

УДК 556.332.63

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ІНФІЛЬТРАЦІЙНИХ БАСЕЙНІВ**

---

Ю.П. ЯКОВЕНКО

Держводгосп України

*Розглянуто математичну модель процесів інфільтрації поверхневих вод у підземні водоносні пласти. Наведено результати натурних дослі-*

© Ю.П. Яковенко, 2009

Меліорація і водне господарство. 2009. Вип. 97

джені роботи інфільтраційних басейнів та зміну їхніх основних розрахункових параметрів протягом фільтроциклу.

**Постановка проблеми.** Одним із шляхів поліпшення забезпечення сільського населення якісною питною водою є розширене використання підземних вод, у тому числі зі штучним поповненням їхніх запасів завдяки переведенню частини поверхневого стоку в підземні водоносні горизонти, які краще захищені від забруднень з поверхні землі, а отже, мають кращу якість води [1–3].

Основними спорудами в системах штучного поповнення запасів підземних вод (ШПЗПВ) є інфільтраційні басейни (рис. 1).

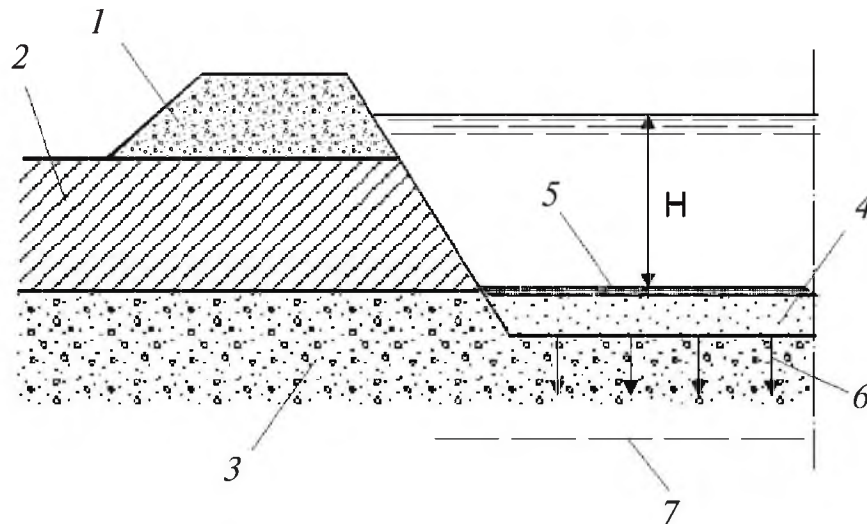


Рис. 1. *Схема подачі води з інфільтраційного басейну:*

- 1 – обвалування басейну; 2 – покривні слабопроникні породи;
- 3 – гравійно-галькові відкладення; 4 – фільтрувальний шар піску;
- 5 – мулова плівка; 6 – зона аерації; 7 – рівень ґрунтових вод

При проектуванні систем ШПЗПВ слід приділяти увагу роботі басейнів в умовах вільної (без підпору) фільтрації води для забезпечення їхньої достатньої продуктивності.

За інфільтрації поверхневих вод відбувається кольтатація верхнього шару піску на дні басейну з утворенням мулової плівки 5 (рис.1), що призводить до зменшення водопроник-

ності цього шару, а отже, і витрати води. Аналогічний вплив на витрату інфільтрації води має товщина цієї плівки, яка постійно зростає протягом фільтраційного циклу.

Оскільки інфільтрація води здійснюється при ламінарному режимі, то в умовах сталого руху, коли швидкість інфільтрації є постійною ( $V = \text{const}$ ), можна записати такі рівняння:

$$V = K_{\text{п}} I = K_{\text{п}} \frac{H}{b_{\text{п}}}; \quad (1)$$

$$H = SV, \quad (2)$$

де  $K_{\text{п}}$  – коефіцієнт фільтрації мулової плівки;  $I$  – гідравлічний похил у муловій плівці;  $H$  – глибина води в басейні;  $b_{\text{п}}$  – товщина мулової плівки;  $S$  – інфільтраційний опір;  $V$  – швидкість інфільтрації води.

Після сумісного розв’язання рівнянь (1) і (2) бачимо, що інфільтраційний опір

$$S = b_{\text{п}} / K_{\text{п}}. \quad (3)$$

По завершенні кольматації піску вирішальний вплив на величину швидкості інфільтрації води з басейну має мулова плівка, що утворюється на поверхні цього піску.

