

УДК 628.1, 519.85.

DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.083>

О. МАТВИЄНКО, П. СПИЧАК

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВОДОПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ СПОСОБОМ ЇЇ ЗОНУВАННЯ

Метою є використання стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи водопровідної мережі для зниження надлишкових напорів шляхом встановлення регуляторів тиску на входах у виділені зони. **Предметом** дослідження є оптимізація структури водопровідної мережі шляхом зонування. У статті **задача** оптимального зонування водопровідних мереж вирішується з допомогою двох задач: виділення у водопровідній мережі відокремлених зон вузлів із надлишковими напорами, що перевищують задане значення; розрахунок параметрів регуляторів тиску, що встановлюються на входи у виділені зони. Для виділення зон запропонований **метод**, що ґрунтується на способі пошуку в ширину. Для розрахунку параметрів регуляторів тиску розв'язується задача оптимального розподілу навантаження між регуляторами тиску. Детермінований еквівалент цієї задачі розв'язується з використанням методів Ньютона та Нелдера – Міда. Завдяки розв'язанню цієї задачі отримуємо мінімальні необхідні значення напорів, що стабілізуються на виходах регуляторів, і максимальні допустимі значення витрат через них. Для визначення мінімального й максимального значень діапазонів зміни витрат і напорів на входах та виходах регулятора прогнозується максимальне й мінімальне водоспоживання всіма категоріями споживачів у виділеній зоні та розв'язується задача оптимального розподілу навантаження між регуляторами тиску. Унаслідок отримуємо діапазон зміни оптимальних значень витрат через регулятор і значень напорів, що стабілізуються, на виході регулятора. На підставі цієї інформації визначається тип регуляторів, що забезпечує необхідні діапазони зміни напорів на входах і виходах регуляторів для мінімальних та максимальних прогнозованих витрат через регулятор, та мінімальний допустимий напір на його вході. Здобуто такі **результати**: розрахунки показують, що завдяки зонуванню й установленню регуляторів тиску на входах в ізольовані зони водопровідної мережі розглянутої структури можливо знизити математичне сподівання сумарного надлишкового напору в мережі на 21%. **Висновки**: запропоновано математичну модель задачі оптимального зонування водопровідної мережі, що ґрунтується на стохастичній моделі квазістаціонарних режимів її роботи, та метод розв'язання цієї задачі. Обчислювальний експеримент, що проводився для водопровідної мережі заданої структури, показав, що внаслідок установлення регуляторів тиску на входах у виділені зони можливо підвищити ефективність її роботи.

Ключові слова: зонування; водопровідна мережа; стохастична модель; регулятор тиску; надлишковий напір.

Вступ

Розподіл водопровідної мережі (ВМ) на зони застосовується для проектування водопровідних мереж із значною різницею геодезичних позначок ділянок водопроводу, у різноповерхових забудовах районів міст, тобто коли є значна різниця між вільними напорами води, яких потребують різні користувачі. Реалізація зонування відбувається або за допомогою підключення в систему водопостачання додаткових насосних станцій, що працюють на виділені зони, або шляхом проведення додаткових магістральних трубопроводів, або завдяки встановленню резервуарів чистої води. Але ці заходи потребують значних матеріальних витрат. Є більш бюджетний підхід до зонування ВМ, що пов'язаний із використанням регуляторів тиску великих діаметрів, що мають дистанційне керування. Застосування регуляторів тиску дає змогу істотно зменшити витрати на зонування ВМ, знизити

надлишковий напір у вузлах ВМ і, відповідно, втрати води у вигляді витоків, а також заощадити витрати електроенергії на насосних станціях.

Аналіз наявних публікацій

Проблемам зонування ВМ присвячено багато наукових праць.

У роботі [1] розглядається метод зниження сумарних надлишкових тисків у мережах водопостачання способом їх зонування. Метод ґрунтується на стохастичній моделі квазістаціонарних режимів у системі подачі та розподілу води та передбачає встановлення регуляторів тиску й станцій підкачування.

Питанням розподілу ВМ на зони присвячені праці [2, 3, 4]. Тут розглядаються різні методи кластеризації графів для виділення зон.

Метод декомпозиції ВМ, що перетворює складну ВМ із великою кількістю компонентів

на просту з набором взаємопов'язаних модулів, досліджується в роботі [5]. Кількісний вимір і графічна візуалізація взаємозалежностей модулів ВМ допомагає зрозуміти вплив модулів один на одній.

У праці [6] пропонується багатоетапний підхід до декомпозиції та оптимізації ВМ із кількома джерелами подачі води.

Зонування ВМ для покращення обліку витрат води шляхом установлення лічильників в окремих зонах досліджується в роботі [7]. Її автори пропонують застосовувати метод зонування ВМ на основі стохастичної моделі квазістаціонарних режимів у системі подачі та розподілу води.

Змістовне визначення завдання зонування ВМ: ті вузли ВМ, в яких надлишкові напори значно перевищують задане порогове значення, треба згрупувати в пов'язані ділянки (зони) і передбачити встановлення регуляторів тиску на входах у зони, а також оцінити параметри кожного регулятора.

Якщо розглядати ВМ з одним джерелом подачі води, то задача зонування ВМ передбачає розв'язання двох взаємопов'язаних задач:

- виділення зон ВМ;
- визначення параметрів регуляторів тиску, що встановлюються на входах виділених зон ВМ.

Математична постановка задачі оптимального зонування водопровідних мереж

Вихідними даними для задачі зонування є: вся нормативно-довідкова інформація про структуру й параметри ВМ, а саме: технологічні схеми, довжини та діаметри ділянок трубопроводів, тип і характеристики насосних агрегатів, регульованих та відсічних засувок тощо; статистичні дані про фактичні режими роботи ВМ на значних інтервалах часу; оперативна інформація – мінімальні допустимі значення напорів у всіх вузлах ВМ,

прогнозовані значення добових обсягів водоспоживання в кожному вузлі ВМ, що обчислюються в нульовий момент часу з упередженням 365 днів та їх дисперсії.

Вважатимемо, що обчислені значення прогнозів мають нормальний розподіл $q_{i0}(\omega, l) \sim N(q_{i0}(l), \sigma_{q_{i0}}^2(l))$, $l = 1, 2, \dots, 365$. Постановку та розв'язання задачі зонування здійснюватимемо з використанням стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи ВМ [7] і максимального водоспоживання, тобто для $q_{i0}(k)$: $q_{i0}(k) = \max_l q_{i0}(l)$, $l = 1, 2, \dots, 365$.

До того ж значення максимального водоспоживання $q_i^+(k)$ в i -му вузлі визначатимемо з умови:

$$q_i^+(k): P(0 \leq q_{i0}(k) \leq q_i^+(k)) = 0,997. \quad (1)$$

Для подання структури ВМ у вигляді графа $G(V, E)$, де V – множина вершин, E – множина дуг ($e = \text{Card}(E)$, $v = \text{Card}(V)$), до реальної мережі додається нульова вершина й фіктивні хорди, що поєднують нульову вершину з усіма входами та виходами ВМ. Для побудови стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи ВМ зробимо таке кодування мережі: дерево графа виберемо таким чином, щоб фіктивні ділянки мережі стали хордами. У цьому разі реальні ділянки частково стануть хордами, а частково – гілками дерева. Гілки дерева з насосом присвоюємо номер 1, решті гілок – від 2 до $v-1$; хордам реальних ділянок – від v до $v + \eta_2 - 1$, де η_2 – кількість хорд реальних ділянок; фіктивним із заданими вузловими витратами – від $v + \eta_2$ до $v + \eta_2 + \xi_1 - 1$, де ξ_1 – кількість виходів із заданими вузловими витратами; хордам з іншими входами – від $v + \eta_2 + \xi_1$ до e .

