

ДОСЛІДЖЕННЯ І ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ВОДОПРОВІДНИХ СИСТЕМ З ВОДОЗАБІРНИМИ СВЕРДЛОВИНАМИ

Т.П. ХОМУТЕЦЬКА

Інститут водних проблем і меліорації НААН

Наведено результати досліджень характеристик споруд Чернігівського водопроводу і методу оптимізації їхньої сумісної роботи для забезпечення подачі потрібних витрат води нормативної якості при найменших питомих витратах електроенергії.

Ключові слова: водозабірна свердловина, заглибний відцентровий насос, гідравлічні й енергетичні характеристики, очищення води, методика розрахунку

Існуюча проблема. Нині галузь водопровідно-каналізаційного господарства є однією з найбільш енергоємних у країні, а питомі витрати електроенергії на подачу води перевищують аналогічні показники європейських країн у 1,8–2,6 раза [1–3]. Найскладнішими є водопровідні системи, в комплекс яких входять водозабірні свердловини. Складність оптимізаційних розрахунків таких систем полягає в тому, що потрібно враховувати не тільки характеристики насосів і трубопроводів, які зазвичай змінюються в процесі експлуатації системи, але й характеристики водозабірних свердловин, їхній вплив одна на одну, а також можливі різні показники якості води із цих свердловин.

Враховуючи різні режими водоспоживання із водопровідної мережі, проектувальник повинен вибрати найвигідніші режими сумісної роботи водопровідних споруд, при яких споживачі будуть забезпечені потрібною кількістю води під необхідним вільним напором і нормативної якості за найменших питомих витрат електроенергії. Наразі відсутня методика таких розрахунків.

Мета роботи – розроблення методики розрахунку оптимальної сумісної роботи водопровідних споруд при подачі води від групи водозабірних свердловин у резервуар чистої води (РЧВ) за забезпечення її нормативних показників якості.

© Т.П. Хомуцька, 2013

Результати наукових досліджень. При підключенні групи водо-забірних свердловин до збірних водоводів, що транспортують воду в РЧВ, подача води із кожної свердловини, л/с, визначається за формулою:

$$Q_i = P_i \left[\frac{-1/q_i + \sqrt{(1/q_i)^2 + 4(H_{\phi,i} - H_{г,i} - \sum h_i)(S_{к,i} + S_{в,i} + S_{\phi,i})}}{2(S_{к,i} + S_{в,i} + S_{\phi,i})} \right], \quad (1)$$

де P_i – параметр, який вказує на те, чи працює ця свердловина ($P = 1$) у даний час у розрахунковій системі водопостачання, чи вона відключена ($P = 0$); q_i – питомий дебіт даної свердловини, л/(с·м); $H_{\phi,i}$ і $S_{\phi,i}$ – параметри гідравлічної характеристики Q – H насоса, що апроксимується залежністю квадратної параболи [4]:

$$H = H_{\phi} - S_{\phi} Q^2, \text{ м}, \quad (2)$$

для якої

$$H_{\phi} = H_1 + S_{\phi} Q_1^2 = H_2 + S_{\phi} Q_2^2; \quad (3)$$

$$S_{\phi} = \frac{H_1 - H_2}{Q_2^2 - Q_1^2}, \text{ (с/л)}^2\text{м}, \quad (4)$$

де H_1 і H_2 – напори насоса при подачі ним витрат води відповідно Q_1 і Q_2 , які приймають із характеристики Q – H насоса в зоні його рекомендованого застосування (у зоні найвищого ККД); $H_{г,i}$ – геометрична висота водопідйому від статичного рівня води в свердловині $Z_{ст,i}$ до розрахункового рівня води в РЧВ Z_p (рис. 1), м; $S_{к,i}$ і $S_{в,i}$ – гідравлічні опори відповідно в комунікаціях насосної установки і водоводі, (с/л)²м; $\sum h_i$ – сума втрат напору на спільних ділянках водоводу, по яких подається вода як із даної свердловини, так і від інших свердловин даної групи, м.

Оскільки у виразі (1) величина $\sum h_i$ залежить від витрат води із інших свердловин, які перед розрахунками невідомі, то задача із визначення витрат води Q_i є нерозв’язаною і її можна вирішити тільки шляхом ітерацій з використанням комп’ютерних програм [5], наприклад Excel. Блок-схему виконання таких розрахунків показано на рис. 2.

