

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ВОДОПРОВІДНИХ СИСТЕМ З МЕТОЮ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Тетяна Хомуцька¹, Віктор Хоружий², Юлія Недашківська³,
Ігор Недашковський⁴, Віктор Нор⁵

^{1,2,3}Київський національний університет будівництва і архітектури

31, Повітрофлотський пр., м. Київ, Україна, 03037

⁴Одеська державна академія будівництва та архітектури

4, вул. Дідріхсона, м. Одеса, Україна, 65029

⁵Інститут водних проблем і меліорації НААН України

37, вул. Васильківська, м. Київ, Україна, 03022

¹докт. техн. наук, ст. наук. співробітник, khomutetska.tp@knuba.edu.ua,
orcid.org/0000-0003-0153-4920

²докт. техн. наук, професор, khoruzhyi.vp@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-5314-0483

³n.y.m@ukr.net, orcid.org/0000-0001-5936-1001

⁴канд. техн. наук, pk-ogasa@ukr.net, orcid.org/0000-0002-9494-6694

⁵rostem29@gmail.com, orcid.org/0000-0001-7577-8800

DOI: 10.32347/2524-0021.2020.34.25-36

Анотація. Водопровідна галузь належить до однієї з найбільш енергоємних, тому актуальним завданням на сьогоднішній день є пошук методів забезпечення енергоощадного водопостачання населених пунктів і окремих об'єктів. Водопровідні системи являють собою комплекс споруд, які перебувають у взаємодії, тому зміна у роботі будь-якої однієї споруди неодмінно впливає на показники роботи інших і всієї системи водопостачання загалом. Нині більшості підприємств комунального господарства притаманна велика спрацьованість основних фондів, насамперед водопровідних мереж, що є причиною суттєвих втрат і вторинного забруднення води. Зміни норм і режимів водоспоживання в населених пунктах призводять до створення надлишкових тисків в системі водопостачання та зростання її аварійності. При цьому робота насосів часто перебуває за межами рекомендованого застосування з низькими показниками коефіцієнтів корисної дії, а тому питомі витрати електроенергії на подачу води в багатьох регіонах країни продовжують залишатися на високому рівні. У процесі експлуатації поступово змінюються характеристики всіх споруд гідравлічної взаємодії, що призводить до виникнення протиріч між проектними і реальними експлуатаційними показниками роботи системи водопостачання, забезпечення споживачів потрібними витратами і напорами води. Поліпшити ситуацію можна за рахунок використання раціональних схем, енергозберігаючих технологій і сучасного ефективного обладнання, матеріалів і засобів на всьому шляху транспортування води від водного джерела до споживача. Знизити енергоспоживання в системі можна, застосовуючи метод імітаційного моделювання роботи гідравлічно взаємодіючих споруд, який дозволяє досліджувати різні можливі варіанти подачі розрахункових витрат води, аналізувати отримані результати розрахунку за показником питомих енерговитрат та встановити доцільні схеми водопостачання й енергозберігаючі режими експлуатації споруд. У статті наводиться приклад користування даним методом.

Ключові слова: система водопостачання; насосна станція; водопровідна мережа; імітаційне моделювання; енергозбереження

ВСТУП

Під час проектування нових і реконструкції діючих систем водопостачання необхідно здійснювати розрахунки, які дають змогу підбирати комплекс споруд і окремі елементи, які до них входять [1-5]. При цьому прагнуть досягти обґрунтованих рішень стосовно подачі усім споживачам розрахункової кількості води потрібної якості під необхідним вільним напором при дотриманні умов надійності та забезпеченні економічності будівництва і експлуатації водопровідної системи [6-9]. Для досягнення цієї мети доцільно розглядати альтернативні варіанти подачі води споживачам за різними схемами, з наявністю тих чи інших елементів в системі водопостачання, а також досліджуючи роботу споруд з різними експлуатаційними режимами. Техніко-економічні показники варіантів, що розглядаються, залежать як від вартості капітального будівництва, так і від експлуатаційних витрат, найвагомішу частку яких у більшості випадків становить вартість споживаної електроенергії.