Тоді стохастична модель квазістаціонарних режимів роботи ВМ матиме вигляд:

$$M_{\omega} \left(\text{sgn} q_r(\omega) S_r(q_r(\omega)) q_r^2(\omega) + \sum_{i=1}^{v-1} b_{1ri} \text{sgn} q_i(\omega) S_i(q_i(\omega)) q_i^2(\omega) \right) = 0, (r = v, \dots, v + \eta_2 - 1); \quad (2)$$

$$M_{\omega} \left(h_r^c(\omega) - h_{NS1}(\omega) + \sum_{i=1}^{v-1} b_{1ri} \left(\text{sgn} q_i(\omega) S_i(q_i(\omega)) q_i^2(\omega) + h_i^g \right) \right) = 0, (r = v + \eta_2, \dots, v + \eta_2 + \xi_1 - 1); \quad (3)$$

$$M_{\omega} \left(\text{sgn} q_r(\omega) S_r(q_r(\omega)) q_r^2(\omega) + h_r^g - h_{NSn}(\omega) + h_{NS1}(\omega) + \sum_{i=1}^{v-1} b_{1ri} \left(\text{sgn} q_i(\omega) S_i(q_i(\omega)) q_i^2(\omega) + h_i^g \right) \right) = 0, \quad (4)$$

$$(r = v + \eta_2 + \xi_1, \dots, e; \quad n = 1, \dots, N);$$

$$M(q_i(\omega)) = M\left(\sum_{r=v}^{v+\eta_2-1} b_{1ri} q_r(\omega) + \sum_{r=v+\eta_2}^e b_{1ri} q_r(\omega)\right), \quad (i=1, \dots, v-1); \quad (5)$$

$$P(h_i^c(\omega) \geq h_i^+) \geq \alpha, \quad (\alpha \cong 1), \quad (i = v + \eta_2, \dots, e). \quad (6)$$

Випадкові величини характеризують: $q_i(\omega)$ – витрати води на i -й ділянці трубопроводу; $h_{NS1}(\omega)$ – напір на виході першої насосної станції; $h_i^c(\omega)$ – вільний напір в r -му вузлі ($r = v + \eta_2, \dots, v + \eta_2 + \xi_1 - 1$); h_i^+ – мінімальний допустимий напір в i -му вузлі; $S_i(q_i(\omega))$ – оцінка гідравлічного опору i -ї ділянки трубопроводу; h_i^g – геодезична позначка i -ї ділянки трубопроводу; b_{1ri} – елемент цикломатичної матриці; N – кількість насосних станцій.

Для розв'язання системи рівнянь (2)–(6) до неї додаються граничні умови вигляду:

$$q_r(\omega) \sim N(\bar{q}_r, \sigma_{q_r}^2), \quad r = (v + \eta_2, \dots, e). \quad (7)$$

У цьому разі задачу зонування ВМ подамо у вигляді:

$$M \sum_{i=1}^{v-1} (h_i^c(\omega) - h_i^+)^2 \rightarrow \min_{G_i \in G}, \quad (8)$$

де G_i – підграф (i -а зона) графа G ВМ. Ділянка допустимих розв'язків Ω є системою рівнянь (2)–(6) стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи ВМ.

Для розв'язання системи рівнянь (2)–(6) задамо граничні умови (7) у вигляді $q_i^+(k)$, ($i=1, \dots, v$), k – період часу.

Задача (8) за умови обмежень (2)–(6) та умов (7) належить до класу одноетапних задач нелінійного стохастичного програмування.

Побудова детермінованого еквівалента задачі (2)–(8) відбувається шляхом заміни випадкових величин їх математичними сподіваннями.

Метод розв'язання задачі оптимального зонування водопровідних мереж

Розв'язання детермінованого еквівалента задачі (2)–(8) відбувається за кілька кроків [8–10].

1. Виділення зон. У процесі зонування ВМ будемо виділяти ізольовані зони ВМ, що в загальному випадку мають не менше ніж два входи (для забезпечення заданого рівня надійності та живучості ВМ). Розглянемо всі вузли ВМ, в яких надлишковий напір перевищує порогове значення

та які утворюють множину P ($card(P) = p$). Вузли, що виділяються в одну зону, мають задовольняти такі умови:

а) математичне сподівання надлишкового напору в кожному i -му вузлі виділеної зони має перевищувати деяке задане порогове значення:

$$\bar{h}_{izbi} = \bar{h}_i^c - h_i^+ \geq Porog, \quad i \in P_k \quad (k=1, \dots, p), \quad (9)$$

де \bar{h}_{izbi} – математичне сподівання надлишкового напору в i -му вузлі на заданому інтервалі управління; \bar{h}_i^c – математичне сподівання вільного напору в i -му вузлі на заданому інтервалі управління; h_i^+ – мінімальний допустимий напір в i -му вузлі; $Porog$ – математичне сподівання допустимого порогового значення надлишкового напору;

б) усі вузли виділеної зони мають складати одну зв'язану компоненту.

Нехай множина P складається з k зв'язаних компонент (зон):

$$P = P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_k, \quad P_i \cap P_j = \emptyset \quad (\forall i \neq j). \quad (10)$$

Нехай $M_{p \times p}$ – матриця суміжності для всіх вузлів із множини P . Для \forall вузла $i \in P_n$ ($n=1, \dots, k$) \exists хоча б один вузол $j \in P_n$, для якого $m_{ij} = 1$.

2. Визначення параметрів регуляторів тиску зони P_k . Кожен регулятор тиску характеризується таким набором параметрів: діапазонами зміни напору на вході й виході регулятора, діапазонами зміни витрат через регулятор. Для визначення параметрів регуляторів тиску необхідно визначити діапазони зміни математичного сподівання та дисперсій напорів і витрат на виході регулятора для всього інтервалу управління.

Для визначення параметрів регуляторів тиску для кожної виділеної зони P_n виділяється підграф $G_k(V_k, E_k)$ ВМ (де $V_k: v_k \in P_n$; $E_k = E_{1k} \cup E_{2k}$, E_{1k}, E_{2k} – множина реальних дуг, що відповідають входам у зону P_n , і множина фіктивних дуг, що відповідають виходам із зони P_n), і розв'язується задача оптимального розподілу навантаження між регуляторами тиску E_{1k} , установленими на входах у зону P_n , тобто задача (8) з обмеженнями (2)–(6) для підграфа $G_k(V_k, E_k)$. Детермінований

еквівалент цієї задачі розв'язується з використанням методів Ньютона та Нелдера – Міда.

Унаслідок розв'язання цієї задачі маємо мінімальні необхідні значення напорів, що стабілізуються на виходах регуляторів і максимальні допустимі значення витрат через них. Для визначення мінімального й максимального значень діапазонів зміни витрат і напорів на входах і виходах регулятора прогнозується максимальне й мінімальне водоспоживання всіма категоріями споживачів у виділеній зоні та розв'язується задача оптимального розподілу навантаження між регуляторами тиску. Унаслідок отримуємо діапазон зміни оптимальних значень витрат через регулятор і значень напорів, що стабілізуються на виході регулятора. На підставі цієї інформації визначається тип регуляторів, що забезпечує необхідні діапазони зміни напорів на входах і виходах регуляторів для мінімальних і максимальних прогнозованих витрат через

регулятор, та мінімальний допустимий напір на його вході $h_{\min Ri}$.