Після пуску інфільтраційного басейну в експлуатацію або чищення його дна спостерігається підняття рівня води в басейні від 0 до максимальної глибини  $H_{\text{макс}}$ , що допускається за умовами експлуатації.

При розрахунках інфільтраційних басейнів [4] на режимах  $V = \text{const}$  визначаються такі параметри: глибина наповнення басейну в будь-який момент часу  $H_i$ ; тривалість періоду наповнення  $t_i$ ; віддача басейну за цей період  $W_i$ ; водоподача у будь-який момент часу  $Q_i$ .

**Методика досліджень.** Для виведення розрахункових залежностей припускаємо:

1) усі завислі речовини, що знаходяться в поверхневій воді, затримуються у муловій плівці;

2) товщина мулової плівки прямо пропорційна каламутності води  $M_1$ ; швидкості інфільтрації  $V_1$  і тривалості роботи басейну  $t_1$ .

Тобто можемо записати таке рівняння:

$$d\bar{b}_n = \frac{1}{\gamma_n} M_1 V_1 dt_1, \quad (4)$$

де  $\gamma_n$  – питома маса скелета плівки.

Для спрощення розрахунків приймаємо, що протягом фільтроциклу  $M = \text{const}$  і  $V = \text{const}$ . Тоді, проінтегрувавши рівняння (4) в межах від 0 до  $t$  і прийнявши, що на початку фільтроциклу товщина мулової плівки  $\bar{b}_{n,0} = 0$ , отримаємо вираз

$$\bar{b}_n = \frac{VMt}{\gamma_n}, \quad (5)$$

де  $t$  – час роботи інфільтраційного басейну.

Сумісне розв'язання рівнянь (1) і (5) дає можливість отримати формулу для визначення втрат напору у муловій плівці басейну при заданій швидкості інфільтрації води з нього  $V$ :

$$H = \frac{V^2 Mt}{A}, \quad (6)$$

де  $A$  – узагальнений параметр, який характеризує воднофізичні властивості мулової плівки

$$A = K_n \gamma_n. \quad (7)$$

Із формул (2) і (6) бачимо, що інфільтраційний опір мулової плівки можна визначити за такими залежностями:

$$S = \frac{H}{V} = \frac{VMt}{A} = \frac{G_n}{A}, \quad (8)$$

де  $G_{\Pi}$  – питома брудомісткість мулової плівки на кінець фільтроциклу тривалістю  $t$ , тобто маса забруднень, що відклалися на одиниці площі поверхні інфільтрації за час  $t$

$$G_{\Pi} = VMt. \quad (9)$$

Тривалість роботи інфільтраційного басейну до максимальної глибини його наповнення при  $V = \text{const}$  визначається за формулою:

$$T = \frac{AH_{\text{макс}}}{V^2 M}. \quad (10)$$

Повний об'єм води, що профільтрується з басейну за час  $T$ , обліковують за формулою:

$$W = VFT, \quad (11)$$

де  $F$  – площа поверхні інфільтрації басейну.

Питому брудомісткість мулової плівки  $G_{\Pi}$  за формулою (9) можна визначити за умови, якщо протягом фільтроциклу тривалістю  $t$  величини  $V$  і  $M$  були постійними ( $V = \text{const}$  і  $M = \text{const}$ ), а також усі завислі речовини, що знаходились у поверхневій воді, затримались у цій плівці, тобто після плівки  $M_{\phi} = 0$ .

Загалом, коли вказані умови не виконуються, питому брудомісткість мулової плівки на кінець фільтроциклу можна визначити за формулою:

$$G_{\Pi} = \int_0^t M_i V_i F_i t_i, \quad (12)$$

в якій параметри  $M_i$  та  $V_i$  повинні бути задані у функції часу  $t_i$ , а ефективність затримання завислих речовин у муловій плівці встановлюють за формулою:

$$E_i = \frac{M_{в.і} - M_{ф.і}}{M_{в.і}}, \quad (13)$$

де  $M_{в.і}$  і  $M_{ф.і}$  – каламутність відповідно вихідної і фільтрованої води, тобто вміст завислих речовин у воді, які надходять в інфільтраційний басейн і фільтруються у водоносний пласт у даний (і-й) момент часу протягом фільтроциклу.

