

УДК 626.862:628.1

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ДРЕНАЖІВ ІЗ СИФОННИМ ВОДОВІДБОРОМ ІНФІЛЬТРАЦІЙНИХ ВОД

П.Д. ХОРУЖИЙ, док. техн. наук,

В.Д. ЛЕВИЦЬКА

Інститут водних проблем і меліорації НААН

Проаналізовано ефективність роботи вертикальних ерліфтних дренажних систем Лівобережжя Каховського водосховища в межах масиву Кам'янський Під. Встановлено, що ерліфтні дренажні системи не ефективні через низький КПД ерліфтних установок, що обумовлено постійним зниженням дебіту свердловин унаслідок кольматації їх фільтрів пластинами гідроксиду заліза, що утворюється в результаті взаємодії повітря, яке нагнітається компресорними станціями до свердловин, та дренажною водою, яка містить колоїдний гідрокарбонат заліза. Запропоновано підвищити ефективність роботи протифільтраційних споруд шляхом переобладнання ерліфтної системи водовідбору з дренажних свердловин на сифонну систему. Наведено методику розрахунку вертикального дренажу із сифонною системою водовідведення безнапірних підземних вод на основі гідравлічних, гідрогеологічних і техніко-економічних розрахунків сумісної роботи всіх взаємодіючих споруд системи протифільтраційного захисту. На основі розрахунку взаємодіючих дренажних свердловин для визначення витрати води з кожної свердловини та зниження статичного рівня води розроблено алгоритм розрахунку вертикального дренажу з сифонною системою водовідбору. Алгоритм включає дев'ять взаємопов'язаних блоків та розрахунки згідно із формулами наведеної методики. Встановлено, що витрати води з дренажних свердловин при сифонному способі водовідбору залежать від глибини H , кількості взаємодіючих свердловин n , відстані між свердловинами l , питомого гідравлічного опору A , радіуса водозабірної свердловини r , висоти вакууму $H_{\text{вак.}}$, коефіцієнта фільтрації водоносного шару K_f , радіуса депресійної воронки R свердловини, взаємодії та дебіту свердловин і багатьох інших факторів, а оптимальні параметри сифонної системи забору води з дренажних свердловин визначаються розрахунками за запропонованою методикою шляхом ітерації.

Ключові слова: вертикальний дренаж, свердловина, сифонний водовід, водоприймальний збірний колодязь, радіус впливу зниження рівнів води, витрата води, гідравлічні опори, інфільтраційні води

Вступ. Одним із найбільш небезпечних проявів шкідливої дії вод є підтоплення, що завдає значної шкоди людям, навколишньому середовищу та економіці держави. У Загальнодержавній цільовій програмі розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпро на період до 2021 року, затвердженої Законом України від 24 травня 2012 року № 4836-VI, визначено першочергові заходи щодо ліквідації наслідків шкідливої дії вод, захисту населених пунктів, виробничих об'єктів та сільськогосподарських угідь [1].

Актуальність дослідження. Аналіз роботи захисного масиву Кам'янський Під. Місто Кам'янка-Дніпровська захищається від підтоплення і затоплення Кам'янською дамбою та влаштованою паралельно їй протифільтраційною завісою довжиною 9,8 км, яка складається з ряду свердловин (біля 200 шт.), пробурених через кожні 50 м.

Відкачування води зі свердловин здійснюється ерліфтною системою [2], роботу якої забезпечує Кам'янська компресорна станція, обладнана трьома діючими компресорами

продуктивністю 120 м³/хв. кожний. За розрахунками з кожної свердловини слід відкачувати 5-7 л/с води, яка надходить у колектор і в загальній кількості близько 1 м³/с подається у Білозерський лиман, звідки насосною станцією перекачується в Каховське водосховище.

Аналіз роботи протифільтраційних завіс з ерліфтною системою відкачування води з дренажних свердловин [3,4] показав недоцільність її застосування в даному регіоні, оскільки підземні води мають високий (у межах 0,41-3,34 мг/дм³) вміст гідрокарбонату заліза Fe (HCO₃)₂, що при контакті з киснем повітря призводить до протікання хімічних реакцій з утворенням нерозчинного осаду з гідроксиду заліза Fe(OH)₃, який кольматує фільтри свердловин, перешкоджаючи надходженню води для її відкачування.

