

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg201901-156>

Available at: <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/156>

УДК 626.862:628.1

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОТИФІЛЬТРАЦІЙНИХ ЗАВІС ІЗ СИФОННИМ ВОДОВІДБОРОМ ІЗ ДРЕНАЖНИХ СВЕРДЛОВИН (НА ПРИКЛАДІ КАМ'ЯНКА-ДНІПРОВСЬКОЇ ПРОТИФІЛЬТРАЦІЙНОЇ ЗАВИСИ)

В.Д. Левицька<sup>1</sup>, П.Д. Хоружий<sup>2</sup>, докт. техн. наук

<sup>1</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0003-2213-1696>; e-mail: [veral@ukr.net](mailto:veral@ukr.net)

<sup>2</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-9433-361X>; e-mail: [petro1939@bigmir.net](mailto:petro1939@bigmir.net)

**Анотація.** Проаналізовано роботу протифільтраційних завіс із сифонним водовідбором із дренажних свердловин на прикладі лівобережжя Каховського водосховища для умов захисту від підтоплення Кам'янського Поду та показано, що вартість перекачування 1 м<sup>3</sup> води буде значно дешевішою, ніж у діючій протифільтраційній завісі з ерліфтною системою водовідбору. Але при цьому виникають проблеми забезпечення рівномірного зниження рівнів води у водоносному пласті по всій протяжності сифонного водоводу. При проектуванні зазначених протифільтраційних завіс необхідно врахувати існуючі гідрогеологічні умови та визначити параметри, на які можливо вплинути, зокрема: оптимальна кількість свердловин і відстані між ними; розрахункові діаметри та глибини кожної свердловини, що підключаються до сифонного збірного водоводу; розрахункові витрати води з кожної свердловини та зниження статичного рівня води в них з урахуванням гідрогеологічного впливу одна на одну при їхній сумісній роботі; оптимальні діаметри труб на кожній ділянці сифонного водоводу та забезпечення надійності його роботи. Для оптимізації протифільтраційних завіс із сифонною системою водовідведення запропоновано бурити дренажні свердловини різної глибини та розміщувати їх на різних відстанях одна від одної по всій довжині водозбірного водоводу, застосовуючи методикку для визначення належної глибини свердловини залежно від її діаметра та величини вакууму. Проведені дослідження на прикладі розрахунку Кам'янка-Дніпровської протифільтраційної завіси показали, що найекономічнішим з усіх можливих є варіант завіси, в якому дренажні свердловини мають різну глибину та розміщені на різних відстанях між собою, що забезпечує мінімальну питому вартість на спорудження свердловин і сифонного збірного водоводу при дотриманні рівномірного водозниження.

**Ключові слова:** вертикальний дренаж, водопонижуюча свердловина, сифонний водовід, радіус впливу зниження рівнів води, витрати води, гідравлічні опори, інфільтраційні води, водоприймальний збірний колодезь, зниження рівнів води.

**Постановка проблеми.** Спорудження греблі Каховської гідроелектростанції підняло рівень води в Дніпрі до відмітки 16,0 м, а у створі Нікополь-Кам'янка-Дніпровська рівні води піднялися на 10-11 м, що призвело до підтоплення заплави р. Дніпро і низинних ділянок із розташованими на них населеними пунктами і промисловими підприємствами.

Для захисту територій від затоплення та підтоплення з боку Каховського водосховища була розроблена система берегового вертикального дренажу у вигляді лінійного ряду вертикальних свердловин із відбором води з них ерліфтами.

Реальна дійсність виявила два основних недоліки таких протифільтраційних завіс:

- низький ККД ерліфтів (0,2-0,25), що призводить до значних перевитрат електроенергії;
- недовговічність роботи свердловин (зменшення дебіту через 8 років у 2 рази) внаслідок колючої дії фільтрів гідроксидом

заліза, що змушує постійно бурити нові свердловини.

**Актуальність дослідження.** Протифільтраційна завіса (ПФЗ) – це комплекс інженерних споруд, до складу яких входять дренажні свердловини, пристрої для піднімання води на поверхню землі, трубопроводи, канали, насосні та компресорні станції.

Одним з ефективних методів водовідведення з дренажних свердловин є застосування сифонного способу [1-5]. У такій системі сифонний збірний водовід прокладають нижче глибини промерзання ґрунтів із безперевним підйомом у напрямку водоприймального колодезя з похилом не менше 0,001 (рис. 1).

При створенні вакууму у сифонному збірному водоводі за допомогою вакуум – насоса під дією сил атмосферного тиску вода зі свердловин рухається до водозбірного колодезя.

В Україні є досвід експлуатації ПФЗ із сифонною системою водовідбору, яка побудована в м. Кременчук Полтавської області [5].

