0,46	3,56	0,69	14
72	0,15	94,6	0,45	4,01	0,78	14
80	0,26	90,8	0,44	4,45	0,86	13

$$G_{п. j} = \sum_0^{T_{\phi. j}} \Delta G_{п. i} , \text{ кг/м}^2 . \quad (6)$$

У цих формулах  $K_{п} = 1,91$  – перевідний коефіцієнт, що враховує відношення молекулярної маси гідроксиду заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  до атомної маси двовалентного заліза  $\text{Fe}^{2+}$  [2];  $E_{\text{ср}}$  – середня ефективність знезалізнення води протягом досліджуваного періоду роботи фільтра, в частках одиниці;  $T_{\phi}$  – тривалість цього періоду, год.

Коефіцієнт фільтрації пінополістирольного завантаження знаходили за формулою:

$$K_{\phi. ij} = \frac{V_{\phi. j} l_{\phi}}{h_{\phi. ij}} , \text{ м/год}, \quad (7)$$

де  $l_{\phi}$  – товщина фільтрувального завантаження, яка в експериментальній установці дорівнювала 1 м;  $h_{\phi. ij}$  – втрати напору на фільтрі, м, в  $i$ -й момент фільтроциклу при швидкості фільтрування води  $V_{\phi. j}$ , які визначались з точністю 1 мм за допомогою п'єзометричних трубок (поз. 23 на *рис. 1*).

**Аналіз експериментальних досліджень.** За даними колонок 1 і 3 *табл. 1* побудовано графіки  $E = f(T_{\phi}; V_{\phi})$  для трьох значень швидкості фільтрування води на КПФ (*рис. 2*), з яких видно, що протягом фільтроциклу ефективність знезалізнення води  $E$  спочатку зростає до певної величини, а потім починає зменшуватись, що залежить від питомої брудомісткості фільтра  $G_{п}$ , тобто кількості осаду  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  на 1 м<sup>2</sup> його площі. Цей осад бере активну участь у затриманні пластівців гідроксиду заліза, які надходять з новими порціями води після БР. Абсциси точок *A*, *B* і *C* на *рис. 2* визначають тривалість «зарядки» фільтра, тобто час накопичення осаду у фільтрі  $T_{\text{зар}}$ , після якого при фільтруванні води із вмістом заліза  $C_{\text{в}} = 2,8$  мг/дм<sup>3</sup> з відповідною швидкістю  $V_{\phi. j}$  буде забезпечуватись мінімальна ефективність знезалізнення води  $E_{\text{min}} = 0,929$ , за якої якість фільтрованої води дорівнюватиме  $C_{\phi} = 0,2$  мг/дм<sup>3</sup>. Абсциси точок *M*, *N* і *P* визначають максимальні тривалості фільтроциклу  $T_{\phi. \text{max}}$  для відповідних швидкостей фільтрування води, після яких фільтр необхідно виключати на промивання.