Перед початком обчислень потрібні такі вихідні дані:

- розрахункова відмітка рівня води в резервуарі $Z_{РЧВ}$;
- відмітки поверхні землі біля свердловин $Z_{з,i}$;

- глибина статичного $H_{ст.i}$ та динамічного $H_{дин.i}$ рівнів води кожної із свердловин;
- подача води із свердловин $Q_{п.i}$ за паспортними чи дослідними даними;
- питомий гідравлічний опір трубопроводів (залежно від матеріалу і діаметра) на шляху від кожної свердловини до спільного водоводу A_{i} та на спільних ділянках транспортування води до РЧВ $A_{т.сп.j}$;
- довжина трубопроводів від кожної свердловини до спільного водоводу L_i та довжина усіх ділянок спільного водоводу $L_{сп.j}$;
- марки насосів, установлених у свердловинах, та відповідні їм значення параметрів $H_{ф.i}$, $S_{ф.i}$, A_{i} , B_i і α_i .

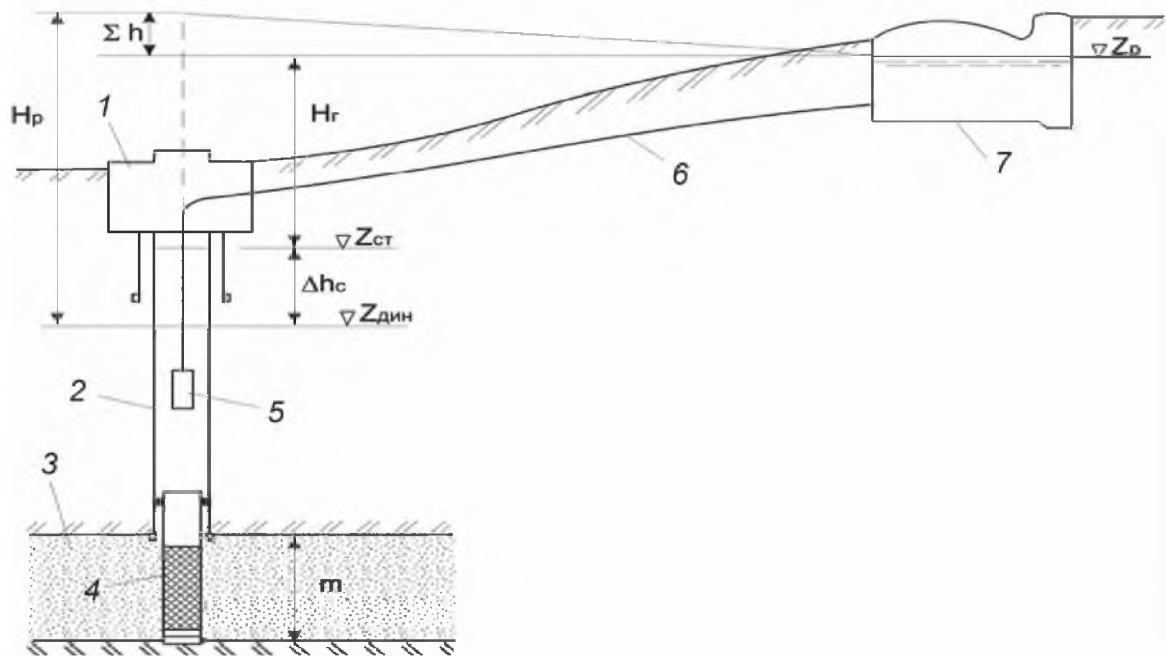


Рис. 1. Розрахункова схема подачі води із свердловини в резервуар:

1 – оголовок; 2 – експлуатаційна обсадна колона; 3 – водоносний пласт; 4 – фільтр; 5 – насосний агрегат; 6 – напірний водовід; 7 – резервуар

Питому витрату електроенергії на подачу із свердловин у РЧВ 1 м^3 води визначають за формулою:

$$E_i = \frac{N_i}{Q_i}, \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3, \quad (5)$$

де N_i – споживана на валу насоса потужність, кВт; Q_i – подача води насосом, $\text{м}^3/\text{год}$.

Для визначення величини N_i енергетичну характеристику $Q-N$ запропоновано [4] апроксимувати залежностями степеневі функції:

$$N_i = A + BQ_i^\alpha. \quad (6)$$

У цій формулі параметр A обчислюється з виразу:

$$A = \frac{N_1 N_t - N_{cp}^2}{N_1 + N_t - 2N_{cp}}, \quad (7)$$

де N_{cp} – потужність, що споживається на валу насоса при подачі води витратою

$$Q_{cp} = \sqrt{Q_1 Q_t}, \quad (8)$$

t – число значень Q_i та відповідних їм N_i .