Кінцям дуг E_{lk} із встановленими регуляторами тиску привласнюються нові номери вузлів ВМ, для яких за мінімальні допустимі напори h_l^+ ($l \in E_{lk}$) приймаються значення мінімального допустимого напору на вході регулятора $h_i = h_{\min Ri}$. За математичне сподівання витрат у цих вузлах приймається максимальне значення витрат на виході регулятора $q_i = q_{\max Ri}$, а за оцінку дисперсії витрат – сума дисперсій витрат у вузлах зони P_{kj} : $\sigma_{q_i}^2 = \sum_{r \in P_k} \sigma_{q_r}^2$.

Усі інші вузли виділеної зони вилучаються з графа ВМ [11–15].

Для формалізації умови (п. 1, б) виділення зон наведемо алгоритм виділення зв'язаних компонент (зон) з використанням методу пошуку в ширину (рис. 1).

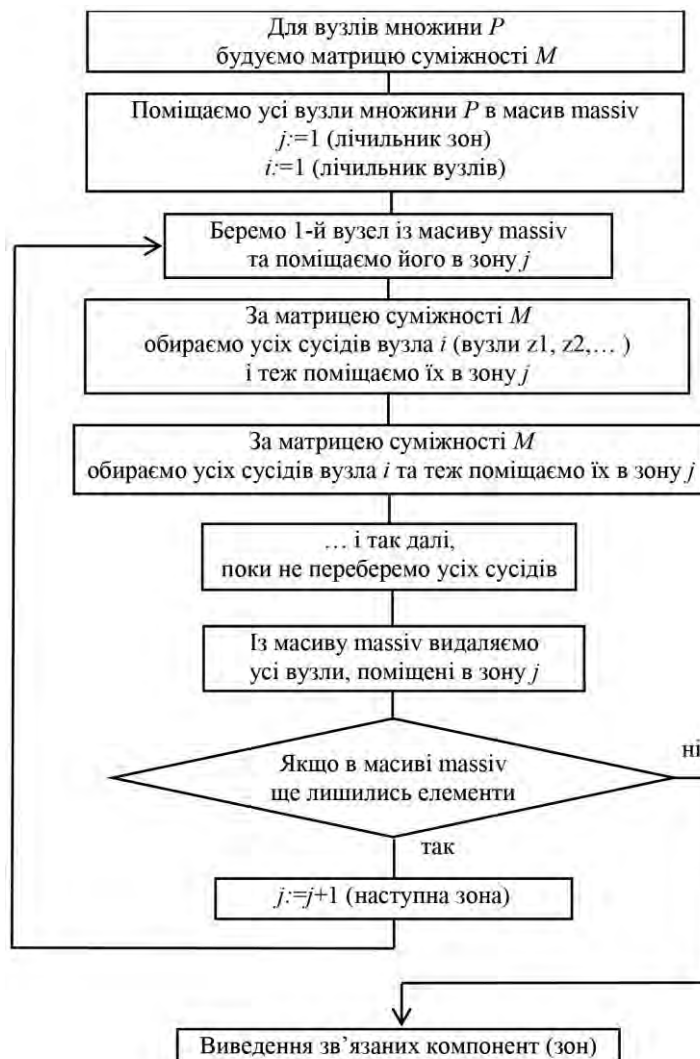


Рис. 1. Алгоритм виділення зв'язаних компонент (зон)

Результати досліджень

Вихідні дані

Розглянемо ділянку водопровідної мережі, що складається із джерела води, насоса, 28 вузлів та 36 ділянок трубопроводу (рис. 2).

Вихідні дані наведені в табл. 1.

Параметри насоса. Робоча точка насосного агрегата: $h_{NA}=60$ (м), $q_{NA}=150$ (м³/год). Напірна характеристика насосного агрегата Н-Q наведена на рис. 3.

Моделювання здійснюється протягом 24 год для чотирьох режимів, по 6 год кожен (рис. 4).