З формул (3), (5) і (8) бачимо, що в процесі інфільтрації води в басейні протягом фільтроциклу змінюються у часі: товщина мулової плівки  $b_n$  і коефіцієнт її фільтрації  $K_n$ , глибина води в басейні  $H$ , інфільтраційний опір мулової плівки  $S$  та узагальнений параметр  $A$ . В умовах, коли забезпечується подача постійної витрати води в басейн ( $Q = \text{const}$ ) та змінюється глибина води в ньому, буде змінюватись і швидкість інфільтрації води  $V$ .

Для перевірки вищевстановлених математичних залежностей розрахункових параметрів інфільтраційних басейнів при здійсненні процесів переведення поверхневого стоку в підземні водоносні горизонти нами було виконано дослідження величини цих параметрів та їхні зміни протягом фільтроциклу. З цією метою провели дослідження процесів ШПЗПВ у с. Янтарне АР Крим. Метою ШПЗПВ на даному об'єкті було створення умов для економного витрачання дніпровської води, що подається по Північно-Кримському каналу та його відгалуженнях, оскільки ця вода у весняний та осінній періоди не повністю витрачається на зрошення. Тому виникла ідея накопичення дніпровської води у підземних водосховищах і регулювання підземного стоку по сезонах та роках для її використання в міру необхідності для зрошення й водопостачання.

Установку ШПЗПВ побудовано і здано в експлуатацію у грудні 1984 р. Інститутом Укрдіпроводгосп (м. Київ) було проведено спостереження за роботою п'яти інфільтраційних басейнів з 1 липня по 31 грудня 1985 р.

Нами використано результати цих спостережень для визначення величини розрахункових параметрів процесу інфільтрації води на даному об'єкті, де гідрогеологічні умови

мали такі середні характеристики: водовміщуючі породи мали потужність 30 м і коефіцієнт фільтрації 2–12 м/добу. При роботі п'яти басейнів продуктивністю 100 тис. м<sup>3</sup>/добу максимальне підняття рівня підземних вод під басейном становило 13 м; при цьому зона аерації дорівнювала 14 м, водний купол зростав у периферійній частині, а його зона розповсюджувалась на відстань до 5 км.

Для аналізу роботи інфільтраційної системи нами використано результати спостереження за роботою інфільтраційного басейну №2 при таких вихідних даних: площа дна басейну дорівнює  $F = 10000$  м<sup>2</sup>, подача води в басейн була постійною з величиною  $Q_{\text{п}} = 22,55$  тис. м<sup>3</sup>/добу, а тривалість фільтроциклу –  $T_{\text{ф}} = 50$  діб.

Спостерігаючи за роботою басейнів, щодня вимірювали глибину води в ньому при  $Q_{\text{п}} = \text{const}$ .

У таблиці наведено осереднені значення розрахункових параметрів інфільтраційного басейну за інтервал часу  $t_i = 5$  діб. Знаючи для кожного (і-го) інтервалу часу роботи басейну протягом фільтроциклу  $T_{\text{ф}} = 50$  діб величину  $H_i$ , ми обліковували:

- 1) об'єм заповнення басейну за кожну добу

$$W_{\text{з.і}} = FH_i, \text{ тис. м}^3/\text{добу}; \quad (14)$$

- 2) щоденний об'єм поповнення басейну за кожну добу

$$W_{\text{п.і}} = W_{\text{з.і}} - W_{\text{з.і-1}}, \text{ тис. м}^3/\text{добу}; \quad (15)$$

- 3) продуктивність басейну за кожну добу

$$Q_{\text{б.і}} = Q_{\text{п}} - W_{\text{п.і}}, \text{ тис. м}^3/\text{добу}; \quad (16)$$

- 4) швидкість інфільтрації води з басейну

$$V_i = Q_{\text{б.і}} / F, \text{ м/добу}; \quad (17)$$

- 5) інтегровану питому водовіддачу басейну (об'єм води, що



профільтрував 1 м<sup>2</sup> площі дна басейну за період часу від початку фільтроциклу і до даного (*k*-го) моменту)

$$q_{п.к} = \sum_{j=1}^k (V_i t_i)_j = 5 \sum_{j=1}^k V_{i,j}, \text{ м}^3/\text{м}; \quad (18)$$