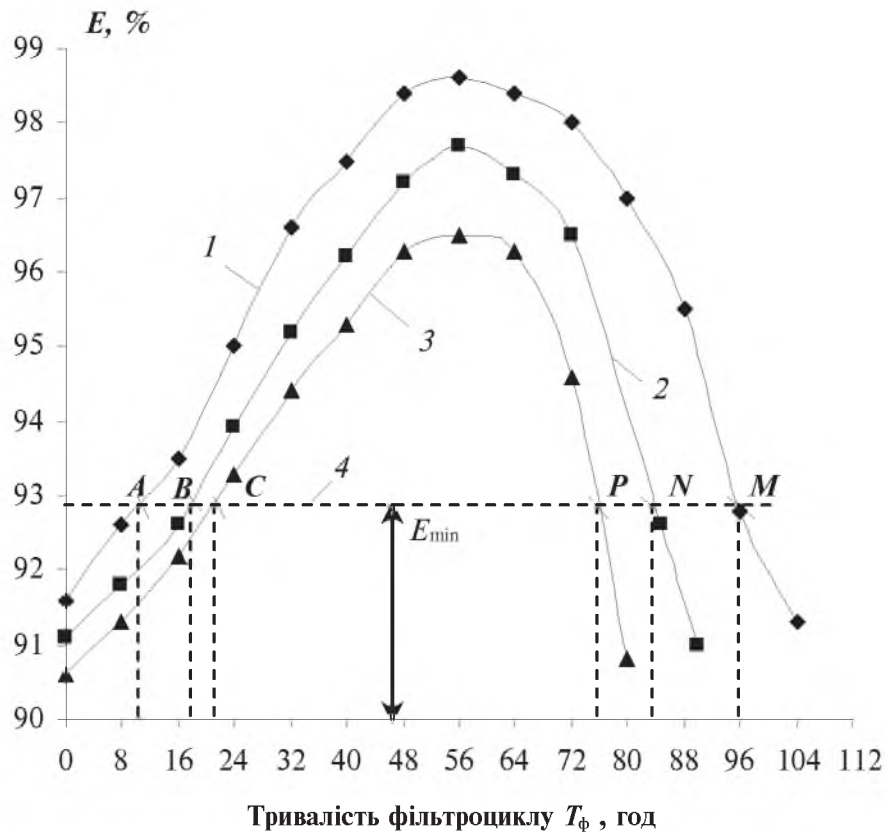


Рис. 2. Графіки зміни ефективності знезалізнення води протягом фільтроциклу  $E = f(T_{\phi}; V_{\phi})$  при швидкостях фільтрування води:  
 1 —  $V_{\phi.1} = 7$  м/год; 2 —  $V_{\phi.2} = 9$  м/год; 3 —  $V_{\phi.3} = 11$  м/год; 4 — лінія мінімальної ефективності видалення заліза на установці

З рис. 2 видно, що із зростанням швидкості фільтрування води  $V_{\phi}$  збільшується необхідна тривалість «зарядки» фільтра  $T_{\phi.зар.}$  та зменшується тривалість фільтроциклу  $T_{\phi.мах}$  (табл. 2), а отже, і тривалість корисної роботи фільтра:

$$T_{\phi.роб.} = T_{\phi.мах} - T_{\phi.зар.}, \text{ ГОД.} \quad (8)$$

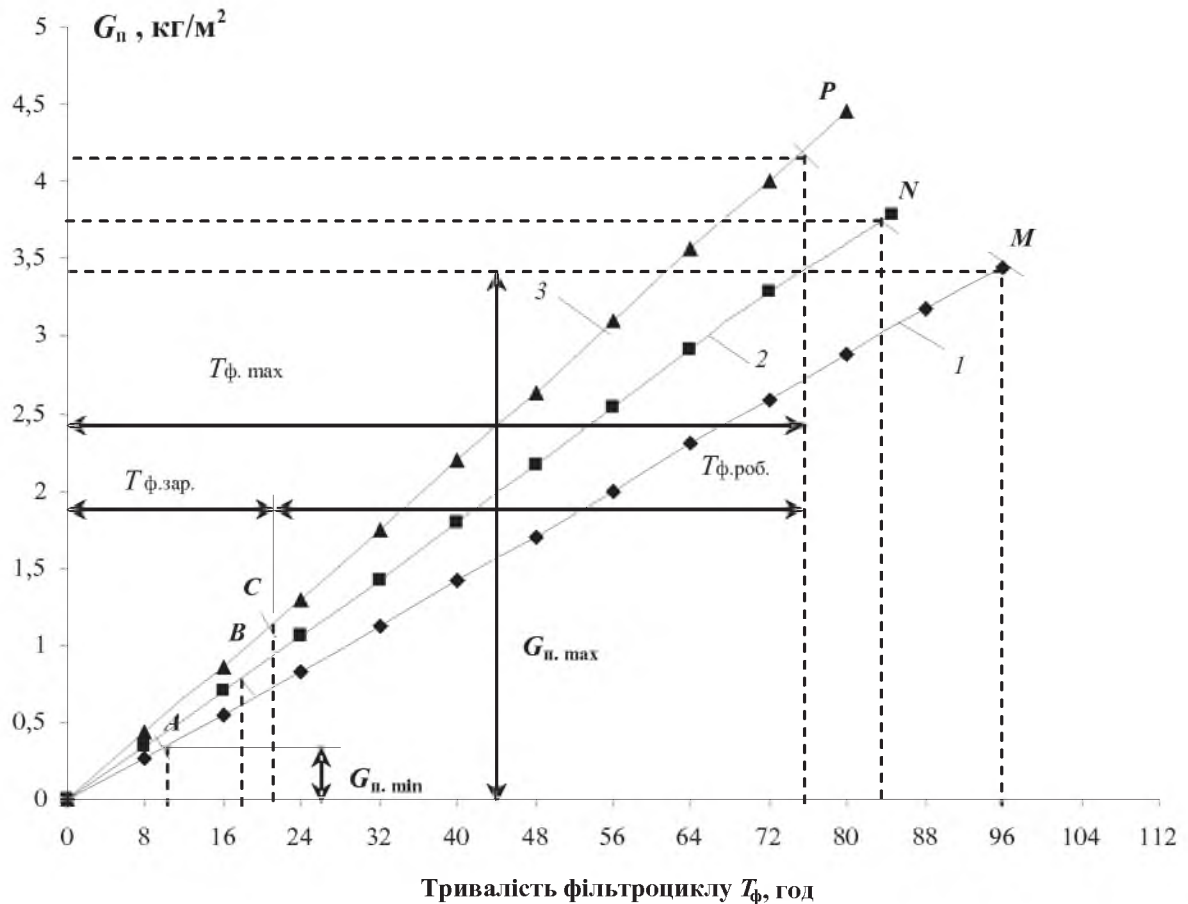
За даними колонок 1 і 5 табл. 1 побудовано графіки  $G_{\Pi} = f(T_{\phi}; V_{\phi})$  при швидкостях фільтрування води 7, 9 і 11 м/год (рис. 3), з яких видно, що вони є практично прямими лініями, оскільки у формулі (5) усі параметри, крім  $E_{\text{ср}}$ , є постійними величинами, а середня ефективність знезалізнення води  $E_{\text{ср}}$  змінюється ненабагато.