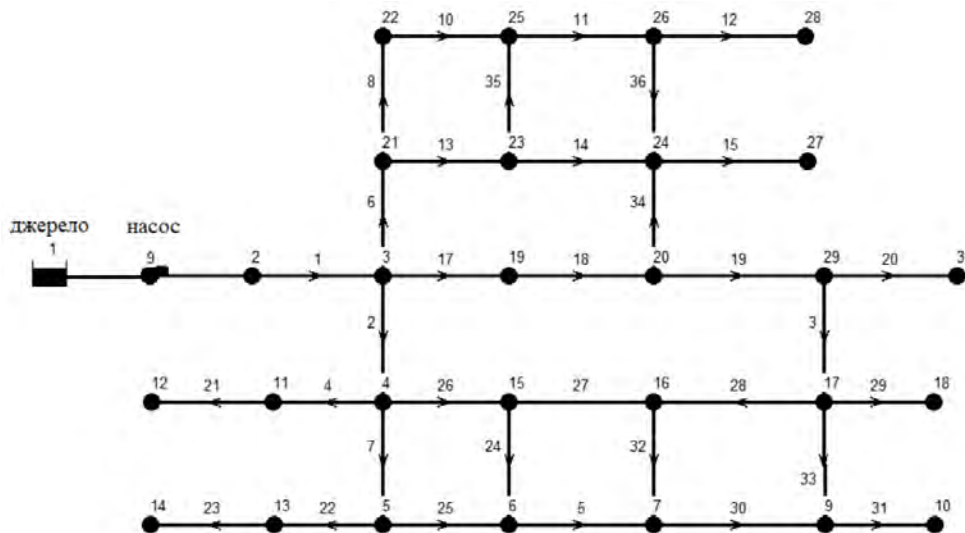


Рис. 2. Схема водопровідної мережі

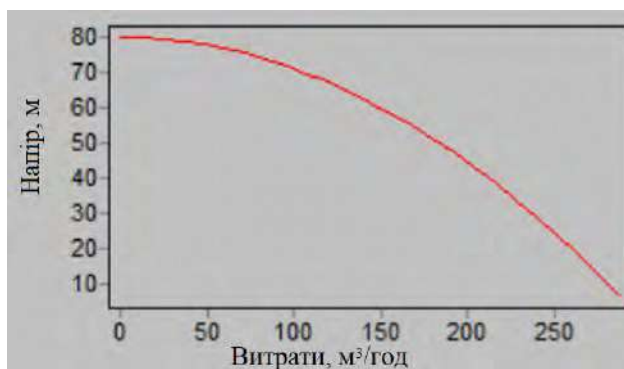


Рис. 3. H-Q характеристика насосного агрегата

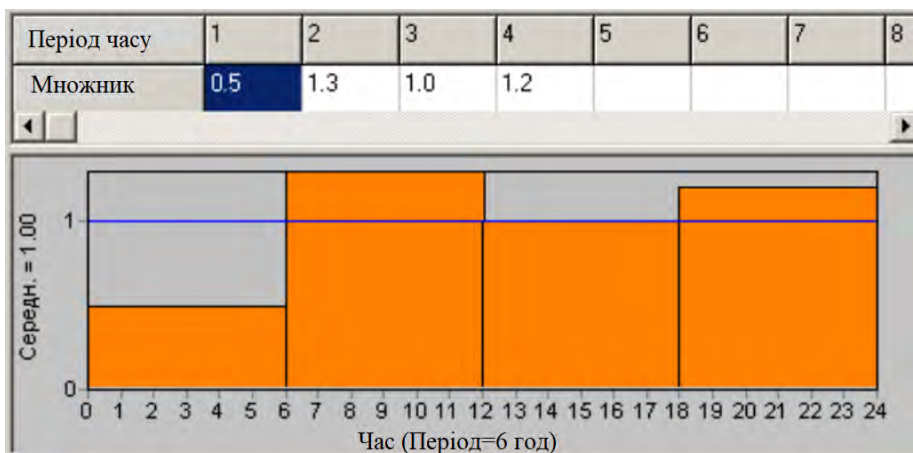


Рис. 4. Режими водоспоживання

Таблиця 1. Параметри вузлів і ділянок трубопроводу

Вузол	Висотна позначка, м	Витрати q , м ³ /год	Трубопровід	Довжина, л, м	Діаметр, d, мм
2	200	0	1	900	350
3	205	4	7	1500	150
4	200	3	5	740	250
5	198	2	6	1000	250
6	200	5	8	800	250
7	175	8	10	570	250
9	164	7	11	600	250
10	162	6	12	700	130
11	212	5	13	200	250
12	210	3	14	460	130
13	189	3	15	1000	130
14	194	1	17	600	250
15	190	4	18	500	250
16	170	4	19	1000	250
17	167	4	20	1500	200
18	168	4	25	466	150
19	190	7	26	300	150
20	187	8	27	500	150
21	176	6	28	48	150
22	170	7	29	600	200
23	170	10	30	500	250
24	160	8	31	105	200
25	172	5	2	760	250
26	171	6	3	680	200
27	165	5	4	500	200
28	173	5	21	800	150
29	200	8	22	560	150
30	210	3	23	450	130
-	-	-	24	1000	150
-	-	-	32	450	150
-	-	-	33	764	150
-	-	-	34	653	130
-	-	-	35	100	130
-	-	-	36	100	130

Множники використовуються для зміни вузлових витрат для кожного інтервалу часу.

На рис. 5 показані вузлові витрати (м³/год) для періоду 12–18 год.

Вузлові витрати для кожного періоду помножуються на множники, наведені в табл. 2.

На рис. 6 поданий динамічний графік зміни водоспоживання для деяких вузлів.

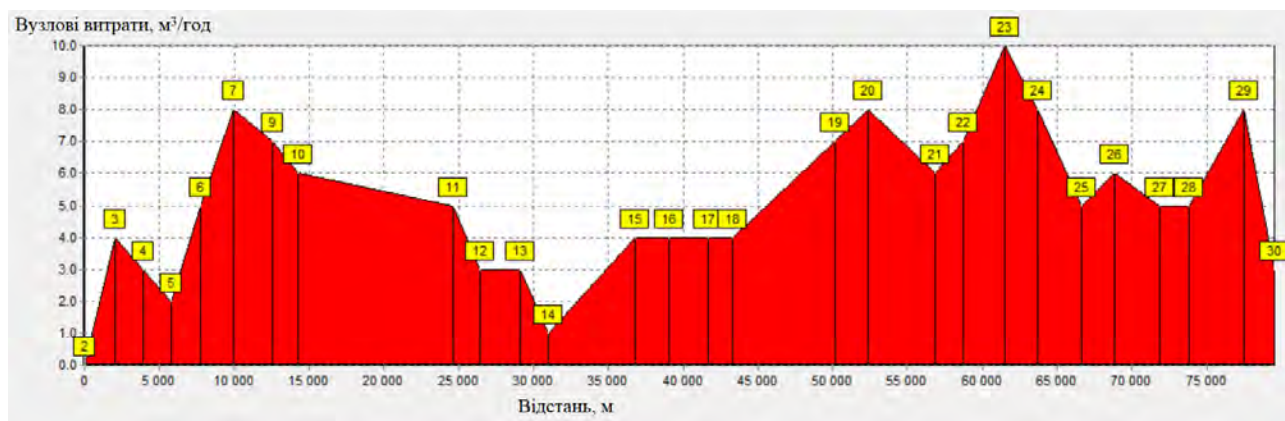


Рис. 5. Профіль вузлових витрат для періоду 12–18 год

Таблиця 2. Коефіцієнти для обчислення вузлових витрат

Період часу	0–6 год	6–12 год	12–18 год	18–24 год
Коефіцієнт	0,5	1,3	1	1,2

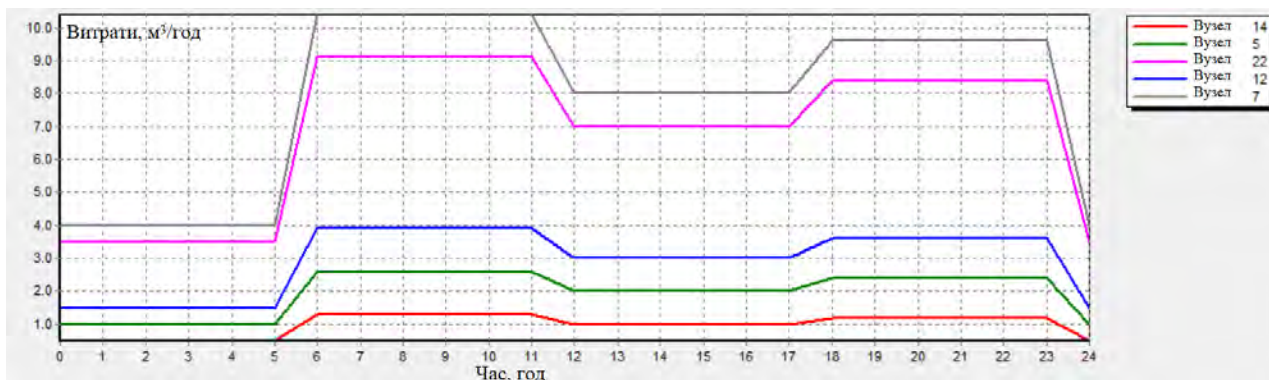


Рис. 6. Динамічні витрати для вузлів 14, 5, 22, 12, 7 для чотирьох періодів водопостачання

Аналіз наявного режиму роботи водопровідної мережі

Для кожного інтервалу часу розв'язується детермінований еквівалент задачі (2)–(8).

На рис. 7 наведені розраховані значення математичних сподівань витрат води по кожній ділянці трубопроводу та кожним споживачем для періоду часу (0–6).

Знаючи мінімальні допустимі напори в кожному вузлі (задані) та розраховані напори, обчислюємо надлишкові напори у вузлах (табл. 3).

Проаналізувавши результати розрахунків, виділимо дві зони вузлів, в яких надлишковий напір більше, ніж надлишковий напір в інших вузлах мережі. До першої зони належать вузли 7, 9, 10, 16, 17, 18 (виділені в табл. 3). До другої – вузли 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 (виділені в табл. 3). Мета – виділити відокремлені зони вузлів, в яких надлишковий напір перевищує задану величину, для того, щоб установити регулятори тиску на входах у ці зони. Такі заходи дозволять знизити надлишковий напір у мережі, який призводить до аварій трубопроводів та витоків.