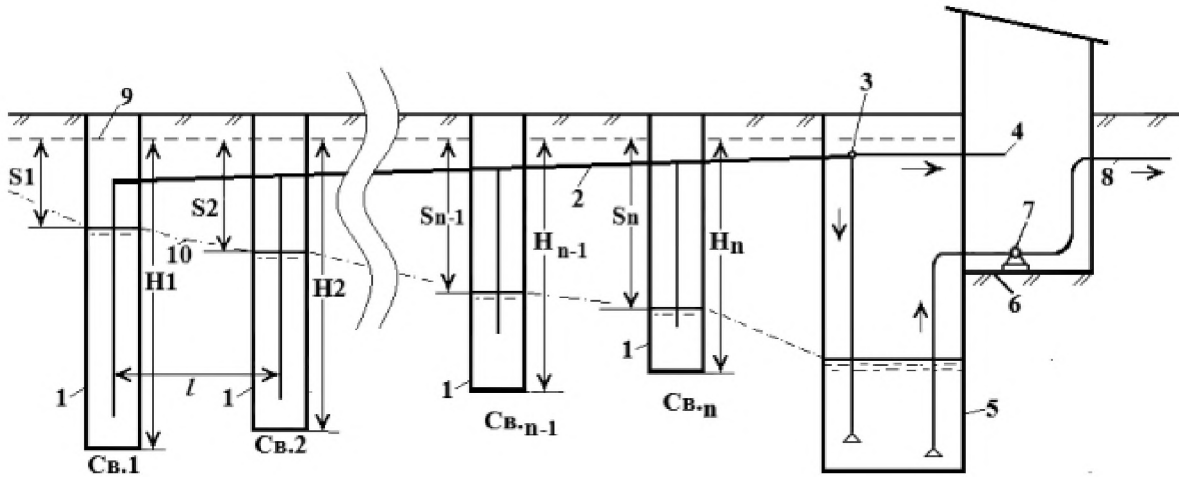


Рис. 1. Схема роботи ПФЗ із сифонним збірним водоводом та перемінними глибинами дренажних свердловин:

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

Порівняння техніко-економічних показників роботи ПФЗ з ерліфтною та сифонною системою водовідбору з дренажних свердловин показали, що вартість перекачування 1 м<sup>3</sup> води ерліфтною системою водовідбору більша у 5,4 рази від сифонної системи водовідбору [2].

**Задачі наукових досліджень.** При проектуванні ПФЗ із сифонною системою водовідбору з дренажних свердловин слід вирішувати такі питання:

- оптимальну кількість свердловин і відстані між ними;
- розрахункові глибини кожної свердловини, що підключаються до сифонного збірного водоводу;
- розрахункові витрати води з кожної свердловини та зниження статичного рівня води в них з урахуванням гідрогеологічного впливу одна на одну при їхній сумісній роботі;
- оптимальні діаметри труб на кожній ділянці сифонного збірного водоводу та забезпечення надійності його роботи.

Аналіз роботи ПФЗ із сифонною системою водовідбору з дренажних свердловин виявив такі суттєві недоліки:

- потреба у забезпеченні надійної герметизації сифонного збірного водоводу, оскільки при його найменшому пошкодженні та розгерметизації зникає вакуум у трубах і перестає надходити вода з усіх дренажних свердловин, підключених до нього;
- з дренажних свердловин при однаковій глибині їх буріння надходять різні витрати води, що залежать від величини вакууму

у кожній свердловині, що здійснюється залежно від відстані до водоприймального збірного колодезя; все це призводить до різної глибини зниження рівнів води у свердловинах, що не відповідає оптимальним розрахунковим значенням.

Для усунення цих недоліків пропонуються такі заходи:

- сифонний збірний водовід слід споруджувати з міцних водопровідних труб, захищених від корозії, і прокладати їх бажано в захисному кожусі;
- глибини всіх дренажних свердловин слід приймати різними (рис. 1) та розраховувати їх по нижченаведеній методиці.

**Методика оптимізаційних розрахунків.** У нашій роботі [7] показано, що витрату води з будь-якої з  $n$  гідравлічно взаємодіючих дренажних свердловин можна визначити за формулою:

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

де  $H$  – висота стовпа води, що вимірюється від статичного рівня води у водоносному горизонті та до низу фільтра свердловини (рис. 2);  $K_\phi$  – коефіцієнт фільтрації порід водоносного пласта;  $H_{\text{вак},i}$  – величина вакууму в  $i$ -тій свердловині, що визначається за формулою:

$$H_{\text{вак},i} = H_{\text{вак},\text{доп}} - \sum h_i, \quad (2)$$

де  $H_{\text{вак},\text{доп}}$  – допустимий вакуум у найвищій точці сифонного збірного водоводу (рис. 1), який має бути не більше 7-8 м;  $\sum h_i$  – сума втрат

напору в ділянках сифонного збірного водоводу від водоприймального збірного колодязя до  $i$ -тої свердловини, що визначається для будь-якої ( $k$ -ої) свердловини за формулою:

$$\sum_1^k h_i = \sum_1^k A_i * l_i * Q_i, \text{ м} \quad (3)$$

де  $A_i$  – питомий гідравлічний опір ділянки водоводу між свердловинами (с/л)<sup>2</sup>м;  $l_i$  – відповідно відстань між свердловинами, м;  $Q_i$  – витрата води, л/с;  $R$  – радіус депресійної воронки, яка утворюється навколо свердловини при відкачуванні з неї витрати води  $Q$ , м<sup>3</sup>;

$r$  – радіус свердловини, м;  $\sum_1^{n-1} \Delta S_i$  – додаткове зниження води в  $i$ -тій свердловині від впливу всіх інших  $n-1$  взаємодіючих свердловин, м.