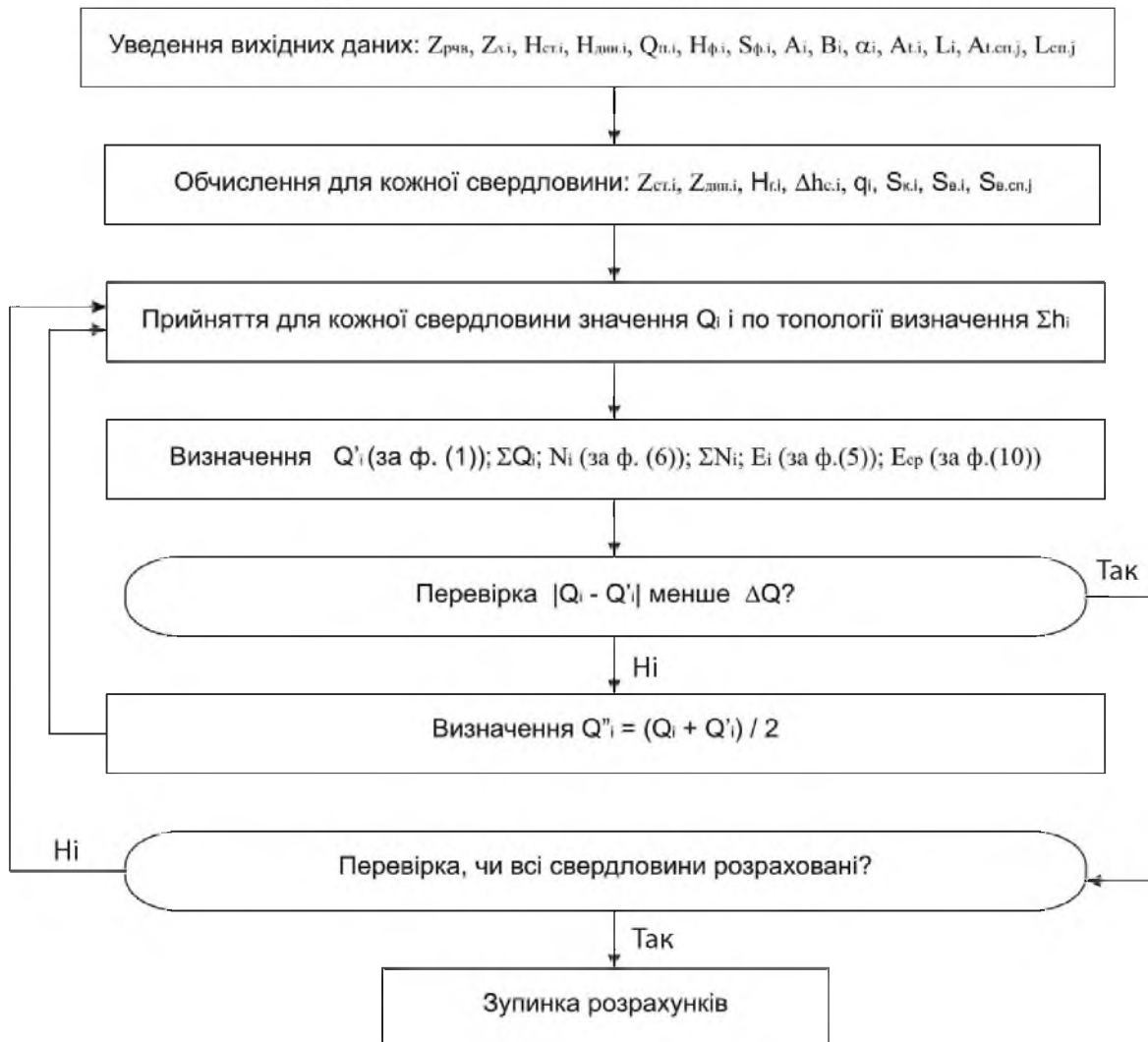


Рис. 2. Блок-схема виконання оптимізаційних розрахунків

Параметри B і α знаходять як корені системи рівнянь

$$\left. \begin{aligned} t \ln B + \alpha \sum \ln Q_i &= \sum \ln (N_i - A); \\ \ln B \sum \ln Q_i + \alpha \sum (\ln Q_i)^2 &= \sum \ln Q_i \ln (N_i - A) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Середню питому витрату електроенергії всіма свердловинами при розрахунковій схемі подачі води з них, кВт · год/м³, визначають за формулою

$$E_{\text{ср}} = \frac{\sum N_i}{\sum Q_i}. \quad (10)$$

Як користуватись даною методикою, покажемо на прикладі розрахунку сумісної роботи споруд при подачі води із семи свердловин на водозабір «Полуботки» Чернігівського водопроводу (рис. 3), вихідні дані для яких наведено в табл. 1.