За ординатами точок А, В і С на цих графіках для відповідних значень  $T_{\phi.зар.}$  знаходять показник мінімальної питомої

**2. Розрахункові тривалості роботи КПФ  
при різних швидкостях фільтрування води**

Тривалість етапів роботи фільтра, год	Значення величин при швидкостях фільтрування води $V_{\phi}$ , м/год		
	7	9	11
«Зарядка» фільтра	10	17	21
Загальний фільтроцикл $T_{\phi.max}$	96	82	74
Корисна робота $T_{\phi.роб.}$	86	65	53

брудомісткості фільтра  $G_{п.min}$ , при яких забезпечується нормативний вміст заліза у фільтрованій воді ( $C_{\phi.н} = 0,2$  мг/дм<sup>3</sup>) і які потрібно залишати у фільтрі після його промивання, щоб не здійснювати «зарядку» фільтра в наступному фільтроциклі.



**Рис. 3. Графіки зміни питомої брудомісткості КПФ протягом фільтроциклу при швидкостях фільтрування води:**

$1 - V_{\phi.1} = 7$  м/год;  $2 - V_{\phi.2} = 9$  м/год;  $3 - V_{\phi.3} = 11$  м/год



Ординати точок  $M$ ,  $N$  і  $P$  визначають максимальну питому брудомісткість фільтра для відповідної швидкості фільтрування води. Як видно з *рис. 3*, при зростанні швидкості фільтрування води  $V_{\phi}$  збільшується значення  $G_{п.мин}$  і  $G_{п.мах}$ .

Таким чином, для одного і того самого фільтра ефективність знезалізнення води  $E$  і втрати напору на фільтрі  $h_{\phi}$  залежать від двох параметрів: питомої брудомісткості фільтра  $G_{п}$  і швидкості фільтрування води  $V_{\phi}$ . Абсциси точок  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $M$ ,  $N$  і  $P$  на графіках  $E = f(G_{п}; V_{\phi})$ , утворені при їхньому перетинанні з прямою лінією, проведеною на відстані  $E_{min}$ , визначають мінімальні і максимальні величини питомої брудомісткості фільтра ( $G_{п.мин}$  і  $G_{п.мах}$ ) для відповідних швидкостей фільтрування води  $V_{\phi}$  (*рис. 4*).