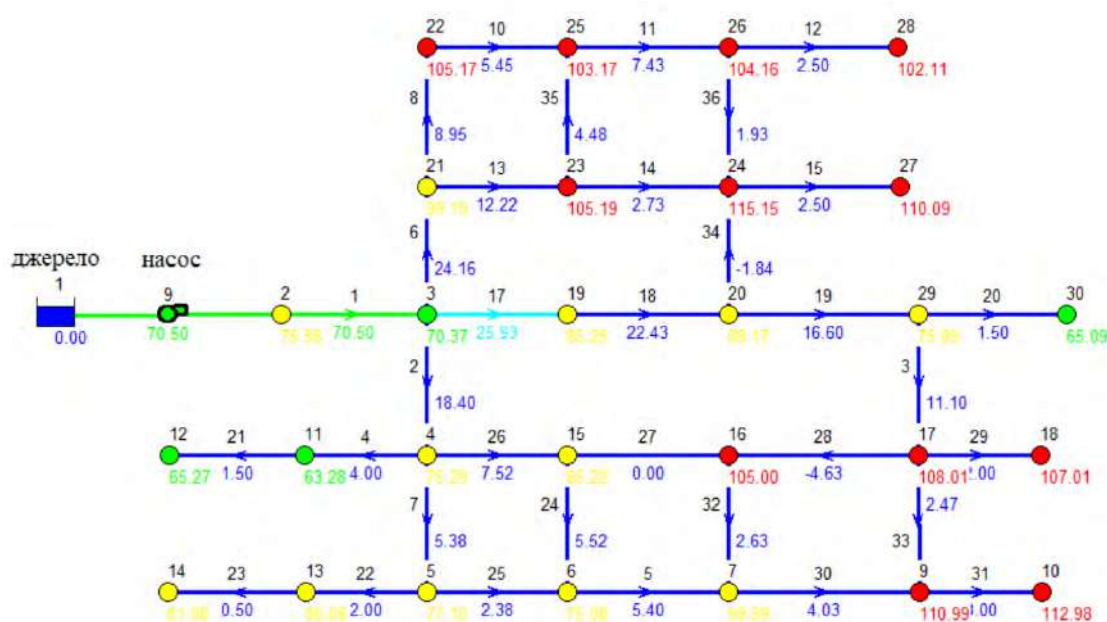


Рис. 7. Математичні сподівання витрат води по кожній ділянці трубопроводу та напорів у кожному вузлі для періоду часу (0–6)

Таблиця 3. Надлишкові напори для вузлів водопровідної мережі для чотирьох періодів часу

вузол	h^+	мін. 0–6 год		макс. 6–12 год		сер1 12–18 год		сер2 18–24 год	
		h^c	h_{izb}	h^c	h_{izb}	h^c	h_{izb}	h^c	h_{izb}
2	50	75,58	25,58	50,13	0,13	62,33	12,33	54,55	4,55
3	43	70,37	27,37	43,86	0,86	56,55	13,55	48,46	5,46
4	45	75,29	30,29	48,4	3,4	61,26	16,26	53,06	8,06
5	45	77,1	32,1	49,25	4,25	62,57	17,57	54,09	9,09
6	45	75,08	30,08	47,21	2,21	60,53	15,53	52,03	7,03
7	65	99,99	34,99	71,65	6,65	85,18	20,18	76,55	11,55
9	70	110,99	40,99	82,63	12,63	96,17	26,17	87,53	17,53
10	70	112,98	42,98	84,62	14,62	98,17	28,17	89,53	19,53
11	35	63,28	28,28	36,35	1,35	49,23	14,23	41,01	6,01
12	35	65,27	30,27	38,29	3,29	51,2	16,2	42,97	7,97
13	50	86,05	36,05	58,22	8,22	71,53	21,53	63,04	13,04
14	50	81,08	31,08	53,21	3,21	66,53	16,53	58,03	8,03
15	50	85,22	35,22	57,99	7,99	71,01	21,01	62,7	12,7
16	70	105	35	76,74	6,74	90,24	20,24	81,62	11,62
17	70	108,01	38,01	79,78	9,78	93,26	23,26	84,65	14,65
18	70	107,01	37,01	78,75	8,75	92,24	22,24	83,63	13,63
19	50	85,25	35,25	58,18	8,18	71,12	21,12	62,87	12,87
20	50	88,17	38,17	60,74	10,74	73,86	23,86	65,49	15,49
21	65	99,19	34,19	71,86	6,86	84,93	19,93	76,59	11,59
22	70	105,17	35,17	77,73	7,73	90,85	20,85	82,48	12,48
23	70	105,19	35,19	77,81	7,81	90,8	20,8	82,54	12,54
24	70	115,15	45,15	87,61	17,61	100,77	30,77	92,37	22,37
25	70	103,17	33,17	75,7	5,7	88,83	18,83	80,45	10,45
26	70	104,16	34,16	76,62	6,62	89,79	19,79	81,39	11,39
27	70	110,09	40,09	82,25	12,25	95,55	25,55	87,08	17,08
28	70	102,11	32,11	74,38	4,38	87,63	17,63	79,17	9,17
29	45	75,09	30,09	47,24	2,24	60,55	15,55	52,06	7,06
30	37,22	65,09	27,87	37,22	0	50,53	13,31	42,04	4,82

Отже, це задача збереження ресурсів. Виділена зона має задовольняти вимоги:

1. Необхідно, щоб усі вузли були пов'язані між собою.
2. В усіх вузлах зони надлишковий напір має бути більший від заданого значення.
3. Необхідно, щоб зона мала не більше ніж два входи / виходи.

На рис. 8 наведено виділені зони.

На рис. 9 вказано висотні позначки всіх вузлів. Звідси видно, що вузли виділених зон розташовані в низинах. Із цієї причини там і виникає надлишковий напір.

У табл. 4 наведені суми квадратів надлишкових напорів по всій водопровідній мережі та по двох виділених зонах.

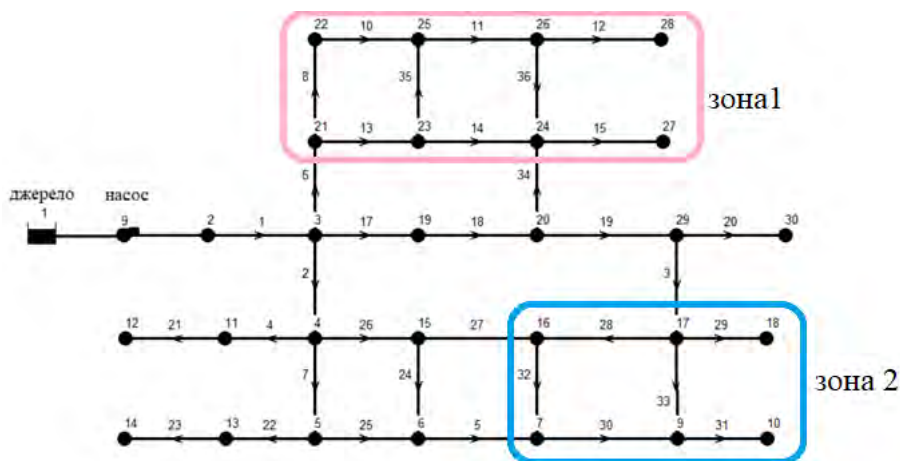


Рис. 8. Виділені зони

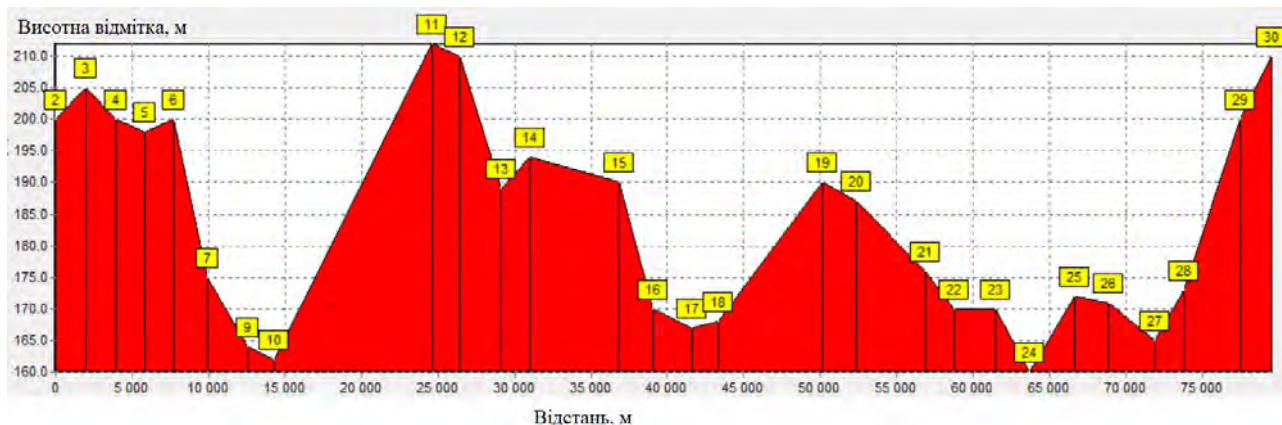


Рис. 9. Діаграма профелів (жовті – номери вузлів)