б) інфільтраційний опір

$$S_i = H_i / V_i, \text{ діб}; \quad (19)$$

7) приріст товщини мулової плівки протягом кожного періоду

$$\Delta b_{п.i} = \frac{V_i M t_i}{1000 \gamma_{п}}, \text{ мм}, \quad (20)$$

в якій тривалість інтервалу роботи басейну за кожний період  $t_i = 5$  діб; середня каламутність води (вміст завислих речовин)  $M = 40$  мг/дм<sup>3</sup>, а питома об'ємна маса скелета мулової плівки за результатами лабораторних досліджень  $\gamma_{п} = 0,81$  г/см<sup>3</sup>;

8) загальну товщину мулової плівки на кінець кожного періоду

$$b_{п.к} = \sum_{j=1}^k \Delta b_{п.i}, \text{ мм}, \quad (21)$$

де  $k$  – кількість досліджуваних періодів роботи басейну;

9) питому брудомісткість мулової плівки на кінець кожного періоду

$$G_{п.i} = \gamma_{п} b_{п.i}, \text{ кг/м}^2; \quad (22)$$



10) коефіцієнт фільтрації мулової плівки

$$K_{n,i} = 0,0016 b_{n,i} / S_i, \text{ м/добу}; \quad (23)$$

11) узагальнений параметр фільтрування

$$A_i = 1000 K_n \gamma_n, \text{ кг/м}^2 \cdot \text{добу}. \quad (24)$$

Зупинку подачі вихідної води в басейн здійснювали в кінці 47-ї доби. Отже, протягом 3 діб (48–50) відбувався процес спорожнення басейну від води і в цей період величина  $Q_n = 0$ .

Починаючи з 48-ї доби роботи басейну значення всіх розрахункових параметрів інфільтраційного басейну наведено в таблиці для кожної доби до моменту спорожнення басейну.

*Результати досліджень зміни фільтраційних характеристик басейну протягом фільтроциклу*

Тривалість фільтроциклу $t_i$ , доби	Інфільтраційний опір $S_i$ , доби	Глибина води в басейні $H_i$ , м	Швидкість інфільтрації води $V_i$ , м/добу	Приріст товщини мулової плівки $\Delta b_{n,i}$ , мм	Товщина мулової плівки $b_{n,i}$ , мм	Питома брудомісткість мулової плівки $G_{n,i}$ , кг/м <sup>2</sup>
5	0,51	0,76	1,49	0,36	0,36	0,29
10	0,36	0,79	2,22	0,54	0,90	0,73
15	0,40	0,87	2,17	0,54	1,44	1,17
20	0,48	1,01	2,11	0,53	1,97	1,59
25	0,60	1,22	2,04	0,50	2,47	1,99
30	0,69	1,42	2,05	0,51	2,98	2,41
35	0,76	1,59	2,08	0,51	3,49	2,82
40	0,72	1,61	2,23	0,55	4,04	3,27
45	0,73	1,63	2,23	0,55	4,59	3,72
47	0,75	1,66	2,21	0,22	4,81	3,89
48	-	0,82	0,84	0,03	4,84	3,91
49	-	0,24	0,58	0,01	4,85	3,92
50	-	0	0,24	-	4,85	3,92