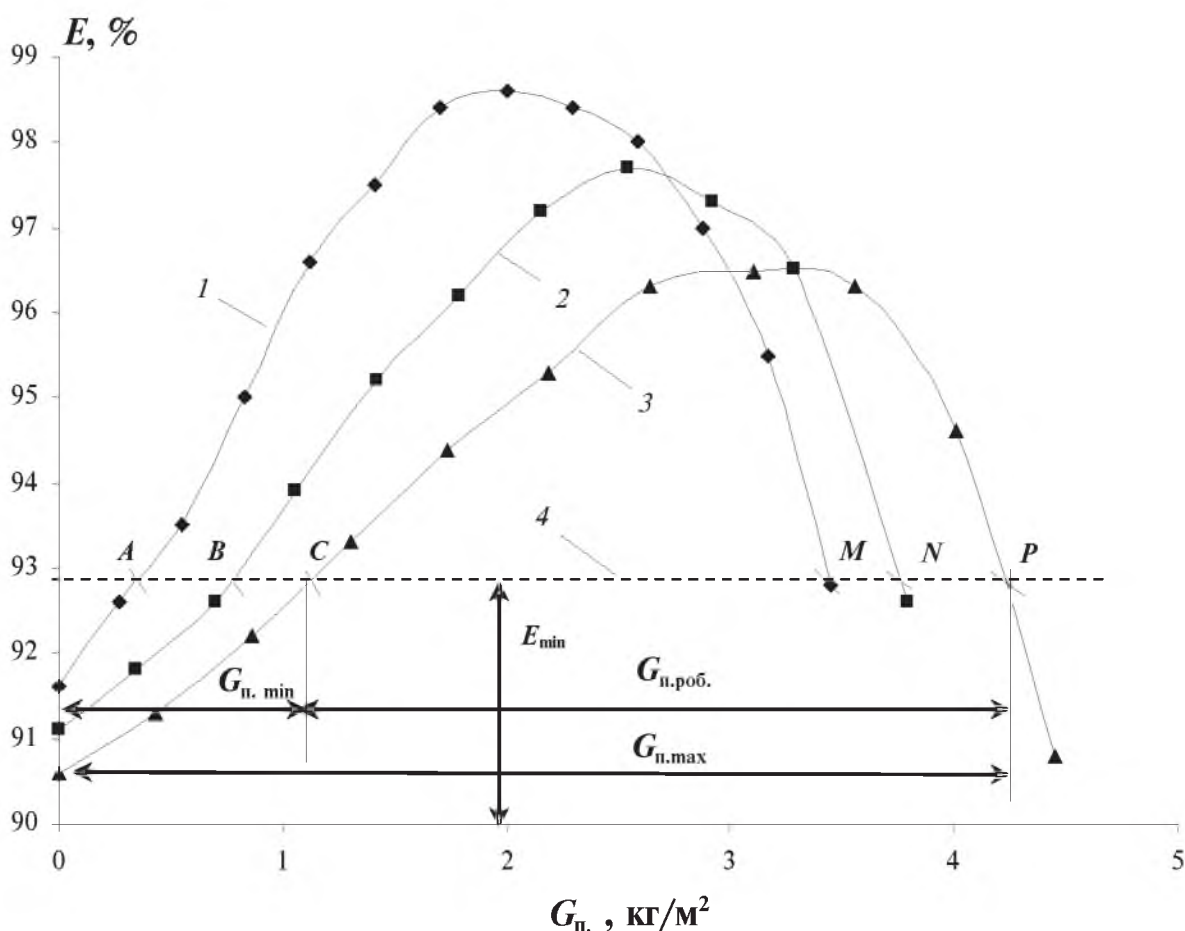


Рис. 4. Графіки залежності  $E = f(G_{п}; V_{\phi})$  при швидкостях фільтрування води:  
 1 –  $V_{\phi,1} = 7 \text{ м/год}$ ; 2 –  $V_{\phi,2} = 9 \text{ м/год}$ ; 3 –  $V_{\phi,3} = 11 \text{ м/год}$ ;  
 4 – лінія мінімальної ефективності видалення заліза на установці

Отже, робочу питому брудомісткість фільтра встановлюють за формулою:

$$G_{п.роб.} = G_{п.маx} - G_{п.мин} , \text{ кг/м}^2. \quad (9)$$

Дослідження показали, що втрати напору на фільтрі  $h_{\phi}$  прямо пропорційно залежать від питомої брудомісткості фільтра  $G_{п}$  і швидкості фільтрування води  $V_{\phi}$ , а коефіцієнт фільтрації завантаження, що визначається за формулою (7), залежно від величини  $G_{п}$  має вигляд гіперболи, яка починається з  $K_{\phi,0}$  і асимптотично наближається до осі абсцис (рис. 5). За однакових значень  $G_{п}$  коефіцієнт фільтрації завантаження буде меншим при вищій швидкості фільтрування води  $V_{\phi}$  внаслідок збільшення густини осаду  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , при якій зростають втрати напору на фільтрі  $h_{\phi}$ .