Як бачимо з формули 1, величина витрати води з дренажної свердловини залежить від величини вакууму в ній  $H_{\text{вак},i}$ , гідрологічних характеристик водоносного пласта ( $K_\phi, R$ ), конструктивних розмірів свердловини ( $H, r$ ) та взаємного впливу свердловин одна на одну ( $\sum \Delta S_i$ ), що залежить від відстаней між свердловинами  $l$  та місця розташування даної  $i$ -тої свердловини серед групи взаємодіючих свердловин, підключених до спільного сифонного збірного водоводу.

Із формули (1) бачимо, що висоту стовпа води в будь-якій ( $i$ -тій) свердловині можна визначити за формулою:

$$H_i = \frac{Q_i \ln R/r}{2\pi K_\phi H_{\text{вак},i}} + \sum_1^{n-1} \Delta S_i + \frac{H_{\text{вак},i}}{2}, \quad (4)$$

Тобто для водоносного пласта з відомими характеристиками ( $K_\phi, R$ ), прийнятими

діаметрами дренажних свердловин ( $r = d/2$ ) та відстанями між ними  $l$  (рис. 2) потрібна глибина свердловин  $H_i$  залежить від розрахункової величини вакууму у ній  $H_{\text{вак},i}$ , який визначається у напрямку віддаленості від водоприймального водозбірного колодязя (рис. 1).

Можлива кількість дренажних свердловин  $n$  і оптимальні відстані між ними  $l$  визначаються на основі гідравлічних і техніко-економічних розрахунків.

**Результати досліджень.** Як користуватись запропонованою методикою показано на прикладі розрахунку Кам'янка-Дніпровської ПФЗ, вертикальні дренажі якої були побудовані у 1956 р. для захисту від підтоплення територій м. Кам'янка-Дніпровська та с. Велика Знам'янка [2].

Дренажні свердловини глибиною  $H_{\text{св}} = 20-32$  м і діаметром  $d_{\text{св}} = 219$  мм з фільтрами  $d_\phi = 168$  мм були пробурені вздовж берегової лінії довжиною  $L_{\text{др}} = 9,5$  км у кількості  $n = 191$  шт. із загальною витратою  $Q_{\text{заг}} = 1350$  л/с. Свердловини були розташовані в середньому на відстані 50 м одна від одної. При середній витраті води з кожної свердловини  $Q_{\text{св}} = 7$  л/с забезпечувалось зниження рівня ґрунтових вод на глибину  $S = 2,5$  м, що дозволяло захищати прилеглі території від підтоплення інфільтраційними водами від Каховського водосховища. Але, як відмічено вище, ПФЗ з ерліфтною системою відкачування води з дренажних свердловин виявилась ненадійною та неекономічною.

Проаналізуємо роботу для цих же умов ПФЗ із сифонною системою відкачування води зі свердловин. Дослідження залежності

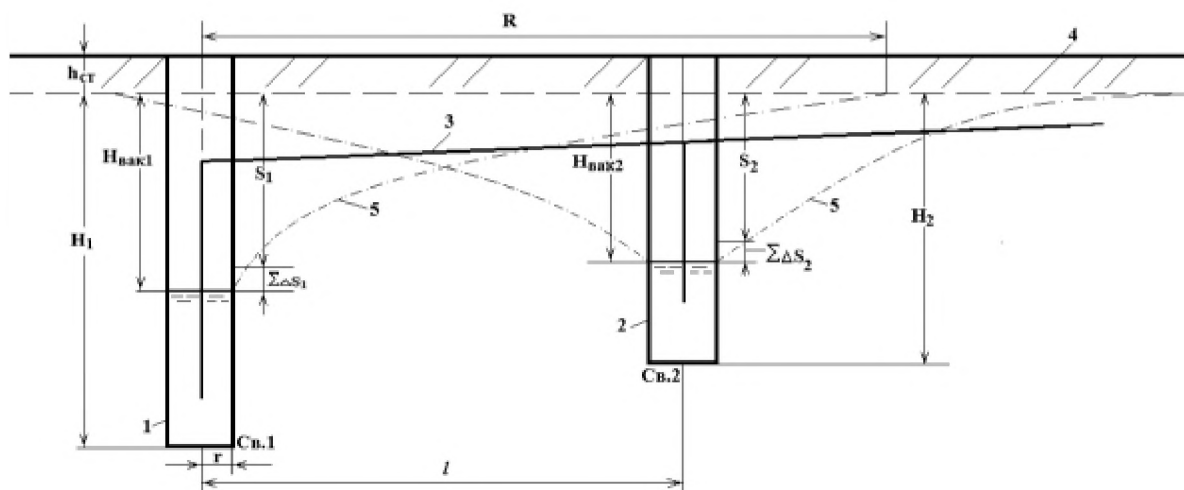


Рис. 2. Схема сумісної роботи двох дренажних свердловин із сифонним збірним водоводом: 1,2 – дренажні свердловини; 3 – сифонний збірний водовід; 4 – статичний рівень ґрунтових вод; 5 – депресійна воронка радіусом R навколо свердловини.