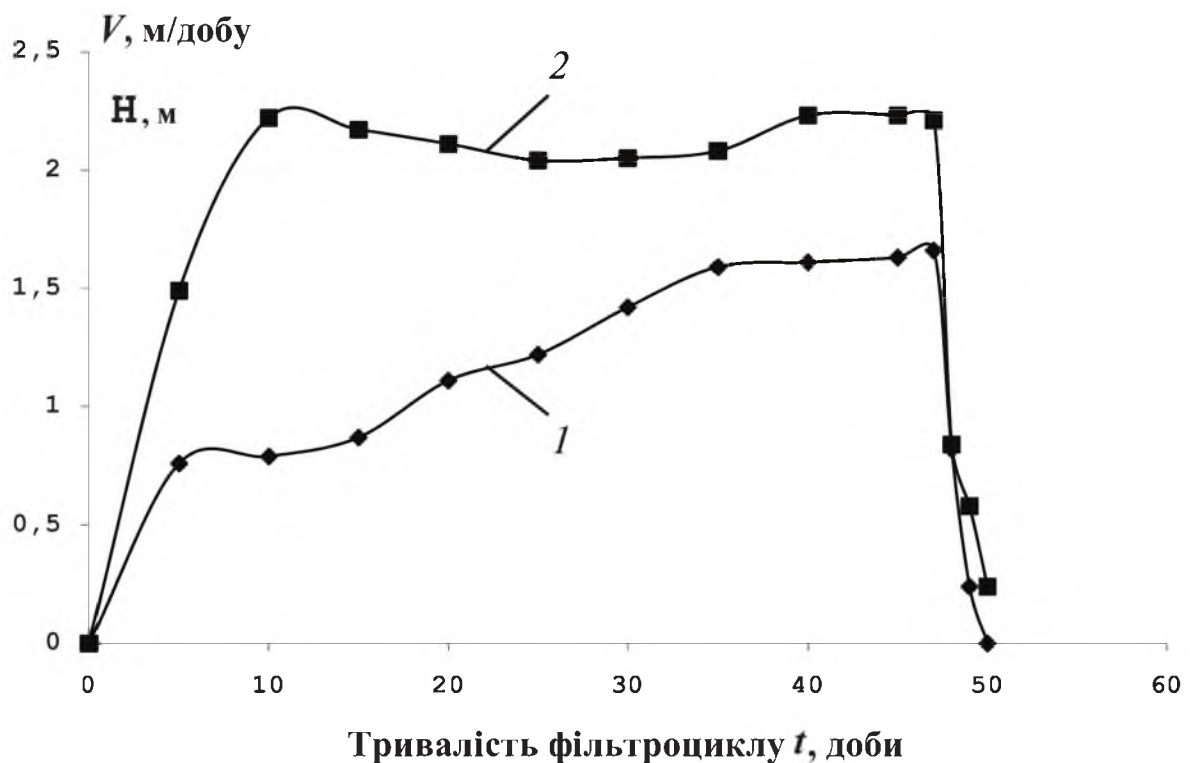


Рис. 2. *Графіки зміни протягом фільтроциклу:*  
 1 – глибини води в басейні  $H$ ; 2 – швидкості інфільтрації  
 води  $V$  при стабільній питомій подачі води  
 $Q_{\text{п}} = 2,25 \text{ м}^3/\text{добу}$  на  $1 \text{ м}^2$  площі дна басейну

Аналіз результатів досліджень, наведених у таблиці і на рис. 2, показав, що за період поповнення вихідною водою інфільтраційного басейну (47 діб) середня глибина води в ньому дорівнювала  $H_{\text{ср}} = 1,26 \text{ м}$ , а середня швидкість інфільтрації води становила  $V_{\text{ср}} = 2,08 \text{ м/добу}$ .

Як впливає з формули (2), швидкість інфільтрації води з басейну  $V_i$  залежить від глибини води в ньому  $H_i$  (гідравлічний напір) та інфільтраційного напору  $S_i$ , котрий, у свою чергу, залежить від гранулометричного складу піску на дні басейну та ступеня закольматованості його завислими речовинами, затриманими на дні басейну при фільтруванні через нього води:

$$V_i = f(H_i; d_{50}; K_H; \delta_{\text{п.і}}), \quad (25)$$

де  $d_{50}$  і  $K_H$  – відповідно 50%-й діаметр частинок піску і коефіцієнт його неоднорідності;  $\delta_{\text{п.і}}$  – товщина мулової плівки на дні басейну.

З рис. 2 видно, що на початку фільтроциклу (перші 5 діб) при збільшенні  $H_i$  зростає і  $V_i$ , але в подальшому внаслідок збільшення величини інфільтраційного опору  $S_i$  інтенсивність зростання  $H_i$  та  $V_i$  зменшується, особливо для швидкості інфільтрації води в підземні водоносні горизонти.

На рис. 3 показано графіки зміни інфільтраційного опору та товщини мулової плівки протягом фільтроциклу.