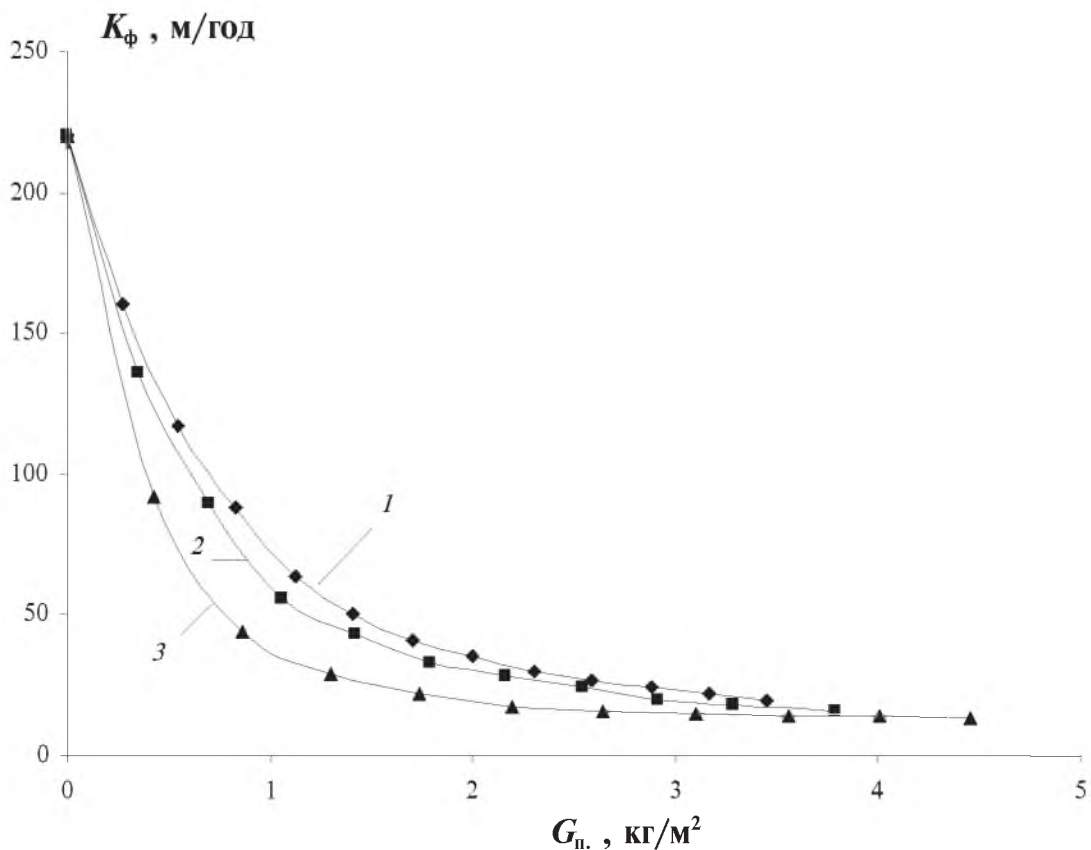


Рис. 5. Графік залежності  $K_{\phi} = f(G_{п}; V_{\phi})$  при швидкостях фільтрування води:  
 1 —  $V_{\phi,1} = 7$  м/год; 2 —  $V_{\phi,2} = 9$  м/год; 3 —  $V_{\phi,3} = 11$  м/год

**Методика розрахунку водознезалізнювальних установок.**  
 У табл. 3 наведено значення розрахункових величин питомої

брудомісткості КПФ з досліджуванним пінополістирольним завантаженням.

Питому брудомісткість фільтра у будь-який ( $k$ -й) момент часу його роботи в межах фільтроциклу можна з достатньою точністю визначати за формулою:

$$G_{п.к} = 0,00191 V_{\phi} T_{\phi.к} C_{в} E_{ср}, \text{ кг/м}^2, \quad (10)$$

де  $T_{\phi.к}$  – тривалість фільтроциклу від початку роботи фільтра і до даного моменту, год;  $E_{ср}$  – середня ефективність знезалізнення води протягом цього періоду, в частках одиниці.

Як видно з *табл. 3*, для досліджуваного фільтрувального завантаження і води з такими показниками якості робочу питому брудомісткість у середньому можна приймати  $G_{п.роб.} = 3 \text{ кг/м}^2$ .