Все це зумовлює постійне зниження дебіту свердловин і призводить до необхідності буріння нових свердловин через кожні 5-8 років їх експлуатації, що вимагає значних коштів.

При цьому ерліфти мають дуже низький ККД, що призводить до перевитрат електроенергії на відкачування інфільтраційних вод.

Пропозиції щодо інтенсифікації роботи системи протифільтраційного захисту (СПФЗ). Оскільки існуючі ерліфтні СПФЗ є ненадійними, неефективними та неекономічними, вимагають великих капітальних витрат на буріння дренажних свердловин і значних перевитрат електроенергії на відкачування води, то, як показали дослідження, виконані одним з авторів [5], замість дренажних свердловин доцільно було б застосувати горизонтальний дренаж з відкачуванням води з водозбірного колодезя вискоєфективними насосами для мінімізації питомих витрат електроенергії на підняття води [6]. Проте в умовах експлуатації Каховського водосховища за надходження з нього інфільтраційних вод зробити це практично неможливо. Для покращення захисту від підтоплення м. Кам'янка-Дніпровська дренажними водами в 1990 р. інститутом "Укрдїпрводгосп" був виконаний робочий проект, що передбачав переобладнання дренажних свердловин СПФЗ заглибними насосами марки ЗЕЦВ 6-16-50. Проте, переобладнання цими насосами свердловин потребує значних капіталовкладень та витрат енергоносіїв. Крім того, глибинні насоси мають низьку експлуатаційну надійність. Тому на даному об'єкті забір води з дренажних свердловин Сташук В.А. [7] пропонує здійснювати за допомогою сифонного збірного водоводу (рис. 1), який прокладають нижче глибини промерзання ґрунтів із безперервним підйомом у напрямку водоприймального колодезя з похилом не менше 0,001.

При створенні вакууму у сифонному збірному водоводі за допомогою вакуум-насоса

під дією атмосферного тиску вода зі свердловини 1 рухається до водозбірного колодезя 2. Вакуум у сифоні біля кожної свердловини визначають як різницю відмітки верху трубки 6 у цій свердловині та відмітки динамічного рівня води в ній з урахуванням втрат напору у водопровідній трубі даної свердловини або колодезя.

Величина вакууму в сифонному водоводі збільшується від найвіддаленішої свердловини до збірного колодезя 2, в якому вакуум має перебувати у допустимих межах (не більше 7-8 м):

$$H_{\text{вак.оон.}} = H_z + h_m \leq 7-8 \text{ м}, \quad (1)$$

де H_z – висота розташування найвищої точки сифона 10 над динамічним рівнем води в збірному колодезі 2; h_m – втрати напору в низхідній ділянці водоводу від точки 10 до колодезя.

Вакуум у будь-якій (k -тій) свердловині визначається за формулою:

$$H_{\text{вак.к.}} = H_{\text{вак.оон.}} - \sum_1^k A_i l_i Q_i^2, \quad (2)$$

де A_i – питомий гідравлічний опір ділянки водоводу між свердловинами; l_i , Q_i – відповідно відстань між цими свердловинами і втрата води.

Відмітки динамічних рівнів води в свердловинах визначають за формулою:

$$Z_{\text{дин.к.}} = Z_{\text{кол.}} + \sum_1^k A_i l_i Q_i^2 = Z_{\text{ст.}} - S_k, \quad (3)$$

де $Z_{\text{кол.}}$ – відмітка динамічного рівня води у збірному колодезі; $Z_{\text{ст.}}$ – відмітка статичного рівня ґрунтових вод (до відкачування