У табл. 2 показано результати розрахунку сумісної роботи споруд при подачі води від усіх свердловин, а в табл. 3 – для випадку, коли глибокі свердловини № 1 (глибиною 750 м) і 4 (700 м) відключено від роботи.

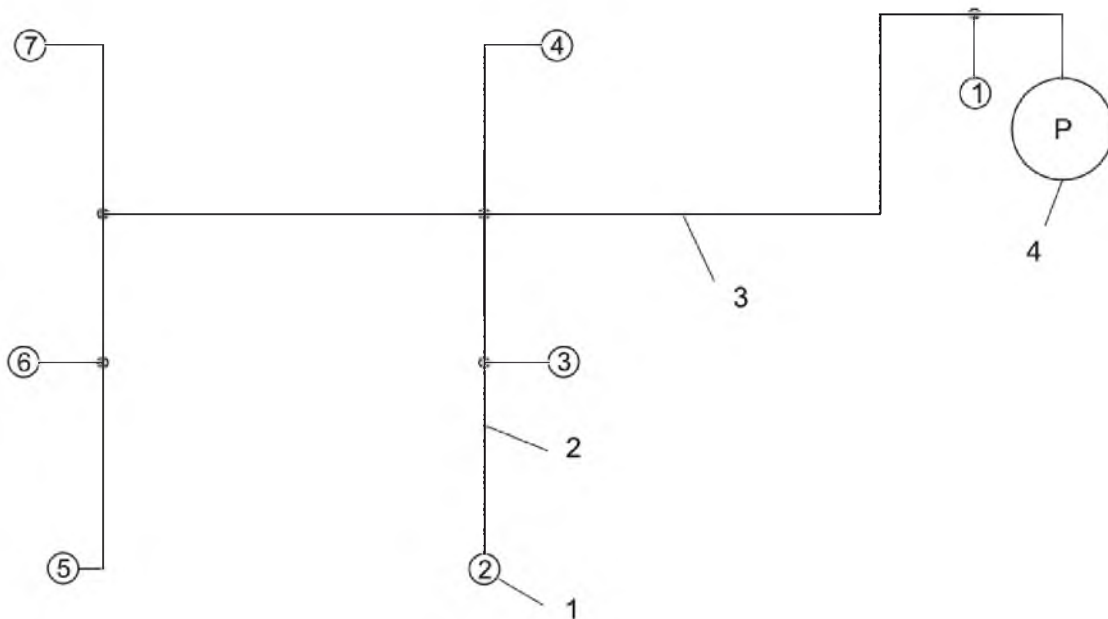


Рис. 3. Існуюча схема подачі води із південної групи свердловин на водозабір «Полуботки»:

1 – свердловина; 2 – підключення до водоводу; 3 – водовід;
4 – резервуар чистої води

1. Вихідні дані для розрахунків водозабірних свердловин на ПК

№ свердловин	$H_{г.і}^?$ м	$q_i^?$ л/с× ×м	$S_{к.і}^?$ (с/л) ² м	$S_{в.і}^?$ (с/л) ² м	Марка насоса	$H_{ф.і}^?$ м	$S_{ф.і}^?$ (с/л) ² м	A	B	α
1	24	0,29	0,0259	0,56	ЕЦВ 8-40-125	144,2	0,273	12,09	1,026	1,01
2	31	0,24	0,105	1,684	ЕЦВ 8-25-55	63,7	0,125	3,11	0,197	1,46
3	30	0,93	0,105	0,081	ЕЦВ 8-25-55	63,7	0,125	3,11	0,197	1,46
4	50,5	0,34	0,0179	0,8092	ЕЦВ 10-63-110	159,4	0,151	17,27	1,11	0,91
5	27	0,38	0,105	6,6798	ЕЦВ 8-25-55	63,7	0,125	3,11	0,197	1,46
6	31	0,28	0,105	0,181	ЕЦВ 8-25-55	63,7	0,125	3,11	0,197	1,46
7	44,6	0,77	0,0406	3,711	ЕЦВ 8-40-60	79,8	0,197	7,5	0,211	1,18

2. Результати розрахунків при підключенні до роботи всіх свердловин системи

№ свердловин	$\sum h_i$	Q_i		N_i , кВт	E_i , кВт · год/м ³
		л/с	м ³ /год		
1	0,52	14,31	51,53	27,18	0,53
2	1,58	3,92	14,13	4,56	0,32
3	1,58	9,88	35,57	8,73	0,25
4	1,46	16,30	58,69	31,40	0,53
5	2,02	5,48	19,74	5,48	0,28
6	2,02	4,27	15,38	4,76	0,31
7	1,77	8,14	29,30	10,02	0,34
Всього		62,32	224,34	92,12	$E_{ср.} = 0,41$