**3. Розрахункові значення питомої брудомісткості КПФ з характеристиками фільтрувального завантаження:**

$$d_e = 3,22 \text{ мм}; K_n = 2,52; l_{\phi} = 1 \text{ м}$$

Питома брудомісткість завантаження, кг/м <sup>2</sup>	Значення величин при швидкостях фільтрування води $V_{\phi}$ , м/год		
	7	9	11
Мінімальна $G_{п.мін}$	0,36	0,78	1,14
Максимальна $G_{п.макс}$	3,45	3,62	4,21
Робоча $G_{п.роб.}$	3,09	2,84	3,07

Тоді тривалість корисної роботи фільтра розраховують за формулою:

$$T_{\phi.р} = \frac{3}{0,00191 V_{\phi} C_{в} E_{ср}} = \frac{1570,7}{V_{\phi} C_{в} E_{ср}}, \text{ год}, \quad (11)$$

в якій середня ефективність знезалізнення за період корисної роботи фільтра приймається залежно від швидкості фільтрування води:

$V_{\phi}$ , м/год	7	9	11
$E_{ср}$	0,962	0,955	0,948

Отже, формулу (11) можна записати так:

$$T_{\text{ф.р}} = \frac{P_{\text{ш}}}{C_{\text{в}}}, \text{ год}, \quad (12)$$

де  $P_{\text{ш}}$  – параметр, що залежить від швидкості фільтрування води:

$V_{\text{ф}}, \text{ м/год}$	7	9	11
$P_{\text{ш}}, \text{ год} \cdot \text{дм}^3/\text{мг}$	240,8	182,7	150,6

Мінімальну питому брудомісткість фільтра, за якої забезпечується нормативний вміст заліза в очищеній воді (табл. 3), визначають за формулою:

$$G_{\text{п.мін}} = 0,357 C_{\text{в}} [0,36 + 0,195(V_{\text{ф}} - 7)], \text{ кг/м}^2, \quad (13)$$

а максимальну питому брудомісткість фільтра, при досягненні якої фільтр потрібно виключати на промивання, за формулою:

$$G_{\text{п.макс}} = 0,00182 V_{\text{ф}} C_{\text{в}} [96 - 5,5(V_{\text{ф}} - 7)], \text{ кг/м}^2. \quad (14)$$

Формули (13) і (14) дійсні для  $V_{\text{ф}}$  в межах 7–11 м/год та при вмісті заліза у вихідній воді  $C_{\text{в}} > 0,2 \text{ мг/дм}^3$ .

Під час промивання КПФ у фільтрувальному завантаженні необхідно залишати осад з гідроксиду заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  в обсязі мінімальної питомої брудомісткості  $G_{\text{п.мін}}$  для забезпечення нормативної якості очищеної води на початку наступного фільтроциклу. Це досягається на основі дослідно-виробничих випробувань водознезалізнювальної установки при виконанні пусконаладжувальних робіт.

**Висновок.** У зв'язку з підвищенням вимог до якості очищеної води забезпечити нормативний вміст заліза у питній воді ( $0,2 \text{ мг/дм}^3$ ) традиційними методами дуже складно. Для розв'язання цієї проблеми пропонуються установки з волокнисто-пінополістирольними фільтрами і методика їхнього розрахунку, отримана на основі обробки результатів проведених експериментальних досліджень.

### Література

1. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. Затверджено наказом МОЗУ 12.05.2010, № 400. Зареєстровано в МЮУ 1.07.2010, № 452/17747.

2. Хоружий П.Д., Хомутецька Т.П., Хоружий В.П. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. — К.: Аграр. наука, 2008. — 534 с.

3. Хомутецька Т.П. Знезалізнення підземних вод біологічним методом на установках з волокнисто-пінополістирольними фільтрами // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. — К.: КНУБА, 2010. — Вип. 14. — С. 22–33.

*Приведены результаты экспериментальных исследований процесса обезжелезивания подземных вод на установках с биореакторами и контактными осветлительными фильтрами. Установлены зависимости эффективности очистки воды от скорости её фильтрования и удельной грязеемкости фильтра.*

*In the article offered results of experimental studies of removal iron from groundwater at the plant with bioreactors and contact cleansing filters, dependences of the efficiency of water treatment on rate of filtration and contaminant capacity of filter.*