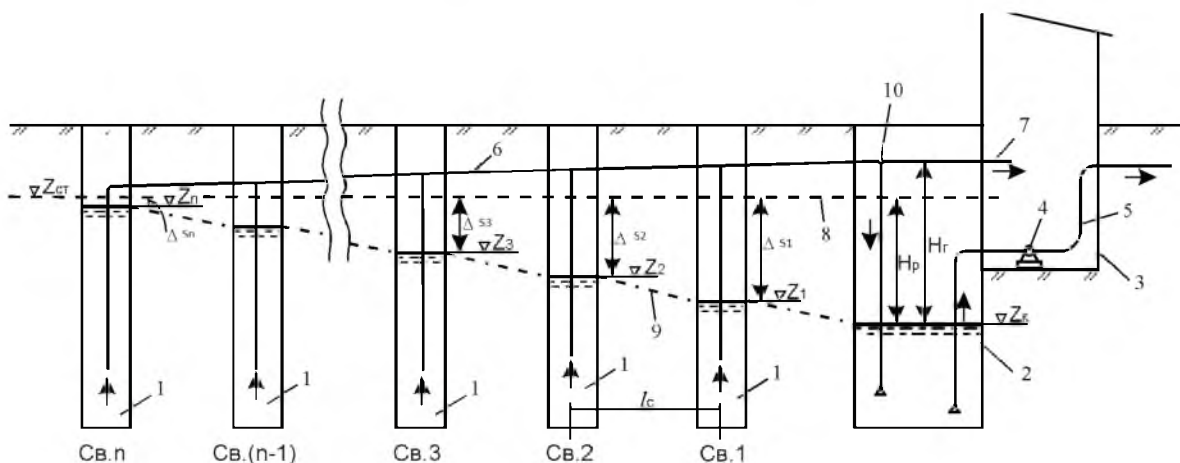


Рис. 1. Схема відведення води від групи з n свердловин сифонним збірним водоводом:

- 1 – водозабірні свердловини; 2 – водоприймальний збірний колодезь; 3 – насосна станція; 4 – горизонтальний відцентровий насос; 5 – напірний трубопровід; 6 – сифонний збірний водовід; 7 – труба до вакуум-насоса; 8 – лінія статичного рівня води у водоносному пласті; 9 – н'єзометрична лінія в сифонному збірному водоводі; 10 – найвища точка сифонного водоводу

води); S_k – зниження статичного рівня води в k -тій свердловині внаслідок відкачування її з дренажних свердловин.

Недоліки методики розрахунку дренажних свердловин з сифонним збірним водоводом, описаній в [7].

- методика дійсна тільки для забору води дренажними свердловинами з напірних водонесних горизонтів. Насправді, потрібно відкачувати ґрунтову воду з безнапірних водонесних горизонтів.

- кожна свердловина працює з різною величиною вакууму в сифоні, що визначається формулою (2), а отже зі збільшенням відстані від водоприймального колодезя 2 (рис.1) витрата води з неї буде зменшуватись при однакових діаметрах і глибинах свердловин.

- відсутні рекомендації з визначення оптимальної кількості свердловин, відстаней між ними та глибини і діаметра кожної свердловини.

Пропозиції для оптимізації роботи вертикальних дренажів.

СПФЗ із сифонною системою водовідбору з дренажних свердловин пропонується виконувати за схемою, наведеною на рис.2, за якою вода з дренажних свердловин 1 (I, II, III, ... n-1, n) притікає по сифонних збірних водоводах 2 у спільний водоприймальний колодезь 3 з двох боків. На насосній станції 4 встановлюються

горизонтальні відцентрові насоси 5 з високим ККД, котрі перекачують воду з колодезя 3 до водоскидного колектора 7, який транспортує її за призначенням. Це дозволяє зменшити капітальні й експлуатаційні витрати в системі протифільтраційного захисту територій від підтоплення з боку Каховського водосховища.

При проектуванні вертикальних дренажів із сифонною системою водовідбору потрібно вирішувати питання, пов'язані з визначенням:

- оптимальної глибини H і діаметра d дренажних свердловин;

- оптимальної кількості водозабірних свердловин n_{opt} і відстані між ними l_c , м;

- розрахункових витрат води з кожної свердловини і зниження статичного рівня води в них з урахуванням їхньої гідрогеологічної взаємодії при відкачуванні води з усіх свердловин;

- оптимальних діаметрів труб на кожній ділянці сифонного збірного водоводу.

Відповідь на ці питання можна знайти на основі гідравлічних, гідрогеологічних і техніко-економічних розрахунків сумісної роботи всіх взаємодіючих споруд системи протифільтраційного захисту [8].

Розрахунок взаємодіючих дренажних свердловин. Розглянемо роботу взаємодіючих свердловин при відкачуванні води з безнапірних водонесних пластів (рис.3.)