Аналіз результатів розрахунків, наведених у табл. 2 і 3, показав:

- питомі витрати електроенергії на подачу води із глибоких свердловин № 1 і 4, що забирають високоякісну воду із сеноман-нижньокрейдового водоносного горизонту, у 2 рази перевищують ці самі витрати із неглибоких водозабірних свердловин, каптуючих воду з бучацького водоносного горизонту;
- із водозабірних свердловин, що мають майже однакову глибину: № 2 (122 м), 3 (123 м), 5 (115 м) і 6 (120 м), у яких встановлено од-

накові насоси ЕЦВ 8-25-55, відбувається подача різної витрати води в межах від 14,1 до 35,6 м³/год при паспортних показниках таких насосів 25 м³/год, що пояснюється різною величиною гідравлічних опорів на шляху транспортування води від свердловини до РЧВ;

- свердловина № 3 має найменші питомі витрати електроенергії на подачу води, оскільки має найбільший питомий дебіт (у 4 рази більший, ніж у свердловини № 2);

- при відключенні з роботи свердловин № 1 і 4 загальна подача від решти свердловин зменшується від 224,34 до 116,01 м³/год, або у 1,93 раза, але при цьому загальне споживання електроенергії зменшується від 92,12 до 33,86 кВт · год, або у 2,72 раза, тобто середнє питоме споживання електроенергії зменшується від 0,41 до 0,29 кВт × год/м³, або більш як на 40%.

3. Показники роботи системи при відключенні свердловин № 1 і 4

№ свердловин	P_i	$\sum h_i$	Q_i		N_i , кВт	E_i , кВт · год/м ³
			л/с	м ³ /ГОД		
1	0	0,14	0	0	0	0
2	1	0,69	4,01	14,45	4,61	0,32
3	1	0,69	9,99	35,97	8,82	0,25
4	0	0,56	0	0	0	0
5	1	1,14	5,58	20,09	5,55	0,28
6	1	1,14	4,37	15,72	4,81	0,31
7	1	0,88	8,27	29,77	10,07	0,34
Всього			32,22	116,01	33,86	$E_{\text{ср.}} = 0,29$

Аналіз показників якості води з неглибоких свердловин, що каптують воду з бучацького водоносного горизонту, показав, що ця вода не відповідає нормативним вимогам [6] за двома показниками: вмістом заліза загального (Fe^{2+} ; Fe^{3+}) і марганцю (Mn^{2+}). У середньому ці показники перевищують нормативні вимоги у 3–4 рази, тобто для таких вод необхідно здійснювати знезалізнення і деманганіацію.

Вода, що забирається глибокими свердловинами із сеноман-нижньокрейдного водоносного горизонту, має високі якісні показники, що відповідають нормативним вимогам, тобто цю воду можна без очищення подавати в РЧВ, а з нього – безпосередньо споживачам.

Таким чином, існуючу групу свердловин на водозаборі «Полуботки» Чернігівського водопроводу (рис. 3) доцільно розділити так, щоб вода, яка забирається з різних водоносних горизонтів, подавалась у РЧВ по різних напрямках (рис. 4): із свердловин № 1 і 4 – безпосе-

редньо в РЧВ (існуюча схема водоподачі), а від решти свердловин – через водоочисну станцію в РЧВ.