потрібної глибини дренажних свердловин від їх діаметра і величини вакууму формулу (4) можна записати у такому вигляді (без урахування додаткового зниження води зі свердловин при їх гідрогеологічній взаємодії  $\sum_1^{n-1} \Delta S_i$ ):

$$H_i = 0,5 \left( \frac{Q_i \ln 2R / d_{св.}}{\pi K_{\phi} H_{вак.і}} + H_{вак.і} \right) \quad (5)$$

де  $d_{св.}$  – діаметр свердловини.

Як бачимо, потрібна глибина свердловини при відомій витраті води з неї  $Q_i$  та стабільних гідрогеологічних умов ( $K_{\phi}$ ,  $R$ ) залежить тільки від діаметра свердловини  $d_{св.}$  і величини вакууму в ній  $H_{вак.і}$ .

$$H_i = f(d_{св.}, H_{вак.і}), \quad (6)$$

для даних умов при  $Q_{св.} = 7$  л/с ( $7 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 0,001 = 604,8$  м<sup>3</sup>/добу);  $K_{\phi} = 10$  м/добу;  $R = 300$  м, величина  $H_i$  за формулою (5) буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} H_i &= 0,5 \cdot \left( \frac{604,8 \cdot \ln 600 / d_{св.}}{3,14 \cdot 10 \cdot H_{вак.і}} + H_{вак.і} \right) = \\ &= 9,63 \frac{\ln 600 / d_{св.}}{H_{вак.і}} + 0,5 H_{вак.і} \end{aligned} \quad (7)$$

1. Мінімальні глибини дренажних свердловин  $H_i$  при змінах  $d_{св.}$  у межах 0,1-0,3 м та  $H_{вак.і}$  – у межах 2,5 -7,5 м

Діаметр свердловини, м	Вакуум у дренажних свердловинах $H_{вак.і}$ , м										
	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5
0,1	34,8	29,4	25,7	22,9	20,9	19,3	18,0	17,0	16,1	15,5	14,9
0,2	32,1	27,2	23,8	21,3	19,4	17,9	16,8	15,9	15,1	14,5	14,0
0,3	30,5	25,9	22,7	20,3	18,5	17,1	16,1	15,2	14,5	14,0	13,5

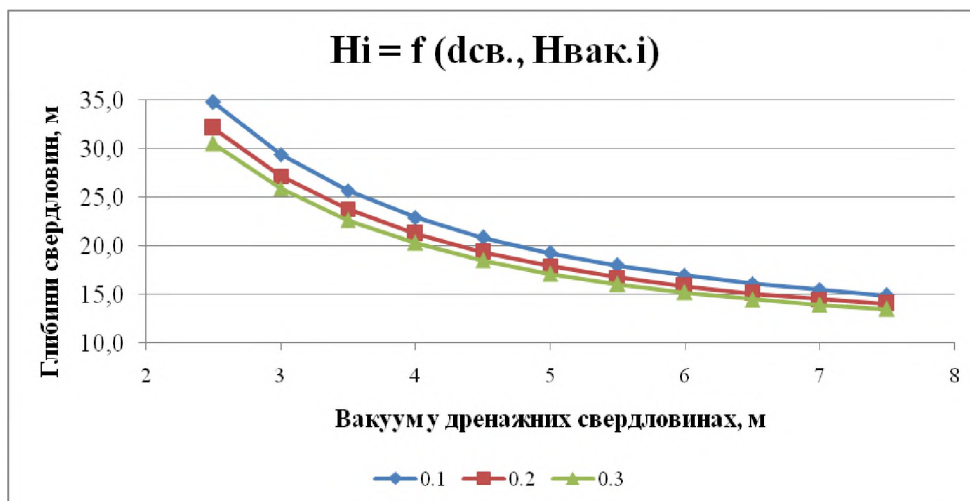


Рис. 3. Графіки залежності  $H_i = f(d_{св.}, H_{вак.і})$  для свердловин з діаметрами:  $d_{1св.} = 0,1$  м,  $d_{2св.} = 0,2$  м,  $d_{3св.} = 0,3$  м

За формулою (7) виконані розрахунки потрібної глибини свердловин  $H_i$  при змінах її діаметрів від 0,1 м до 0,3 м та змінах вакууму від  $H_{вак.мін} = S = 2,5$  м, до  $H_{вак.макс} = 7,5$  м (таблиця 1).

За результатами розрахунків, наведених у таблиці 1, побудовані графіки  $H_i = f(d_{св.}, H_{вак.і})$ , які представлені на рис. 3.

Графіком  $H_i = f(d_{св.}, H_{вак.і})$  є гіперболічна залежність: при збільшенні величин  $H_{вак.і}$  та  $d_{св.}$  зменшується потрібна глибина буріння дренажних свердловин.