Питанням енергозбереження у водопровідній галузі останнім часом було присвячено низку наукових робіт [10-14]. Щоб дослідити експлуатаційні показники споруд при зміні в роботі системи необхідно здійснювати моделювання процесів [15-17]. Оцінювати рівень енергоспоживання в системах водопостачання доцільно за показником питомих витрат електроенергії на подачу води споживачам. Для цього потрібно провести низку досліджень з використанням розробленого методу імітаційного моделювання сумісної роботи гідравлічно взаємодіючих споруд.

МЕТА І МЕТОДИ

При імітаційному моделюванні застосовується методологія системного аналізу, що дозволяє експериментувати на комп'ютері, не вдаючись до експериментів на реальному об'єкті, використовуючи отримані результати в цілях проекту-

вання, аналізу та оцінки функціонування системи. Досліджуючи будь-які системи водопостачання методом імітаційного моделювання з використанням аналітичних та математичних залежностей, наведених в літературних джерелах [18, 19], можна аналізувати отримані результати розрахунків питомих витрат електроенергії за різними варіантами водоподачі та визначати склад і режими експлуатації споруд з найнижчим енергоспоживанням при дотриманні умов забезпечення розрахункових витрат і напорів води в системі. Логіко-математичне наповнення такої імітаційної моделі включає визначення гідравлічних та енергетичних показників, що дозволяє встановити питоми витрати електроенергії на подачу води. Рівняння, які описують імітаційну модель роботи системи водопостачання, встановлюють, враховуючи зміни характеристик споруд у процесі експлуатації. У кожному окремому випадку ці рівняння залежать від конкретної схеми, наявності тих чи інших споруд та умов їх експлуатації.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Застосування методу імітаційного моделювання при дослідженні сумісної роботи гідравлічно взаємодіючих споруд за різними варіантами водоподачі покажемо на такому прикладі.

Безбаштова схема водопостачання

Для початку розглянемо подачу води насосами в безбаштову систему, водопровідна мережа якої складається з 16 кілець. На рис. 1 приведено її розрахункову схему при максимальному водоспоживанні витратою $Q_p = 553$ л/с, де вказано номери вузлів і кілець мережі, потрібні п'єзометричні відмітки у вузлах, напрямки руху і витрати води ділянками q_j та втрати напору на них h_j , що встановлені гідравлічним розрахунком.