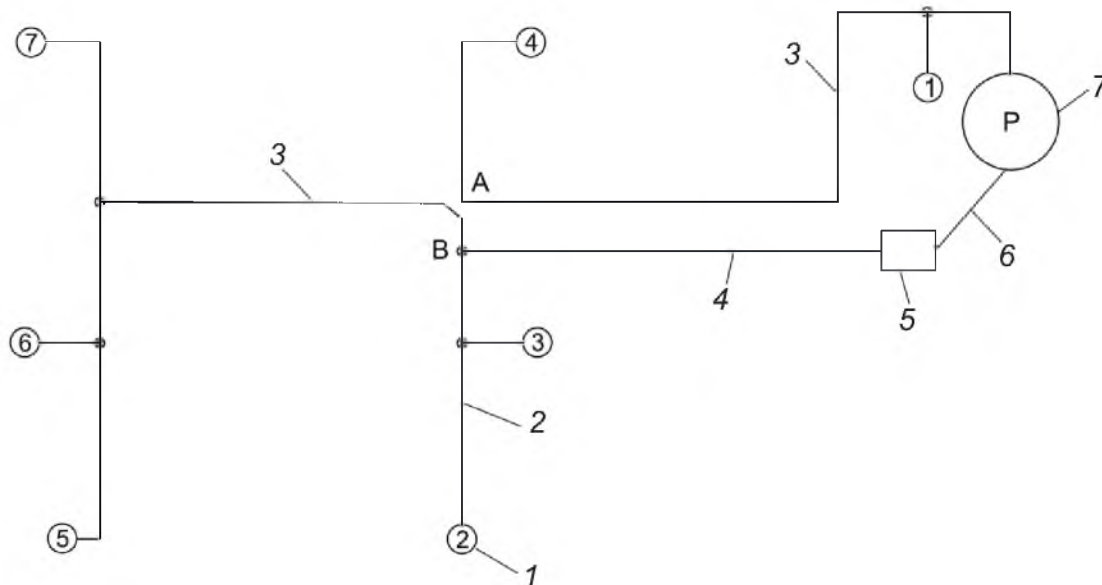


Рис. 4. Запропонована схема подачі води із південної групи свердловин на водозабір «Полуботки»: 1 – свердловина; 2 – підключення до водоводу; 3 – існуючий водовід; 4 – запроєктований водовід; 5 – водоочисна станція; 6 – відведення очищеної води; 7 – РЧВ; А і В – розрахункові точки на водоводі

При реконструкції водопровідної системи необхідно виконати такі роботи:

- у точці А розділити подачу води на два потоки;
- біля РЧВ побудувати водоочисну станцію 5;
- від точки В до водоочисної станції прокласти водовід 4 для подачі води з бучацького водоносного горизонту на очищення;
- від водоочисної станції до РЧВ прокласти трубопровід 6 для відведення очищеної води.

Аналіз якісних показників води з бучацького водоносного горизонту в свердловинах Чернігівського водопроводу показав, що вони відповідають вимогам [7], при яких можна застосовувати безреагентні методи знезалізнення з використанням методу спрощеної аерації, за яким збагачення води киснем повітря забезпечується при розбризкуванні води та падінні її крапель з висоти 0,5 м, при цьому концентрація у воді розчиненого кисню доходить до 5 мг/дм³ [8, 9].

Для видалення з води заліза і марганцю доцільно застосовувати біохімічний метод, який полягає в тому, що специфічні бактерії дуже

швидко окиснюють двовалентні залізо і марганець, а продукти окиснення компактно ущільнюються.

При використанні такого методу необхідно створити сприятливе середовище для закріплення залізобактерій *Gallionella ferruginea* та марганцеспоживаючих бактерій виду *Metallogenium personatum*, *Caulococcus manganifer*, *Bacteria manganicus* з наступним фільтруванням обробленої води. Ці бактерії споживають для своєї життєдіяльності відповідно залізо і марганець, а, відмираючи, утворюють на зернах фільтрувального завантаження пористу масу, що вміщує велику кількість гідроксиду заліза $\text{Fe}(\text{OH})_3$ і діоксиду марганцю MnO_2 , які є сильними катализаторами окиснення марганцю.

Прояснювальні фільтри дають змогу видаляти з води залізо і марганець до нормативних вимог за швидкості фільтрування до 22 м/год [8–10].

Враховуючи вищевикладене, для знезалізнення і деманганації води із водозабірних свердловин, що каптують воду з бучацького водоносного горизонту, пропонується технологічна схема [3], основними спорудами якої є біореактор (БР) 2 і контактний прояснювальний фільтр (КПФ) 8 (рис. 5).

БР має такі призначення:

- для аерації води, тобто насичення води киснем повітря і видалення вуглекислого газу, при цьому не потрібні компресори і повітродувки;
- для біохімічного окиснення двовалентних сполук заліза $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ і марганцю $\text{Mn}(\text{HCO}_3)_2$ з утворенням малорозчинних сполук гідроксиду заліза $\text{Fe}(\text{OH})_3$ і діоксиду марганцю MnO_2 , які укрупнюються в пластівці, що здатні випадати в осад або затримуватись на фільтрах;
- для підтримання постійної швидкості фільтрування на КПФ.

Видалення газів з води виключає можливість пухирцевої кольматації завантаження КПФ, яке призначається для затримання малорозчинних сполук заліза і марганцю за висхідного руху води.

Утворений при біохімічному окисненні осад накопичується у підфільтровому просторі (об'ємі між дном фільтра та нижньою поверхнею фільтрувального завантаження) та у фільтрувальному завантаженні КПФ.

У підфільтровому просторі створюються умови, аналогічні прояснювачам із завислим осадом, але в ньому спостерігається зростаюча концентрація завислого осаду і стиснене осідання пластівців з

гідроксиду заліза та діоксиду марганцю. Дрібні пластівці цих сполук висхідним рухом води притискуються до нижньої поверхні фільтрувального завантаження, утворюючи так званий намивний шар, який додатково сприяє проясненню води.