Таблиця 4. Суми квадратів надлишкових напорів $f(m^2)$ по всій водопровідній мережі та по двох виділених зонах

Період часу	0–6 год	6–12 год	12–18 год	18–24 год	Сума
мережа	33239	1735,5	11479	4141,7	50596
зона 1	8791,3	635,12	3331	1357,5	14115
зона 2	10588	723,48	3921,2	1562,5	16795

Оптимізація шляхом зонування та встановлення регуляторів тиску

Для того, щоб знизити надлишковий напір у виділених зонах, встановимо регулятори тиску на входах у зони, а саме на ділянках трубопроводу 6 для першої зони та 5 для другої. З огляду на структуру мережі, а також на те, що цю систему забезпечує водою одна насосна станція (насос), виходячи із зон можна перекрити засувкою (дуги 34 та 3). Розрахунки будемо проводити для режиму максимального водопостачання.

Розв'язавши задачі зонування ВМ (8) за умови обмежень (2)–(6) та умови (7) для виділених зон, отримаємо параметри регуляторів напору, що необхідно встановити на входах у зони.

У вузлах зони 1 для періоду максимального водопостачання мінімальний надлишковий напір становить 6,65 м, зони 2 – 4,38 м. На вхід зони 1 встановлюємо регулятор тиску "після себе" $h_1=44,3$ м. Установивши на входах в цю зону регулятор тиску та знизивши напір води на вході в зону 1, отримаємо такі результати (табл. 5).

Таблиця 5. Величини надлишкового напору у вузлах зони 1 для різних періодів водопостачання, м

вузол	h^+	h^c 0–6 год	h^c 6–12 год	h^c 12–18 год	h^c 18–24 год	h_{izb} 0–6 год	h_{izb} 6–12 год	h_{izb} 12–18 год	h_{izb} 18–24 год
7	65	81,27	65,19	72,89	67,98	16,27	0,19	7,89	2,98
9	70	92,26	76,11	83,85	78,91	22,26	6,11	13,85	8,91
10	70	94,26	78,1	85,84	80,91	24,26	8,1	15,84	10,91
16	70	86,24	70,01	77,78	72,83	16,24	0,01	7,78	2,83
17	70	89,24	73	80,78	75,82	19,24	3	10,78	5,82
18	70	88,24	71,99	79,77	74,81	18,24	1,99	9,77	4,81

На рис. 10 наведені оцінки математичних сподівань витрат води по кожній ділянці трубопроводу та напорів у кожному вузлі зони 1 для різних періодів часу.

На вхід зони 2 встановлюємо регулятор тиску "після себе" $h_2=56,57$ м. Установивши на входах у цю зону регулятор тиску й знизивши напір води на вході в зону 2, отримаємо такі результати (табл. 6).

На рис. 11 наведено оцінки математичних сподівань витрат води по кожній ділянці трубопроводу й напорів у кожному вузлі зони 1 для різних періодів часу.

Результати зонування подані в табл. 7.

На рис. 12 можна побачити, що внаслідок встановлення регуляторів тиску на входах в зони сума квадратів надлишкових напорів значно знизилась.

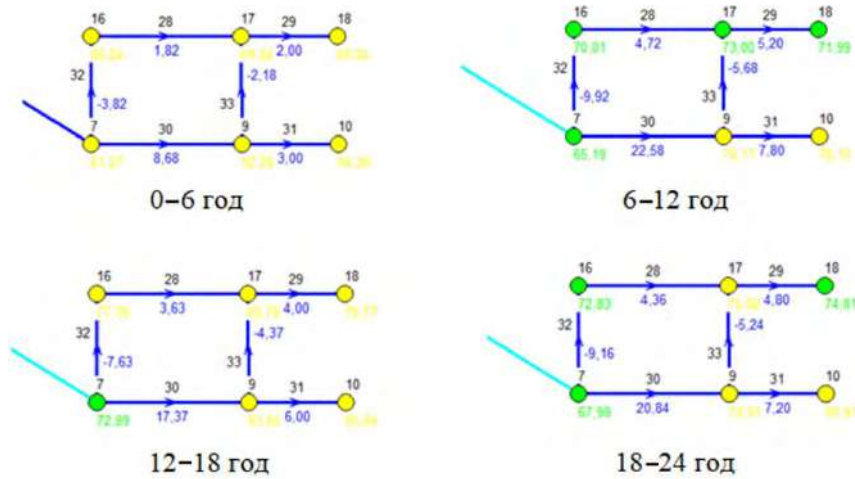


Рис. 10. Оцінки математичних сподівань витрат води по кожній ділянці трубопроводу й напорів у кожному вузлі зони 1 для різних періодів часу

Таблиця 6. Величини надлишкового напору у вузлах зони 2 для різних періодів водопостачання, м

вузол	h^+	h^c 0–6 год	h^c 6–12 год	h^c 12–18 год	h^c 18–24 год	h_{izb} 0–6 год	h_{izb} 6–12 год	h_{izb} 12–18 год	h_{izb} 18–24 год
21	65	94,71	67,55	80,56	72,26	29,71	2,55	15,56	7,26
22	70	100,69	73,4	86,47	78,13	30,69	3,4	16,47	8,13
23	70	100,7	73,48	86,52	78,21	30,7	3,48	16,52	8,21
24	70	110,65	83,2	96,35	87,97	40,65	13,2	26,35	17,97
25	70	98,68	71,35	84,44	76,09	28,68	1,35	14,44	6,09
26	70	99,66	72,26	85,39	77,02	29,66	2,26	15,39	7,02
27	70	105,59	77,84	91,13	82,65	35,59	7,84	21,13	12,65
28	70	97,62	70,01	83,23	74,8	27,62	0,01	13,23	4,8

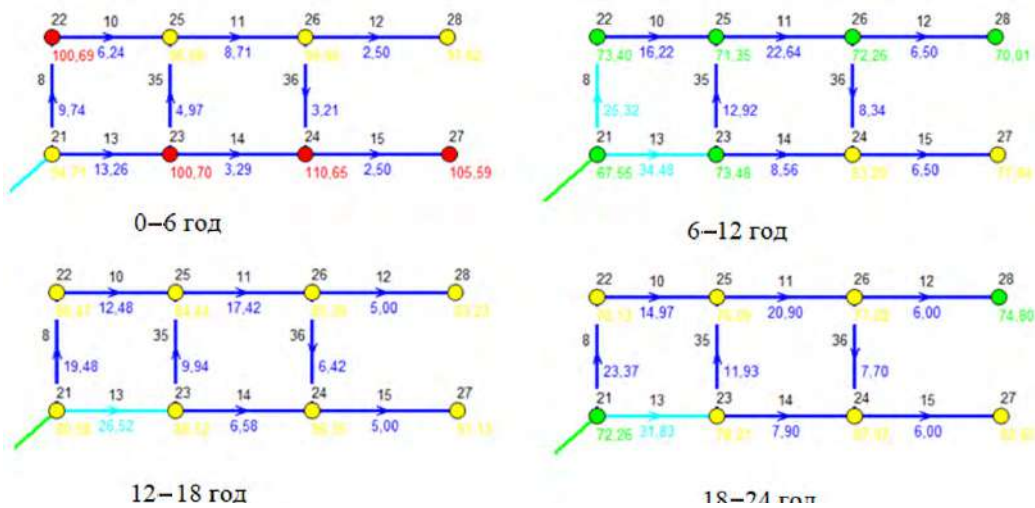


Рис. 11. Оцінки математичних сподівань витрат води по кожній ділянці трубопроводу й напорів у кожному вузлі зони 2 для різних періодів часу