Розрахункова кількість дренажних свердловин ПФЗ (рис. 1) та відстані між ними  $l$  визначаються гідравлічними і техніко-економічними розрахунками, виходячи з виконання таких вимог:

– у першій свердловині (св.1), що найбільш віддалена від водоприймального водозбірного колодязя 5 (рис. 1), необхідно забезпечити розрахункову глибину зниження ґрунтових вод, тобто приймаємо  $S_1 = H_{вак.1} = 2,5$  м;

– в останній свердловині (св.п), що знаходиться найближче до водозбірного колодязя на сифонному водоводі 2, має бути вакуум у найвищій точці водоводу 3 ( $H_{вак.п} < 8$  м);

– вакуум у кожній наступній свердловині, починаючи з першої, визначається шляхом додавання втрат напору на ділянці водоводу між цими свердловинами:



$$H_{\text{вак.2}} = S_2 = H_{\text{вак.1}} + h_{1-2} \quad (8)$$

– загальна кількість дренажних свердловин  $n$ , підключених до сифонного збірного водоводу, визначається за умови, що сума втрат напору на ділянках сифонного збірного водоводу від першої свердловини до водоприймального колодязя не повинна перевищувати:

$$\sum_1^n h_i = \sum_1^n A_i * l_i * Q_i^2 \leq H_{\text{вак.n}} - H_{\text{вак.1}} \leq 5,5 \text{ м.} \quad (9)$$

У таблицях 2-4 наведено результати розрахунків ПФЗ із сифонною системою водовідбору з дренажних свердловин для гідрогеологічних умов водоносних пластів у місцевості м. Кам'янка-Дніпровська ( $K_{\phi} = 10$  м/добу,  $R = 300$  м) для свердловин діаметром  $d_{\text{св}} = 0,2$  м, але різних їх глибин. Наведені у цих таблицях розрахункові параметри визначались так. Вакуум у першій свердловині приймався  $H_{\text{вак.1}} = H_{\text{вак.мін}} = 2,5$  м, а у наступних визначався шляхом послідовного додавання втрат напору на ділянках водоводу, починаючи від першої свердловини і до водозабірної колодязя. У таблиці 2 наведено варіанти розрахунків при однакових глибинах усіх свердловин  $H_i = 32,1$  м і відстані між ними  $l = 50$  м.

Добуток сумарної кількості свердловин 17 із глибиною кожної 32,1 становить 545,7 м. Загальна протяжність  $L = 16 * 50 = 800$  м,  $P = 545,7 / 800 = 0,68213$ .

Розрахункова глибина свердловини  $H_i$  приймалась для свердловин із діаметром

$d_{\text{св}} = 0,2$  м з таблиці 1 для відповідної величини  $H_{\text{вак.i}}$ , а витрата води з неї визначалась за формулою:

$$Q_i = \frac{\pi K_{\phi} H_{\text{вак.i}} (2H - H_{\text{вак.i}})}{\ln 2R / d_{\text{св}}} \text{ м}^3/\text{добу}, \quad (10)$$

або після підстановки їх значень  $K_{\phi} = 10$  м/добу і  $\ln(2 * 300 / 0,2) = 8$  отримали вираз:

$$Q_{\text{св.i}} = 0,045392 H_{\text{вак.i}} (2H_i - H_{\text{вак.i}}), \text{ л/с.} \quad (11)$$

Сумарна глибина 14 свердловин становить 270,2 м, сумарна протяжність  $L = 14 * 50 = 700$  м.  $P = 270,2 / 700 = 0,386$ .

Діаметри труб на ділянках водоводу  $d_{\text{мп.i}}$  та питомий гідравлічний опір  $A_i$  приймали для сталевих трубопроводів по [6], залежно від витрат води на цій ділянці  $Q_{\text{дп.i}}$ .

Сумарна глибина 8 свердловин різної глибини становить 170,3 м, сумарна протяжність  $L = 560$  м.  $P = 170,3 / 560 = 0,3$ .

У табл. 4 наведено результати розрахунків ПФЗ при перемінних глибинах дренажних свердловин і збільшення відстані між ними, починаючи з другої свердловини, на 10 м.

Підсумкові результати розрахунків ПФЗ із сифонним водовідбором із дренажних свердловин наведено у таблиці 5.

Порівняння трьох варіантів створення ПФЗ із сифонним водовідбором із дренажних свердловин показало, що найбільш економічним є III варіант, оскільки при цьому варіанті буде:

## 2. Розрахункові параметри ПФЗ при однакових глибинах дренажних свердловин і відстаней між ними (I варіант)

Дренажні свердловини			Ділянка водоводу між свердловинами				
№	$H_{\text{вак.i}}$ , м	$Q_{\text{св.i}}$ , л/с	№	$Q_{\text{дп.i}}$ , л/с	$d_{\text{мп.i}}$ , мм	$A_i$ , (с/л) <sup>2</sup> м	$h_i$ , м
1	2,50	7,00					
2	2,92	8,13	1-2	7,00	100	0,0001729	0,42
3	3,27	9,06	2-3	15,13	150	0,00003065	0,35
4	3,47	9,59	3-4	24,19	200	0,000006959	0,20
5	3,87	10,61	4-5	33,78	200	0,000006959	0,40
6	4,09	11,16	5-6	44,39	250	0,000002187	0,22
7	4,43	12,02	6-7	55,55	250	0,000002187	0,34
8	4,93	13,26	7-8	67,57	250	0,000002187	0,50
9	5,20	13,94	8-9	80,83	300	0,0000008466	0,27
10	5,58	14,86	9-10	94,77	300	0,0000008466	0,38
11	5,80	15,40	10-11	109,63	350	0,0000003731	0,22
12	6,09	16,09	11-12	125,03	350	0,0000003731	0,29
13	6,47	16,96	12-13	141,12	350	0,0000003731	0,38
14	6,71	17,51	13-14	158,08	400	0,0000001907	0,24
15	7,00	18,19	14-15	175,60	400	0,0000001907	0,29
16	7,19	18,61	15-16	193,79	450	0,0000001	0,19
17	7,42	19,12	16-17	212,40	450	0,0000001	0,23

3. Розрахункові параметри ПФЗ із сифонним водовідбором із дренажних свердловин перемінної глибини при однаковій відстані між ними (II варіант)

Дренажні свердловини			Ділянка водоводу між свердловинами					
№	$H_{\text{нов.із}}$ м	$H_{\text{із}}$ м	$Q_{\text{св.із}}$ л/с	№	$Q_{\text{діл.із}}$ л/с	$d_{\text{мп.із}}$ мм	$A_{\text{із}}$ (с/л) <sup>2</sup> м	$h_{\text{із}}$ м
1	2,50	32,10	7,00					
2	2,92	27,90	7,02	1-2	7,00	100	0,0001729	0,42
3	3,22	25,50	6,99	2-3	14,02	150	0,00003065	0,30
4	3,90	21,70	7,00	3-4	21,01	150	0,00003065	0,68
5	4,17	20,60	7,02	4-5	28,01	200	0,000006959	0,27
6	4,60	19,10	7,02	5-6	35,03	200	0,000006959	0,43
7	5,22	17,40	7,01	6-7	42,04	200	0,000006959	0,62
8	5,48	16,90	7,00	7-8	49,05	250	0,000002187	0,26
9	5,82	16,20	7,03	8-9	56,05	250	0,000002187	0,34
10	6,26	15,50	7,03	9-10	63,07	250	0,000002187	0,44
11	6,80	14,80	7,04	10-11	70,10	250	0,000002187	0,54
12	7,05	14,50	7,02	11-12	77,14	300	0,0000008466	0,25
13	7,35	14,20	7,02	12-13	84,16	300	0,0000008466	0,30
14	7,70	13,9	7,03	13-14	91,18	300	0,0000008466	0,35

4. Розрахункові параметри ПФЗ із сифонним водовідбором із дренажних свердловин перемінних глибин при різних відстанях між ними (III варіант)

Дренажні свердловини			Ділянка водоводу між свердловинами						
№	$H_{\text{нов.із}}$ м	$H_{\text{із}}$ м	$Q_{\text{св.із}}$ л/с	№	$Q_{\text{діл.із}}$ л/с	$l_{\text{із}}$ м	$d_{\text{мп.із}}$ мм	$A_{\text{із}}$ (с/л) <sup>2</sup> м	$h_{\text{із}}$ м
1	2,5	32,1	7						
2	2,92	27,8	7	1-2	7	50	100	0,0001729	0,42
3	3,28	25,1	7	2-3	14	60	150	0,00003065	0,36
4	4,23	20,3	7	3-4	21	70	150	0,00003065	0,95
5	4,67	18,9	7	4-5	28	80	200	0,000006959	0,44
6	5,43	16,9	7	5-6	35	90	200	0,000006959	0,77
7	6,66	14,9	7	6-7	42	100	200	0,000006959	1,23
8	7,24	14,3	7	7-8	49	110	250	0,000002187	0,58

5. Порівняння результатів розрахунків ПФЗ за трьома варіантами

№ варіанта	Дренажні свердловини			Ділянки водоводу між свердловинами							P
	n, шт.	$\Sigma \Delta H_{\text{із}}$ м	$H_{\text{св.із}}$ м	n, шт.	$\Sigma l_{\text{із}}$ м	$l_{\text{св}}$ м	$Q_{\text{діл.із}}$ л/с	$d_{\text{мп.із}}$ мм	$\Sigma h_{\text{із}}$ м	$l_{\text{св}}$	
I	17	545,7	32,1	16	800	50	7-212	100-450	4,92	0,0062	0,68
II	14	270,6	19,3	13	700	50	7-91	100-300	5,2	0,0074	0,39
III	8	170,3	21,3	7	560	80	7-49	100-250	4,74	0,0085	0,3

- найменша кількість свердловин ( $n = 8$ );
- найменша загальна глибина буріння свердловин ( $\Sigma \Delta H_{\text{із}} = 170,3$  м);
- найменші питомі витрати на буріння свердловин для створення ПФЗ:

$$P = \frac{\sum_1^n \Delta H_{\text{із}}}{\sum_1^n l_{\text{із}}} = 170,3/560 = 0,30; \quad (12)$$

- найменша вартість сифонного збирного водоводу зі сталевих труб діаметром  $d_{\text{мп.із}} = 100-250$  мм.