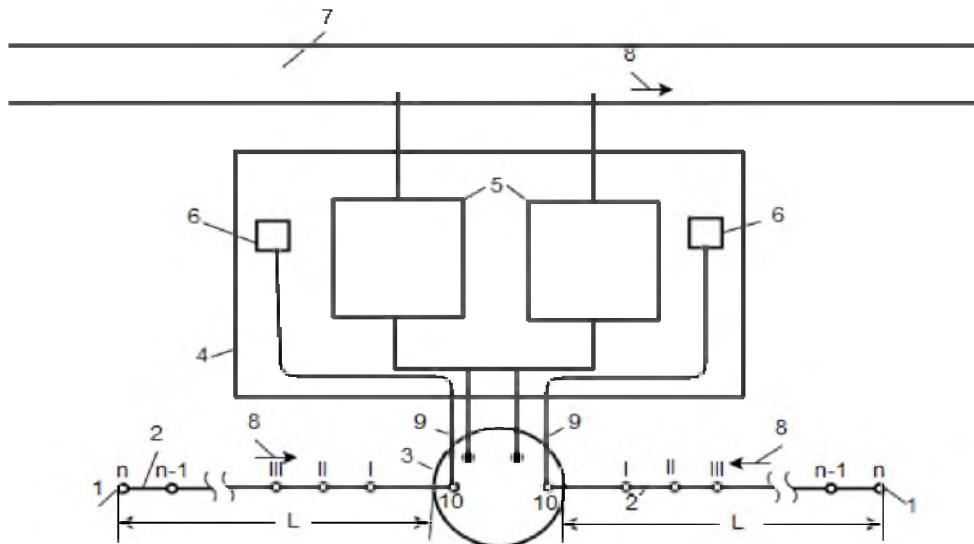


Рис. 2. Схема влаштування сифонної системи водовідбору з дренажних свердловин на Кам'янка-Дніпровській протифільтраційній завісі:

1 – дренажні свердловини (I, II, III, ... n-1, n); 2 – сифонний збірний водовід;

3 – водоприймальний збірний колодезь; 4 – насосна станція;

5 – горизонтальні відцентрові насоси; 6 – вакуум-насоси; 7 – водоскидний

колектор; 8 – напрям руху води; 9 – труба до вакуум-насоса; 10 – найвища

точка у сифонному водоводі, до якої підключається вакуум-насос

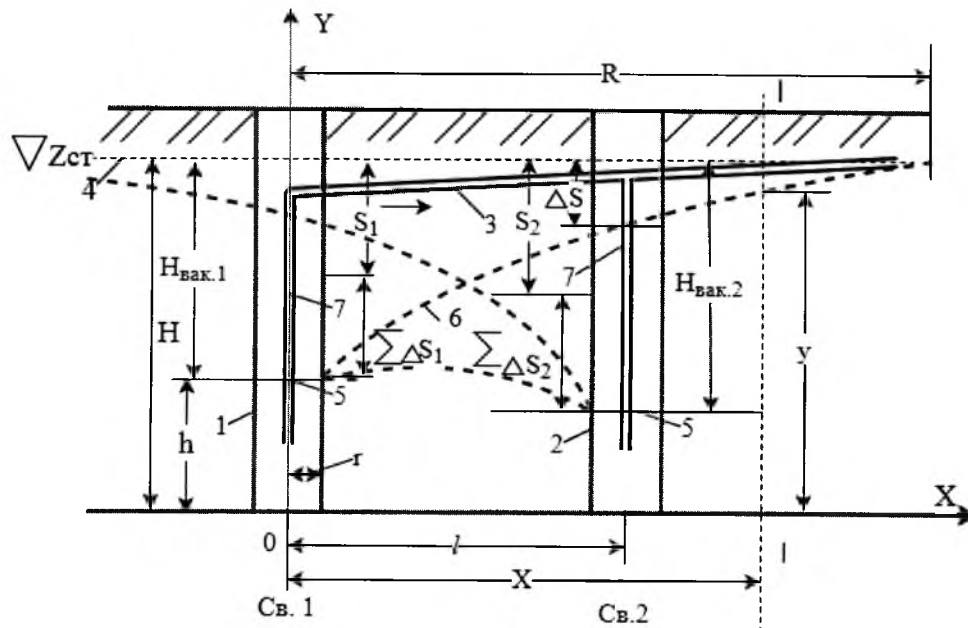


Рис. 3. Розрахункова схема забору ґрунтових вод із безнапірного водоносного пласта взаємодіючими дренажними свердловинами з сифонним збірним водоводом:

1, 2 – дренажні свердловини Св. 1 і Св. 2; 3 – сифонний збірний водовід;
4 – статичний рівень ґрунтових вод із відміткою $Z_{ст}$; 5 – динамічний рівень води у свердловинах; 6 – депресійна воронка у водоносному пласті;
7 – водопідійомна труба свердловини

За відсутності відкачування води з дренажних свердловин у них встановлюється стовп води висотою H , що вимірюється від статичного рівня води у водоносному горизонті $Z_{ст}$, і до низу фільтра свердловини (рис.3). Після запуску в роботу сифонного збірного водоводу 3 останній заповнюється водою. При цьому рівень води у свердловинах знижується на величину вакууму у вхідному отворі водопідійомної труби свердловини, що визначається за формулою (2).

Отже, чим ближче розташована свердловина до водозбірного колодязя, тим більший в ній вакуум, більше зниження статичного рівня, менша відмітка динамічного рівня води, що визначається за формулою (3), а отже і більша витрата води, що відкачується з даної свердловини.

Розглянемо можливість визначення витрати води з усіх n свердловин, а отже і розрахунку продуктивність насосної станції Q_n :

$$Q_n = \sum_1^n Q_i, \quad (4)$$

Для найпростішого випадку відкачування вода з одинокій свердловини витратою Q навколо неї утворюється депресійна воронка з радіусом R , рівень води в ній знизиться на величину

$$S = H_{вак}, \quad (5)$$

а висота стовпа води дорівнює

$$h = H - S. \quad (6)$$

Встановимо осі координат X - Y : вісь $0Y$ – по осі свердловини, а вісь $0X$ – паралельно поверхні землі на рівні нижньої частини фільтра, тобто $Z_{ст} - H$.

Проведемо циліндричний переріз водоносного пласта I-I навколо свердловини на відстані x від осі $0Y$.

При сталому напірному русі води витрата води, що забирається зі свердловини, дорівнює витраті води Q , що притікає із пласта в цю свердловину, тобто

$$Q = \omega v = 2 \pi x y K_\phi \frac{d_y}{d_x}. \quad (7)$$

Розділивши перемінні і проінтегрувавши отриманий вираз при зміні X в інтервалі від r до R і відповідних значеннях від h до H , отримали:

$$Q = \int_r^R \frac{dx}{x} = 2\pi K_\phi \int_h^H y \, dy, \quad (8)$$

$$\text{звідки } Q (\ln R - \ln r) = \pi K_\phi (H^2 - h^2) \quad (9)$$

$$\text{або } Q = \frac{\pi K_\phi (H^2 - h^2)}{\ln R/r} = \frac{\pi K_\phi S (2H - S)}{\ln R/r} =$$

$$= \frac{1,36K_{\phi}S(2H - S)}{\lg R/r} \quad (10)$$

У цих формулах: r – радіус свердловини, K_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації порід водоносного пласта.

Для випадку відкачування води сифонним водоводом з одинокої свердловини з урахуванням виразу (5) формулу (10) можна записати так:

$$Q = \frac{\pi K_{\phi} H_{\text{вак.}} (2H - H_{\text{вак.}})}{\ln R/r} = \frac{1,36K_{\phi} H_{\text{вак.}} (2H - H_{\text{вак.}})}{\lg R/r} \quad (11)$$

Залежність $Q = f(H_{\text{вак.}})$ має вигляд квадратної параболи.

При відкачуванні води із взаємодіючих дренажних свердловин відбувається додаткове зниження статичного рівня води в них унаслідок взаємного впливу одна на одну.

Так, при відкачуванні води із свердловини Св. 1 (рис. 3) у сусідній з нею свердловині Св. 2 відбувається зниження статичного рівня води на величину ΔS . Аналогічними розрахунками формулу 9 можна записати так:

$$Q \ln \frac{R}{R-l} = \pi K_{\phi} [H^2 - (H-\Delta S)^2], \quad (12),$$

де l – відстань між свердловинами. Після перетворень виразу 12 отримали:

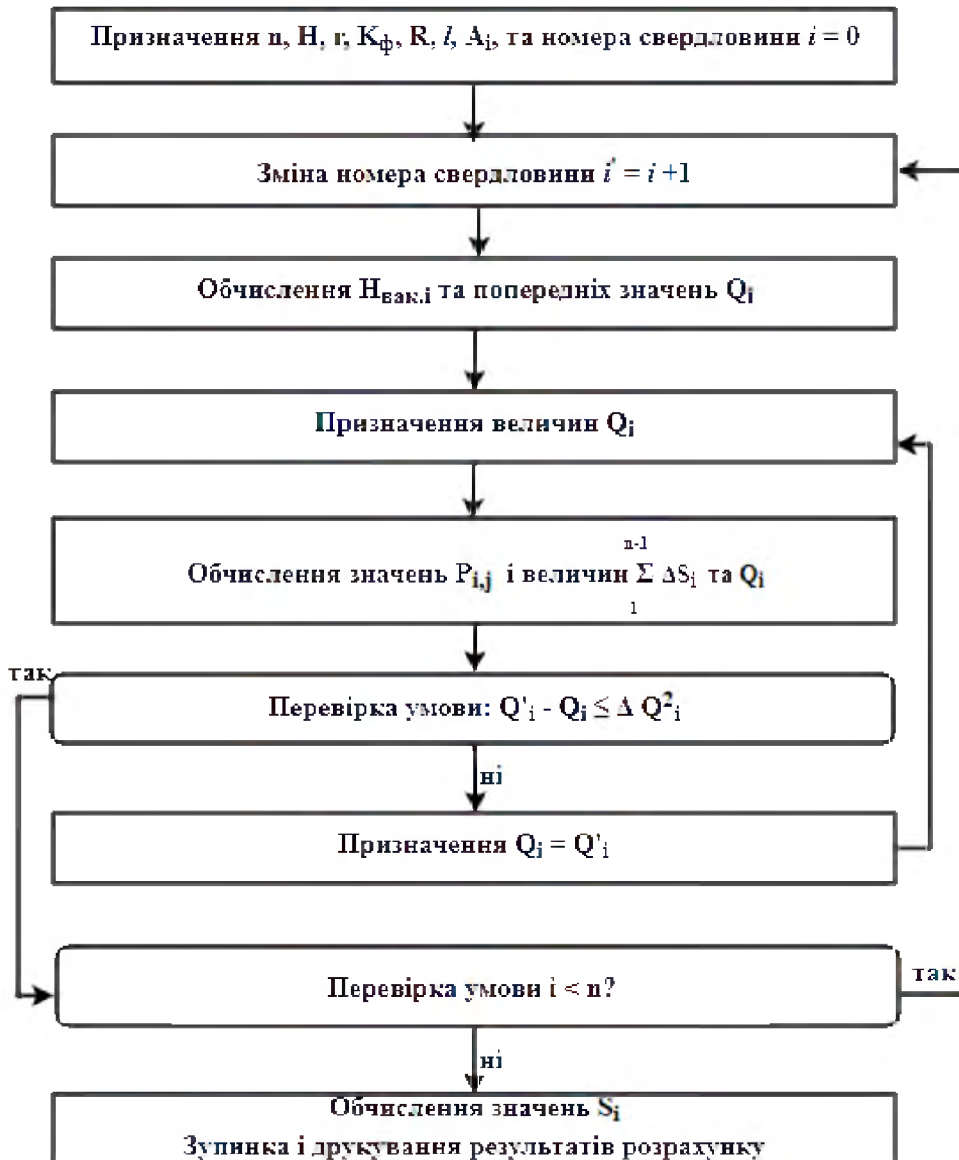


Рис. 4. Блок-схема розрахунків вертикального дренажу із сифонною системою водовідбору

$$\Delta S = H - \sqrt{H^2 - Q \ln \frac{R}{R-l}}, \quad (13)$$

У загальному випадку за одночасної роботи n взаємодіючих дренажних свердловин у кожній з них буде відбуватись додаткове зниження рівня води від впливу $n - 1$ свердловини, тобто можна записати:

$$\sum_1^{n-1} \Delta S_i = (n-1)H - \sum_1^{n-1} \sqrt{H^2 - Q_i P_{i,j}}, \quad (14)$$