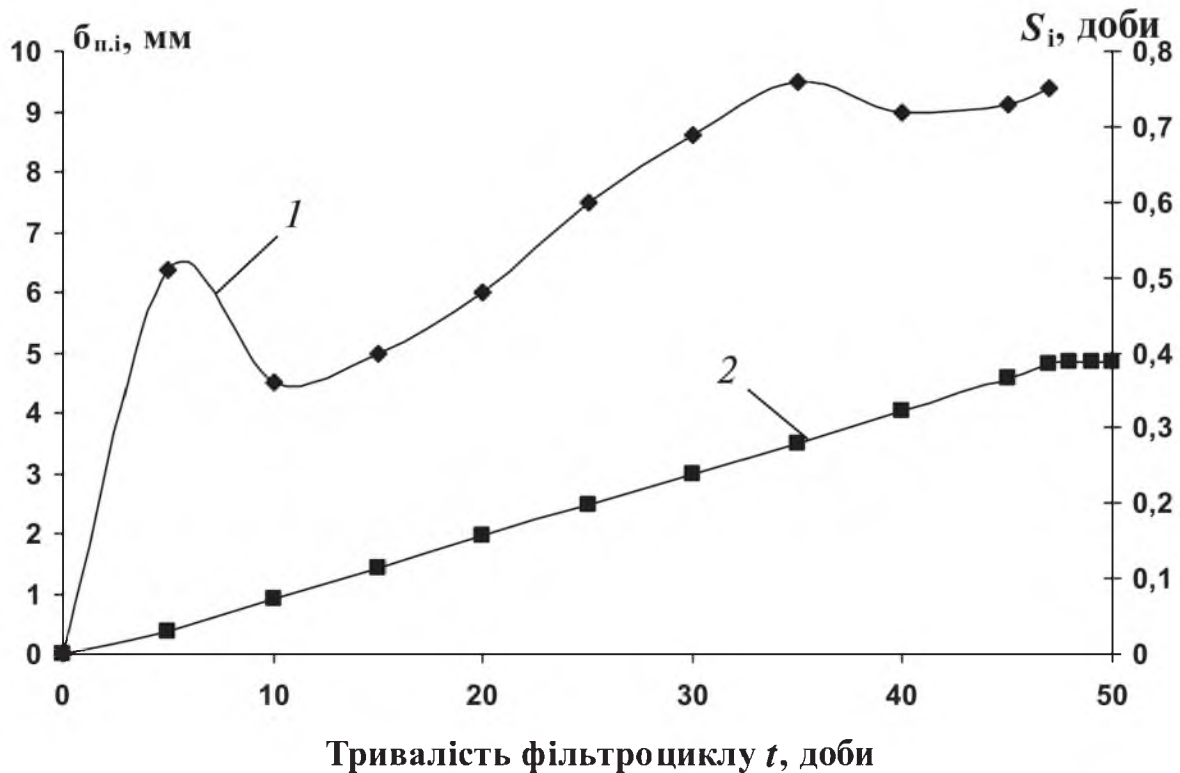


Рис. 3. Графіки зміни протягом фільтроциклу:

1 – інфільтраційного опору  $S_i$ ; 2 – товщини мулової плівки  $b_{п.і}$

**Результати досліджень.** Аналіз результатів досліджень роботи інфільтраційного басейну та обчислень його розрахункових параметрів, наведених у таблиці та на рис. 2 і 3, показав, що протягом фільтроциклу в процесі інфільтрації поверхневої води в підземні водоносні горизонти можна виділити чотири етапи:

- 1) ущільнення фільтрувальних шарів;
- 2) суфозії дрібних частинок верхнього шару піску з фільтрованою водою у підземний водоносний пласт;

3) кольматація верхнього фільтрувального шару осадам, що виділяється з води при її інфільтрації;

4) стабілізація процесу інфільтрації води, коли стають відносно постійними величини глибини води в басейні  $H_1$ , швидкості інфільтрації  $V_1$  та інфільтраційні опори  $S_1$ .

Для даного об'єкта досліджень перший етап роботи басейну тривав від 0 до 5 діб, під час якого басейн наповнився на глибину  $H_1 = 76$  см, а інфільтраційний опір дорівнював  $S_1 = 0,51$  доби. Відбулося ущільнення шарів піску на дні басейну, що призвело до зростання інфільтраційного опору при відносно невеликій швидкості інфільтрації води  $V_1 = 1,49$  м/добу.

Другий етап роботи басейну тривав у період від 5-ї до 10-ї доби інфільтрації води, під час якого внаслідок суфозії дрібних частинок піску в нижні шари відбулось зниження інфільтраційного опору від 0,51 до 0,36 доби та зростання швидкості інфільтрації води від 1,49 до 2,22 м/добу за відносно невеликого збільшення глибини води в басейні від 0,76 до 0,79 м.