**Висновки.** Оскільки з дренажних свердловин при однаковій їх глибині надходять різні витрати води, то слід приймати різні глибини дренажних свердловин, збільшуючи їх у напрямку від водозбірного колодязя.

Проведені дослідження на прикладі розрахунку Кам'янка-Дніпровської ПФЗ показали, що мінімальна глибина дренажних свердловин залежить від діаметра свердловини і величини вакууму в ній. Її можна визначити за формулою (7) або приймати за таблицею 1, або за графіком на рис. 3.

Розрахункову кількість дренажних свердловин ПФЗ та відстані між ними слід визначати на основі гідравлічних і техніко-економічних розрахунків, виходячи з умов забезпечення рівнів води у водоносному пласті при величинах вакууму у допустимих межах та мінімізації питомих витрат на створення ПФЗ.

Виконані розрахунки по трьох варіантах ПФЗ із сифонним водовідбором із дренажних

свердловин показали, що найекономічнішим є III варіант (з різними глибинами свердловин і різними відстанями між ними), при якому досягається найменша питома вартість на буріння свердловин і будівництво сифонного збірного водоводу.

### Бібліографія

1. Вертикальний дренаж із сифонним водовідбором зі свердловин. Пат. №132266, Україна u201806279 заяв.05.06.2018. Опубл. бюл. № 4, 25.02.2019.
2. Хоружий П.Д., Крученюк 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., Левицька В.Д. Шляхи покращення роботи комплексу захисних споруд Кам'янського Поду // Меліорація і водне господарство. 2016. Вип. 104. Київ. С. 119-125.
4. Левицька В.Д. Аналіз сучасного стану та шляхи покращення роботи Кам'янка-Дніпровської протифільтраційної завіси // Збірник статей наук.-практ. конференції: Вода: проблеми і шляхи вирішення. Рівне 5-8 липня 2017 р. Житомир: вид-во ЕЦ «Укрекобіокон», 2017. С. 196-200.
5. Шашук В.А. Еколого-економічні основи басейнового управління водними ресурсами. Дніпропетровськ: ВАТ «Видавництво «Зоря», 2006. 408 с.
6. Хоружий П.Д., Хомутецька Т.П., Хоружий В.П. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. Київ: Аграрна наука, 2008. 534 с.
7. Хоружий П.Д., Левицька В.Д. Методика розрахунку вертикальних дренажів із сифонним водовідбором інфільтраційних вод // Меліорація і водне господарство. 2017. Вип.106. Київ, С. 102-108.
8. Хоружий П.Д. Расчет гидравлического взаимодействия водопроводных сооружений, Львов: Вища школа, 1983, 152с.
9. Довідник по сільськогосподарському водопостачанню і каналізації / П.Д.Хоружий та ін.; за ред. П.Д.Хоружого. Київ: Урожай, 1992. 206 с.
10. Олейник А.Я. Гидродинамика дренажа. – Киев: Наукова думка, 1981. 284 с.

### References

1. Levytska, V.D. Vertykalnyydrenazh iz syfonnym vodovidborom zi sverdlovyln. (2019). [Vertical drainage with siphon water sampling from wells]. Patent of Ukraine. № 132266. [in Ukrainian].
2. Khoruzhyy, P.D., & Kruchenyuk, V.D. (2004). Analiz roboty drenazhnykh sverdlovyln z erliftnoyu systemoyu vodovidboru [Analysis of the work of drainage wells with an erlift water collection system]. Land Reclamation and Water Management, Vol. 91, 209-218. [in Ukrainian].
3. Khoruzhyi, P.D., & Levytska, V.D. (2016). Shliakhy pokrashchennia roboty kompleksu zakhysnykh sporud Kamyanskoho Podu [Ways to improve the operation of the protection facilities complex of Kamensky Pod], Land Reclamation and water management, Vol. 104, 119-125. [in Ukrainian].
4. Levytska, V.D. (2017). Analiz suchasnoho stanu ta shlyakhy pokrashchennya roboty Kamyanka-Dniprovskoyi protyfiltratsiynoyi zavisy. [An analysis of the anti-filtration operation and ways of improving the work of the Kam&apos;yanka-Dniprovsky antinfiltration system]. International Scientific and Practical Conference: Water: Problems and Solutions, Rivne: EC “Ukrekiobikon”, 196-200. [in Ukrainian].
5. Stashuk, V.A. (2006). Ekoloho-ekonomichni osnovy baseynovoho upravlinnya vodnymy resursamy. [Ecological and economic basics of basin water resources management]. Dnipropetrovsk: JSC “Publishing House” Zorya”. [in Ukrainian].
6. Khoruzhyy, P.D., Khomutetska, T.P., & Khoruzhyy V.P. (2008). Resursozberihayuchi tekhnolohiyi vodopostachannya. [Resource-saving water supply technologies]. Kyiv: Agrarian Science. [in Ukrainian].
7. Khoruzhyi, P.D., & Levytska, V.D. (2017). Metodyka rozrakhunku vertykalnykh drenazhiv iz syfonnym vodovidborom infiltratsiynyx vod [The method of calculation of vertical drain performance when using siphon grains for infiltration water intake] Land Reclamation and water management, Vol. 106, 102-108 [in Ukrainian].
8. Khoruzhiy, P.D. (1983). Raschet gidravlicheskogo vzaimodeystviya vodoprovodnykh sooruzheniy. [Calculation of the hydraulic interaction of waterworks]. Lviv: Vyshcha shkola (Higher school). [in Russian].
9. Khorozhii, P.D., Orlov, V.O., & Tkachuk, O.A. et al. (1992). Dovidnyk po silskohospodarskomu vodopostachannyu i kanalizatsiyi [Handbook of Agricultural Water Supply and Sewerage]. Kyiv: Uroghay. [in Ukrainian].
10. Oleinyk A.Ia. (1981). Hidrodynamika drenazhu [Drainage's hydrodynamics]. Kyiv: Naukova dumka. [in Ukrainian].