де Q_i – витрата води з кожної дренажної свердловини; $P_{i,j}$ – параметр, що враховує гідрогеологічні умови водоносного пласта та відстані даної i -тої свердловини від кожної (j -тої) з решти взаємодіючих свердловин:

$$P_{i,j} = \ln \frac{R}{R-l_{i,j}}, \quad (15)$$

$l_{i,j}$ – відстані i -тої свердловини від кожної (j -тої) з решти $(n - 1)$ взаємодіючих свердловин, тобто при роботі n свердловин будемо мати загальну кількість значень $P_{i,j}$:

$$\sum_1^n P_{i,j} = n(n-1). \quad (16)$$

Таким чином, для взаємодіючих свердловин витрату води з кожної свердловини можна визначати за формулою:

$$Q_i = \frac{\pi K_\phi H_{\text{вак.}i}}{\ln \frac{R}{r}} \left[2 \left(H - \sum_1^{n-1} \Delta S_i \right) - H_{\text{вак.}i} \right], \quad (17)$$

а зниження статичного рівня води в i -тій свердловині – за виразом

$$S_i = \left(H - \sum_1^{n-1} \Delta S_i \right) - \sqrt{\left(H - \sum_1^{n-1} \Delta S_i \right)^2 - Q_i \frac{\ln \frac{R}{r}}{\pi K_\phi}}. \quad (18)$$

Для визначення величини Q_i та S_i побудовано блок-схему розрахунків вертикального дренажу із сифонною системою водовідбору, що зображена на рис. 4.

Встановлено, що витрати води з дренажних свердловин при сифонному способі водовідбору залежать від багатьох факторів:

$$Q_i = f(H, r, n, l, A, H_{\text{вак.}}, K_\phi, R). \quad (19)$$

Визначити оптимальні конструктивні і технологічні параметри таких дренажів можна тільки на основі техніко-економічних розрахунків з урахуванням сумісної роботи всіх взаємодіючих гідротехнічних споруд за наведеною методикою для забезпечення потрібного зниження рівня ґрунтових вод при мінімізації капітальних і експлуатаційних витрат [11].

Висновки. Аналіз роботи протифільтраційної завіси з ерліфтною системою водовідбору зі свердловин показав недоцільність її застосування через низький ККД ерліфтів, що призводить до значних перевитрат електроенергії, та постійної кольматації фільтрів свердловин гідроксидом заліза, внаслідок чого виникає необхідність буріння нових свердловин, що значно підвищує експлуатаційні витрати.

Ерліфтні системи водовідбору з дренажних свердловин слід переобладнати сифонними системами (рис.1, 2), а для їх розрахунку доцільно застосувати розроблену методику, що дозволяє аналізувати сумісну роботу всіх взаємодіючих гідротехнічних споруд, визначаючи витрати води з кожної свердловини за формулою (17) і зниження рівня ґрунтових вод у ній за формулою (18) при використанні блок-схеми (рис. 4).

Бібліографія

1. Загальнодержавна цільова програма розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпро на період до 2021 року, затверджена Законом України від 24 травня 2012 року № 4836-VI. Відомості Верховної Ради (ВВР), 2013, № 17, ст. 146 <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/4836-17>.
2. Хоружий П.Д., Крученко В.Д. Аналіз роботи дренажних свердловин з ерліфтною системою водовідбору // Меліорація і водне господарство, 2004 Вип. 91. Київ: Аграрна наука, С. 209-218.
3. Хоружий П.Д., Левіцька В.Д. Шляхи покращення роботи комплексу захисних споруд Кам'янського Поду // Меліорація і водне господарство, 2016. Вип. 104. Київ: С. 119-125.
4. Левіцька В.Д. Аналіз сучасного стану та шляхи покращення роботи Кам'янка-Дніпровської протифільтраційної завіси // Збірник статей наук.-практ. конференції: Вода: проблеми і шляхи вирішення. м.Рівне 5-8 липня 2017 р. Житомир: вид-во ЕЦ «Укркобіокон» 2017. С. 196-200.
5. Заключний звіт НДР за договором № 677 «Дослідити, науково обґрунтувати та розробити технологічні заходи по інтенсифікації роботи дренажних свердловин з ерліфтною системою водовідбору» ІГІМ УААН. Київ 2005. 25 с.
6. Хомутецька Т.П. Енергоощадне водопостачання. Київ: Аграрна наука, 2016. 304 с.
7. Сташук В.А. Еколого-економічні основи басейнового управління водними ресурсами. Дніпропетровськ: ВАТ «Видавництво «Зоря», 2006. 480 с.