Таблиця 7. Суми квадратів надлишкових напорів $f(m^2)$ по всій водопровідній мережі та по двох виділених зонах

Період часу	0–6 год	6–12 год	12–18 год	18–24 год	Сума
мережа	24327	765,65	7552,1	2272,5	34917
зона 1	2315,4	115,94	777,17	272,31	3480,8
зона 2	8151,2	272,81	2547,5	778,56	11750

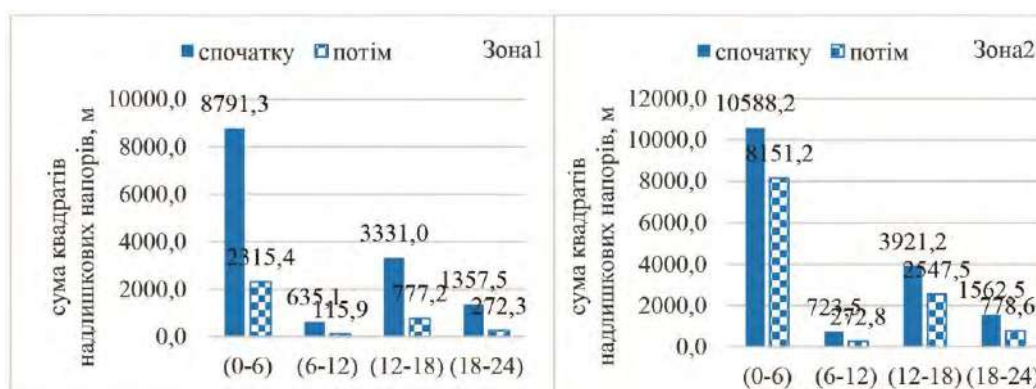


Рис. 12. Сума квадратів надлишкових напорів по зонах до зонування та після

На рис. 13 зображена сума квадратів надлишкових напорів та сума надлишкових напорів у мережі до зонування та після.

Здобуті результати підтверджують, що, завдяки зонуванню та встановленню регуляторів напору на входах в ізольовані зони, можна підвищити ефективність роботи водопровідної мережі.

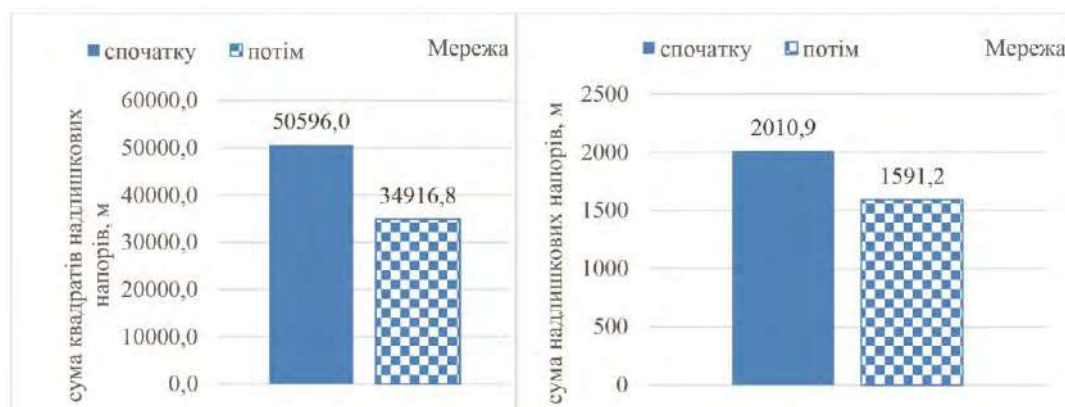


Рис. 13. Сума квадратів надлишкових напорів і сума надлишкових напорів у мережі до зонування та після

Висновки

У роботі запропоновано математичну модель задачі оптимального зонування водопровідної мережі, що ґрунтується на стохастичній моделі квазістаціонарних режимів її роботи, і метод розв'язання цієї задачі. Обчислювальний експеримент, який проводився для водопровідної мережі заданої структури, показав, що внаслідок встановлення регуляторів тиску на входах у виділені зони, можливо підвищити ефективність її роботи.

Список літератури

1. Тевяшев А. Д., Матвиенко О. И. Стохастическая модель и метод зонирования водопроводных сетей. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Vol 1 (67). С. 17–24.
2. Perelman L. S., Allen M., Preis A., Iqbal M., Whittle A. J. Automated Sub-Zoning of Water Distribution Systems. *Environmental Modelling & Software*. 2015. № 65. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.025>
3. Nardo A. D., Natale M. D., Santonastaso G. F., Venticinque S. Graph Partitioning for Automatic Sectorization of a Water Distribution System. 2011. 841.

4. Nardo A.D., Natale M.D., Giudicianni C. Weighted Spectral Clustering for Water Distribution Network Partitioning. *Appl Netw Sci.* 2017. Vol 2. 19 p.
5. Diao K., Jung D., Farmani R., Fu G., Butler D., Lansey K. Modular interdependency analysis for water distribution systems. *Water Research.* 2021. № 201. 117320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117320>
6. Zheng F., Zecchin A. C., Simpson A. R. A decomposition and multi-stage optimization approach applied to the optimization of water distribution systems with multiple supply sources. *Water Resources Research.* 2013. № 49. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012WR013160>
7. Diao K., Zhou Y., Rauch W. Automated Creation of District Metered Area Boundaries in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management.* March/april 2013. P. 184–190. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000247](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000247)
8. Matviienko O., Manchynska N. Method for Calculation of Dispersions of Dependent Variables of a Stochastic Model of Quasi-Stationary Operating Modes of the Main Water Pipeline. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries / Mathematical Modeling & Computational Methods.* 2022. No. 4 (22). P. 58–69. DOI: <https://doi.org/10.30837/itssi.2022.22.058>
9. Tevyashev A., Matviienko O., Nikitenko G. Construction of a Stochastic Model for a Water Supply Network with Hidden Leaks and a Method for Detecting and Calculating the Leaks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2019. Vol. 6/4 (102). P. 29–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.186157>
10. Тевяшев А. Д., Козыренко С. И., Непочатова В. Д. Метод построения модели квазистационарных режимов работы водопроводных сетей с утечками. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2010. №9 (44). С. 9–12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2010.2738>
11. Самойленко Н. И., Гавриленко И. А., Сенчук Т. С. Разработка моделей упорядочивания ребер графа трубопроводной распределительной сети. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2015. №4 (75). С. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42811>
12. Безкоровайний В. В., Березовський Г. В. Оцінка властивостей технологічних систем із використанням нечітких множин. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості №1 (1).* 2017. С. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.014>
13. Безкоровайний В. В. Параметричний синтез моделей багатокритеріального оцінювання технологічних систем. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості №2 (2).* 2017. С. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.2.005>
14. Давідіч Ю. О., Галкін А. С., Давідіч Н. В., Галкіна О. П. Оцінка величини енергетичних витрат кінцевих споживачів логістичної системи в процесі освоєння матеріального потоку. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості №2 (2).* 2018. С. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.4.005>
15. Elhay S., Deuerlein J., Olivier Piller O., Simpson A.R. Graph Partitioning in the Analysis of Pressure Dependent Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management.* 2018. №144 (4). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000896](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000896)