Третій етап роботи басейну тривав 25 діб (з 10-ї по 35-ту добу), під час якого відбувалась кольматація верхнього шару піску, що призвела до зростання інфільтраційного опору від 0,36 до 0,76 доби, а відносно постійна швидкість інфільтрації води (2,04–2,22 м/добу) забезпечувалась завдяки безпосередньому зростанню глибини води в басейні від 0,79 до 1,59 м.

Четвертий етап роботи басейну (стабілізація) тривав з 35-ї по 47-му добу, під час якого відносно постійними були всі основні досліджувані параметри: глибина води в басейні (1,59–1,66 м), швидкість інфільтрації води (2,08–2,23 м/добу) та інфільтраційний опір (0,72–0,76 доби). Цей опір залишався постійним протягом 12 діб унаслідок виносу частини видаленого осаду з верхнього у нижче розташовані шари піщаного фільтра.

З рис. 2 видно, що  $H = \text{const}$  і  $V = \text{const}$  має місце в період 40–45 діб від початку роботи інфільтраційного басейну. Для цього періоду будуть такі розрахункові параметри:  $H = 1,62$  м;  $V = 2,23$  м/добу;  $A = 5$  кг/м<sup>2</sup>добу і  $K_{\Pi} = 0,0063$  м/добу.

Після періоду стабілізації роботи басейну настане період зростання інфільтраційного опору  $S$ , а отже, і глибини води в басейні  $H$  (згідно з рівнянням (2)). Якщо відома величина  $H_{\text{макс}}$ , то тривалість цього періоду можна визначити за формулою (10). Наприклад, якщо  $H_{\text{макс}} = 2$  м, то  $T = \frac{5 \cdot 2 \cdot 1000}{2,23^2 \cdot 40} = 50$  діб, тобто з такими розрахунковими параметрами тривалість роботи басейну між його чищеннями становила б 95–100 діб.

**Висновки.** При стабільній питомій подачі води в інфільтраційний басейн  $Q_{\text{п}} = 2,25$  м<sup>3</sup>/добу на 1 м<sup>2</sup> площі дна басейну середня глибина води в ньому становила  $H_{\text{ср}} = 1,26$  м, а середня швидкість інфільтрації  $V_{\text{ср}} = 2,08$  м/добу. Виконані дослідження показали, що протягом фільтроциклу внаслідок збільшення інфільтраційного опору інтенсивність зростання  $H_i$  та  $V_i$  зменшується, а в процесі інфільтрації спостерігались чотири основні етапи. Розроблена математична модель роботи інфільтраційного басейну дає можливість установити тривалість його роботи між чищеннями при досягненні максимальної глибини наповнення басейну.

1. Хоружий П.Д., Яковенко Ю.П. Системи штучного поповнення запасів підземних вод // Зб. матеріалів конф. «Сучасні проблеми охорони довкілля, раціонального використання водних ресурсів та охорони природних і стічних вод» (5–9 жовтня 2008 р., м. Партеніт) – К.: Тов. «Знання» України, 2008. – С. 72–74.

2. Яковенко Ю.П., Хоружий П.Д. Сучасний стан і перспективи розширення використання підземних вод в системах водопостачання України // Труді конф. Проблеми екологічної безпеки довкілля та життєдіяльності людини (24–28 лютого 2009 р., с. Сологин). – К.: Тов. «Знання» України, 2009. – С. 6–8.

3. Хоружий П.Д., Хомуцька Т.П., Яковенко Ю.П. Застосування досвіду переведення поверхневого стоку в підземні водосховища в Прикарпатському регіоні: зб. матеріалів 5-ї наук.-практ. конф. «Вплив руйнівних повеней, паводків, небезпечних геологічних процесів на функціонування інженерних мереж та безпеку життєдіяльності» (23–27 лютого 2009 р., м. Яремча). – К.: НПП «Екологія, наука, техніка», 2009 – С. 107–109.

4. Бурчак Т.В. Инфильтрационные бассейны. – К.: Будівельник, 1978. – 152 с.

*Рассмотрена математическая модель процессов инфильтрации поверхностных вод в подземные водоносные пласты. Приведены результаты натурных исследований работы инфильтрационных бассейнов и изменение их основных расчетных параметров в течение фильтроцикла.*

*It is considered mathematical model of processes infiltration superficial waters in underground water-bearing stratum. Results of natural researches of work infiltration pools and change of their basic settlement parameters during filtration cycle are resulted.*