8. Хоружий П.Д. Расчет гидравлического взаимодействия водопроводных сооружений. Львов: Вища школа, 1983. 152 с.
9. Бочевар Ф.М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. Москва: Недра 1968. 328 с.
10. Jakovlev V.V., Svirenko L.P., Chebanov O.J., Spirin O.I. Rising groundwater levels in Northern-eastern Ukraine: hazardous trends in urban areas/Current problems of Hydrogeology on urban areas. Urban agglomerates and industrial centers. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2011. P 221-241.
11. Олейник А.Я. Гидродинамика дренажа. Київ: Наукова думка, 1981. 284 с.
12. Хоружий П.Д., Хомутецька Т.П., Хоружий В.П. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. Київ: Аграрна наука, 2008. 534 с.

П.Д. Хоружий, В.Д. Левицкая

**Методика расчета вертикальных дренажей с сифонным водоотбором
инфильтрационных вод**

Проанализирована эффективность работы вертикальных эрлифтных дренажных систем Левобережья Каховского водохранилища в пределах массива Каменский Под. Установлено, что эрлифтные дренажные системы не эффективны из-за низкого КПД эрлифтных установок, вызванного постоянным снижением дебита скважин вследствие коагулирования их фильтров хлопьями гидроксида железа, который образуется в результате взаимодействия воздуха, нагнетаемого компрессорными станциями к скважинам, и дренажной водой, содержащей коллоидный гидрокарбонат железа. Предложено повысить эффективность работы противофильтрационных сооружений путем переоборудования эрлифтной системы водоотбора из дренажных скважин на сифонную систему. Приведена методика расчета вертикального дренажа с сифонной системой водоотведения безнапорных подземных вод на основе гидравлических, гидрогеологических и технико-экономических расчетов совместной работы всех взаимодействующих сооружений системы противофильтрационной защиты. На основе расчета взаимодействующих дренажных скважин для определения расхода воды из каждой скважины и снижения статического уровня воды разработан алгоритм расчета вертикального дренажа с сифонной системой водоразбора. Алгоритм включает девять взаимосвязанных блоков и расчеты по формулам приведенной методики. Установлено, что расходы воды из дренажных скважин при сифонном способе водоотбора зависят от глубины H , количества взаимодействующих скважин n , расстояния между скважинами l , удельного гидравлического сопротивления A , радиуса водозаборной скважины r , высоты вакуума $H_{\text{вак.}}$, коэффициента фильтрации водоносного слоя K_f , радиуса депрессионной воронки R скважины, дебита скважин и многих других факторов, а оптимальные параметры сифонной системы забора воды из дренажных скважин определяются с помощью расчетов по предложенной методике путем итерации.

P.D. Khoruzhyy, V.D. Levytska

**The method of calculation of vertical drain performance when using siphon drains
for infiltration water intake**

The efficiency of the vertical air-lift drainage systems of the left bank of the Kakhovka water reservoir within the Kamenskiy Pod massif is analyzed. It is established that air-lift drainage systems are not effective because of low efficiency of air-lift systems caused by a constant decrease in production rates due to the flotation of their filters with flakes of ferric hydroxide that is formed as a result of the interaction of air pumped by compressor stations to the wells and drainage water containing colloidal hydrogen carbonate gland. It is proposed to increase the efficiency of the operation of anti-filtration structures by means of re-equipping the air-lift system from the drainage wells to the siphon system. The technique for calculating vertical drainage with a siphon drainage system of gravity groundwater is presented on the basis of hydraulic, hydrogeological and technical-economic calculations of the joint operation of all interacting structures of the anti-filtration protection system. Based on the calculation of the interacting drainage wells, an algorithm for calculating vertical drainage with a siphon tapping system has been developed to determine the flow rate from each well and to reduce the static water level. The algorithm includes nine interrelated blocks and calculations using the formulas of the above methodology. It has been established that the water flow from the drainage wells with the siphoning method of water abstraction depends on the depth H , the number of interacting wells n , the distance between the wells l , the specific hydraulic resistance A , the radius of the water intake well r , the vacuum height $H_{\text{vac.}}$, The aquifer layer filtration coefficient, a depression funnel R of a well, well production rate and many other factors, and the optimum parameters of a siphon system for withdrawing water from drainage wells are determined by calculations according to the proposed technique by iteration.