References

1. Tevyashev, A. D., Matviienko, O. I. (2014), "Stochastic Model and Method of Zoning of Water Supply Networks", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol 1 (67), P. 17–24.
2. Perelman, L. S., Allen, M., Preis, A., Iqbal, M., Whittle, A. J. (2015), "Automated Sub-Zoning of Water Distribution Systems", *Environmental Modelling & Software*, Vol. 65, P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.025>
3. Nardo, A. D., Natale, M. D., Santonastaso, G. F., Venticinque, S. (2011), *Graph Partitioning for Automatic Sectorization of a Water Distribution System*, 841 p.
4. Nardo, A.D., Natale, M.D., Giudicianni, C. (2017), "Weighted Spectral Clustering for Water Distribution Network Partitioning", *Appl Netw Sci.*, Vol. 2, 19 p.
5. Diao, K., Jung, D., Farmani, R., Fu, G., Butler, D., Lansey, K. (2021), "Modular Interdependency Analysis for Water Distribution Systems", *Water Research*, Vol. 201, 117320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117320>
6. Zheng, F., Zecchin, A. C., Simpson, A. R. (2013), "A Decomposition and Multi-Stage Optimization Approach Applied to the Optimization of Water Distribution Systems with Multiple Supply Sources", *Water Resources Research*, Vol. 49, P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012WR013160>
7. Diao, K., Zhou, Y., Rauch, W. (2013), "Automated Creation of District Metered Area Boundaries in Water Distribution Systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, march/april 2013, P. 184–190. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000247](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000247)
8. Matviienko, O., Manchynska, N. (2022), "Method for Calculation of Dispersions of Dependent Variables of a Stochastic Model of Quasi-Stationary Operating Modes of the Main Water Pipeline", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries / Mathematical Modeling & Computational Methods*, No. 4 (22), P. 58–69. DOI: <https://doi.org/10.30837/itssi.2022.22.058>
9. Tevyashev, A., Matviienko, O., Nikitenko, G. (2019), "Construction of a Stochastic Model for a Water Supply Network with Hidden Leaks and a Method for Detecting and Calculating the Leaks", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6/4 (102), P. 29–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.186157>
10. Tevyashev, A. D., Kozыренко, S. I., Nepochatova, V. D. (2010), "Method for constructing a model of quasi-stationary modes of operation of water supply networks with leaks" ["Metod postroeniya modeli kvazistatsionarnykh rezhimov raboty vodoprovodnykh setey s utechkami"], *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 9 (44), P. 9–12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2010.2738>
11. Samoylenko, N. I., Gavrilenko, I. A., Senchuk, T. S. (2015), "Development of mathematical models for ordering the edges of the pipeline distribution network graph" ["Razrabotka matematicheskikh modeley uporyadochivaniya reber grafa truboprovodnoy raspredelitel'noy seti"], *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 4 (75), P. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42811>

12. Bezkorovayniy, V. V., Berezovskiy, G. V. (2017), "Evaluation of the properties of technological systems using fuzzy sets" ["Otsinka vlastyvostrykh tekhnolohichnykh system iz vykorystanniam nechitkykh mnozhyn"], *The current state of scientific research and technology in industry*, No. 1 (1), P. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.014>
13. Bezkorovayniy, V. V. (2017), "Parametric synthesis of models of multi-criteria assessment of technological systems" ["Parametrychnyy syntezy modeley bahatokryterial'noho otsynuyvannya tekhnolohichnykh system"], *The current state of scientific research and technology in industry*, No. 2 (2), P. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.2.005>
14. Davidich, Yu. O., Galkin, A. S., Davidich, N. V., Galkina, O. P. (2018), "Estimation of energy costs of end users of the logistics system in the process of mastering the material flow" ["Otsinka velychyny enerhetychnykh vytrat kintsevykh spozhyvachiv lohistychnoyi systemy v protsesi osvoyennya material'noho potoku"], *The current state of scientific research and technology in industry*, No. 2 (2), P. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.4.005>
15. Elhay, S., Deuerlein, J., Piller, O., Simpson, A. R. (2018), "Graph Partitioning in the Analysis of Pressure Dependent Water Distribution Systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, No. 144 (4). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000896](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000896)

Received 16.01.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Матвієнко Ольга Іванівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри прикладної математики, Харків, Україна; e-mail: olha.matviienko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7492-7616>.

Спичак Поліна Олександрівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, студентка IV курсу, Харків, Україна; e-mail: polina.spychak@nure.ua.

Matviienko Olha – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of Department of Applied Mathematics, Kharkiv, Ukraine.

Spichak Polina – Kharkiv National University of Radio Electronics, student, Kharkiv, Ukraine.

METHOD OF INCREASING THE EFFICIENCY OF THE WATER SUPPLY NETWORK DUE TO ITS ZONING

The **goal** of the work is to use a stochastic model of quasi-stationary modes of water supply network to reduce excess pressure in the water supply network by establishing pressure regulators at the entrances to the selected zones. The **subject** of research in the article is the optimization of the structure of water supply network by zoning. The article discusses the **task** of optimal zoning of water supply networks, which consists of two subtasks: allocation in the water supply network of isolated zones of nodes with excess pressure exceeding a given value; calculation of the parameters of pressure regulators installed at the entrances to the selected zones. A **method** based on the breadth-first search method is proposed for zone selection. The deterministic equivalent of this problem is solved using the Newton and Nelder-Mead methods. As a result of solving this problem, we obtain the minimum required values of the pressures stabilized at the outlets of the regulators and the maximum allowable values of the flow rates through them. To determine the minimum and maximum values of the ranges of flow rates and pressures at the inlets and outlets of the regulator, the forecast of the maximum and minimum water consumption by all categories of consumers in the selected zone is carried out and the problem of optimal load distribution between the pressure regulators is solved. As a result, we obtain a range of changes in the optimal flow rates through the regulator and the values of pressure stabilized at the output of the regulator. Based on this information, the type of regulators is determined that provides the necessary ranges of pressure changes at the inlets and outlets of the regulators for the minimum and maximum predicted costs through the regulator and the minimum allowable pressure at its inlet. The following **results** were obtained: calculations show that, using zoning and installation of pressure regulators at the inlets to isolated zones of the water supply network of the structure under consideration, it is possible to reduce the mathematical expectation of the total excess pressure in the network by 21%. **Conclusions:** the paper proposes a mathematical model for the problem of optimal zoning of the water supply network, based on a stochastic model of quasi-stationary modes of its operation, and a method for solving this problem. A computational experiment carried out for a water supply network of a given structure showed that as a result of installing pressure regulators at the entrances to the selected zones, it is possible to increase the efficiency of its operation.

Keywords: zoning; water supply network; stochastic model; pressure regulator; excess pressure.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Матвієнко О. І., Спичак П. О. Метод підвищення ефективності роботи водопровідної мережі способом її зонування. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 83–95. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.083>

Matviienko, O., Spichak, P. (2023), "Method of increasing the efficiency of the water supply network due to its zoning", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 83–95. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.083>