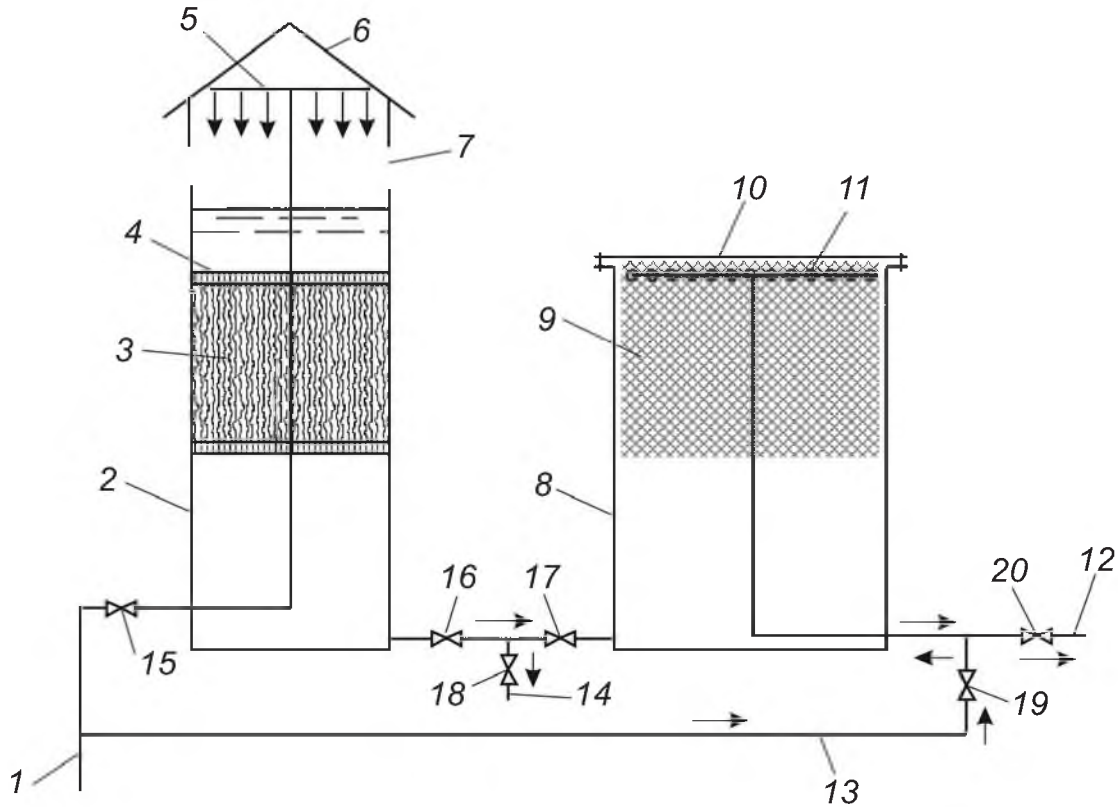


Рис. 5. Технологічна схема водоочисної станції для знезалізнення і деманганзації підземних вод: 1 – подача вихідної води; 2 – БР; 3 – волокнисте завантаження; 4 – колосникові решітки; 5 – аератор; 6 – дах; 7 – повітропропускні вікна; 8 – КПФ; 9 – пінополістирольне завантаження; 10 – кришка; 11 – ковпачковий дренаж; 12 – відведення очищеної води; 13 – подача води на промивання фільтра; 14 – скидання промивної води; 15–20 – засувки

Нижні дрібнозернисті шари пінополістирольного завантаження на початку фільтроциклу затримують забруднення, що містяться у воді, а верхній крупнозернистий шар цього завантаження виконує роль зворотного фільтра, тобто запобігає виносу дрібних гранул з фільтрованою водою.

Водоочисна станція працює так: вихідна вода із свердловин по трубі 1 при відкритій засувці 15 подається на аератор 5, в якому розбризкується на дрібні крапельки, що падають вниз з висоти не менше 0,5 м. При цьому відбувається насичення води киснем, видалення

з неї вуглекислого газу та підвищення рН. Газообмін здійснюється через відкриті вікна 7 (рис. 5). Збагачена киснем вода проходить через тонковолокнисте завантаження 3 з капронових ниток, що мають велику питому поверхню, на якій закріплюються специфічні залізо- і марганцевоспоживаючі бактерії, що самі утворюються на цих нерухомих носіях за наявності у воді кисню і двовалентних іонів Fe^{2+} та Mn^{2+} . Ці бактерії для своєї життєдіяльності використовують енергію, що виділяється при окисненні двовалентних іонів цих сполук у тривалентні іони заліза Fe^{3+} та чотиривалентні іони марганцю Mn^{4+} . При біохімічному процесі окиснення сполук відбувається значно швидше, ніж при фізико-хімічному, а отриманий осад накопичується у більш компактній формі.