Левицкая В.Д., Хоружий П.Д.

**Оптимизация противофильтрационных завес  
с сифонным водоотбором из дренажных скважин  
(на примере Каменка-Днепровской противофильтрационной завесы)**

**Аннотация.** Проанализирована работа противофильтрационных завес с сифонным водоотбором из дренажных скважин на примере левобережья Каховского водохранилища для условий защиты от подтопления Каменского Пода и показано, что стоимость перекачки 1 м<sup>3</sup> воды будет значительно дешевле, чем в действующей противофильтрационной завесе с эрлифтной системой водоотбора. Но при этом возникают проблемы обеспечения равномерного снижения уровня воды в водоносном пласте по всей трассе сифонного водовода. При проектировании указанных противофильтрационных завес нам необходимо учесть существующие гидрогеологические условия и определить параметры, на которые мы можем повлиять, в частности: оптимальное количество скважин и расстояния между ними; расчетные диаметры и глубины каждой скважины, подключаемой к сифонному сборному водоводу; расчетных расходов воды с каждой скважины и снижения статического уровня воды в них с учетом гидрогеологического влияния друг на друга при их совместной работе; оптимальных диаметров труб на каждом участке сифонного сборного водовода и обеспечения надежности его работы. Для оптимизации противофильтрационных завес с сифонной системой водоотведения предложено бурить дренажные скважины различной глубины и размещать их на разных расстояниях друг от друга по всей длине водосборного водовода, применяя методику для определения надлежащей глубины скважины в зависимости от ее диаметра и величины вакуума. Проведенные исследования, на примере расчетов для Каменка-Днепровской противофильтрационной завесы, показали: самым экономичным из всех возможных является вариант завесы, в котором дренажные скважины имеют разную глубину и размещены на различных расстояниях между собой, что обеспечивает минимальную удельную стоимость на бурение скважин сифонного сборного водовода при достижении равномерного водопонижения.

**Ключевые слова:** вертикальный дренаж, водопонижающая скважина, сифонный водовод, радиус влияния снижения уровней воды, расход воды, гидравлические опоры, инфильтрационные воды, водоприемный сборный колодец, снижение уровней воды.

V.D. Levytska, P.D. Khoruzhyi

**Optimization of ground water cutoff with a siphon intake from the drain wells  
(as in the case of Kamyanka-Dniprovsk ground water cut-off)**

**Abstract.** The operation of ground water cutoff with a siphon intake from the drain wells is analyzed on the case of Kakhovsky reservoir for protection against flooding of Kamensky Pod. It is shown that the cost of 1 m<sup>3</sup> of water pumping of will be much cheaper than through the existing ground water cutoff with an airlift water intake system. But in this case there are some problems about ensuring a uniform decrease in water table in the aquifer along the entire length of the siphon conduit. When designing such filter systems, it is necessary to take into account the existing hydro-geological conditions when determining changeable parameters, in particular: the optimal number of wells and the distances between them; the calculated diameters and depths of each well connected to the siphon collecting water conduit; estimated water flow from each well and reducing the static water table in them, the hydro-geological interaction between them during their collaboration; optimal pipe diameters at each section of the siphon collecting conduit To optimize the ground water cutoff with a siphon intake system, it is proposed to drill drain wells of various depths and place them at different distances from each other along the entire length of the collecting conduit, determining the proper depth of the well depending on its diameter and vacuum value. The conducted study on the case of Kamyanka-Dniprovsk ground water cutoff showed: the most efficient option of all possible ones is the solution when there are drain wells with different depths, which are placed at different distances from each other. That provides the minimum specific cost for the construction of drain and siphon intake collecting wells keeping a uniform water table decrease.

**Key words:** vertical drainage, dewatering well, siphonic outfall, radius of drawdown influence, water flow, hydraulic ram, infiltration water, intake well, drawdown.