Після БР оброблена вода надходить при відкритих засувках 16 і 17 на КПФ, в якому звільняється від завислих домішок із заліза та марганцю, збирається ковпачковим дренажем 11 і при відкритій засувці 20 надходить у РЧВ.

Під час фільтрування води накопичується маса осаду в підфільтровому просторі КПФ, що призводить до зростання втрат напору в ньому, а за постійної швидкості фільтрування – до підвищення рівня води в БР.

Промиваючи КПФ, частину осаду з нього необхідно випустити. Для цього закривають засувки 15, 16 і 20 та відкривають засувки 18 і 19. Промивання здійснюють вихідною водою. Кришка 10 повинна герметично перекривати корпус. Під час промивання КПФ вода рухається зверху вниз, розширюючи плаваюче пінополістирольне фільтрувальне завантаження 9 і виносячи осад з підфільтрового простору по трубі 14 в каналізацію. Водночас слід обов'язково залишати частину осаду в КПФ для забезпечення високої якості очищеної води на початку наступного фільтроциклу.

Після промивання КПФ закривають засувки 18 і 19 та відкривають засувки 15, 16 і 20 і фільтроцикл повторюється.

Дана технологія знезалізнення і деманганації води має такі переваги:

- не потрібні хімічні реагенти для окиснення сполук і коагуляції домішок, що значно спрощує експлуатацію та зменшує експлуатаційні витрати;
- велика брудомісткість фільтра і тривалість фільтроциклу, а отже, не потрібно часто виключати фільтр на промивання, при цьому зменшуються витрати промивної води;

- не потрібні промивні насоси і менша тривалість та інтенсивність промивання, що зменшує капітальні й експлуатаційні витрати;
- велика швидкість фільтрування води та невеликі втрати напору забезпечують менші розміри споруд, а отже, і їхню вартість;
- споруди можна виконати з металу за типом водонапірних башт, які легко монтуються, не вимагають приміщень і їхнього утеплення.

Висновок. Користуючись наведеною методикою розрахунку водопровідних систем з водозабірними свердловинами, можна знаходити оптимальні технологічні схеми сумісної роботи водопровідних споруд, за яких буде забезпечено подачу й очищення до нормативних показників розрахункових витрат води при найменших питомих витратах електроенергії.

1. *Возможности эффективного использования энергии и воды в муниципальных водохозяйственных системах.* Альянс за сбережение энергии. – Вашингтон, 2002. – 139 с.

2. *Статюха Г.О.* Моделювання схем промислового водоспоживання на основі методу структурних параметрів / Г.О. Статюха, О.О. Квітка, А.М. Шахновський // *Экотехнологии и ресурсосбережение.* – 2003. – № 5. – С. 57–62.

3. *Хоружий П.Д.* Ресурсозберігаючі технології водопостачання / П.Д. Хоружий, Т.П. Хомутецька, В.П. Хоружий. – К.: Аграрна наука, 2008. – 534 с.

4. *Хоружий П.Д.* Расчет гидравлического взаимодействия водопроводных сооружений / Хоружий П.Д. – Львов: Вища школа, изд-во при Львов. ун-те, 1983. – 152 с.

5. *Хомутецька Т.П.* До питання оптимізації сумісної роботи споруд в системах подачі і розподілення води / Хомутецька Т.П. // *Матеріали практич. конф. «Сучасні проблеми охорони довкілля та раціонального використання ресурсів у водному господарстві».* – К.: Тов. «Знання України», 2012. – С. 13–14.

6. *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.

7. *СНиП 2.04.02-84.* Водоснабжение. Наружные сети и сооружения / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1985. – 136 с.

8. *Николадзе Г.И.* Улучшение качества подземных вод / Николадзе Г.И. – М.: Стройиздат, 1987. – 240 с.

9. *Клячко В.А.* Очистка природных вод / В.А. Клячко, И.Э. Апельцин. – М.: Стройиздат, 1971. – 578 с.

10. *Водоподготовка*: справочник / под ред. С.Е. Беликова. – М.: Аква-Терм, 2007. – 240 с.

Приведены результаты исследований характеристик сооружений Черниговского водопровода и методика оптимизации их совместной работы для обеспечения подачи необходимых расходов воды нормативного качества при наименьших удельных затратах электроэнергии.

The article contains results studies of the characteristics facilities of Chernihiv water conduit and methods optimization of their joint work to supply the needed water discharge and normative quality at the lowest specific power consumption.