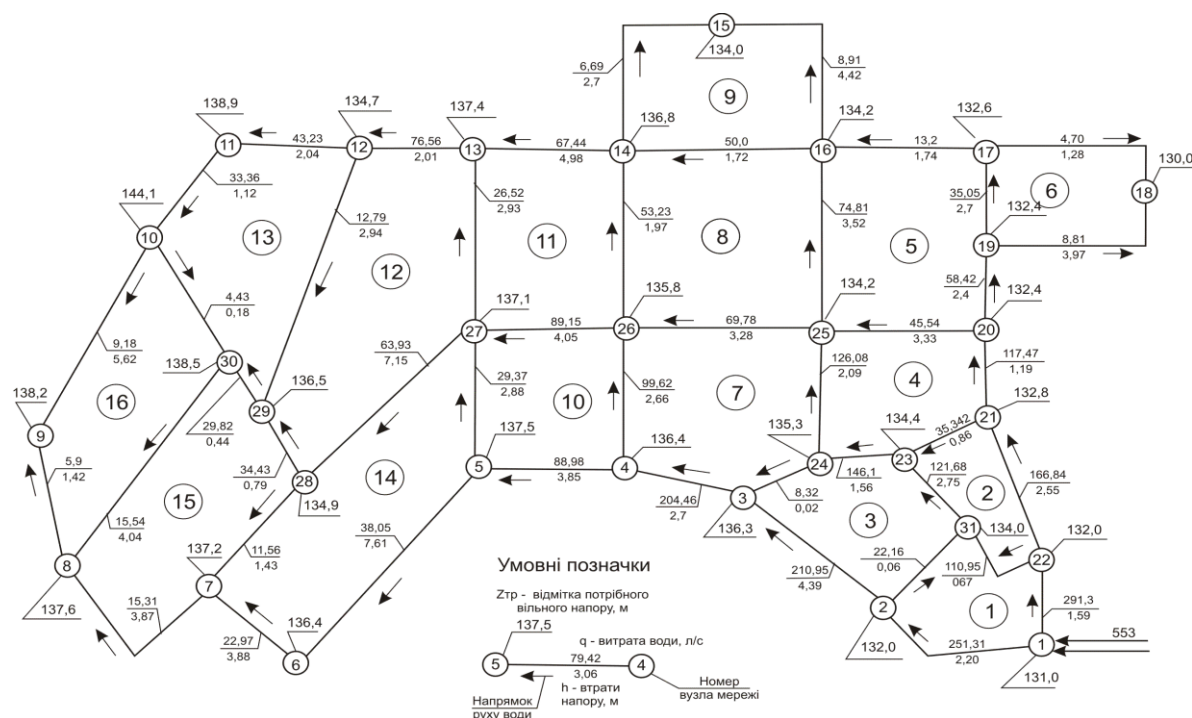


Рис. 1. Розрахункова схема безбаштової водопровідної мережі при водоспоживанні $Q_{max} = 553$ л/с
Fig. 1. Estimated scheme of the towerless water supply network at water consumption $Q_{max} = 553$ l/s

Для визначення добового енергоспоживання в системі потрібно знати як протягом доби будуть змінюватись витрата і напір підібраних насосів, тому гідравлічний розрахунок кільцевої водопровідної мережі виконують для кожної години доби. Сучасне програмне забезпечення дозволяє здійснювати такі обчислення.

Як бачимо з рис. 1, диктуючою точкою на мережі є вузол 10, для якого потрібна найбільша п'езометрична відмітка (144,1 м) та спостерігаються великі втрати напору мережею на шляху транспортування води від точки підключення водоводів ($h_M = 24,29$ м). Знаючи напрямок руху води ділянками мережі та втрати напору на них, визначають фактичні п'езометричні відмітки в усіх інших вузлах мережі $Z_{п,j}$ та надлишкові тиски в них $\Delta H_{j,i}$.

Вихідними даними для розрахунку величини потрібного напору у насосів $H_{п,i}$ є: відмітка мінімального рівня води в резервуарі $Z_H = 98,0$ м; гідравлічні опори в комунікаціях насосної установки

$S_K = 0,0000085$ (с/л)²м та водоводі $S_B = 0,00004218$ (с/л)²м.

Глибину води в резервуарі $h_{p,i}$ для кожної години обчислювали, враховуючи рівномірне надходження води в нього протягом доби витратою $Q_{п,i} = 433,5$ л/с та забір води, що дорівнює водоспоживанню в мережі $Q_{m,i}$. Поповнення чи спорожнення РЧВ за кожну годину доби $\Delta h_{p,i}$ визначали, прийнявши площу його поперечного перерізу у плані $\omega_p = 1600$ м². Глибини регулюючого об'єму води в ньому $h_{p,i}$ встановлювали методом послідовного додавання значень $\Delta h_{p,i}$. Втрати напору в мережі $h_{m,i}$ на шляху від точки під'єднання водоводів (вузол 1) до диктуючої точки для кожної години доби визначали за результатами гідравлічного розрахунку.

У годину найбільшого водоспоживання (година 7-8) при $Q_p = 553$ л/с сумарні втрати напору від всмоктувальних отворів насоса і до диктуючої точки (вузол 10):

$$\Sigma h = h_K + h_B + h_M = 39,8 \text{ м.}$$

В інші години доби ці втрати напору визначали за формулою

$$\sum h_i = s_{\kappa} Q_{m,i}^2 + s_{\kappa} Q_{m,i}^2 + h_{m,i}, \text{ м.} \quad (1)$$

Потрібні напори у насосів для кожної години доби обчислювали за формулою

$$H_{п,i} = Z_{п,д} - Z_{н} - h_{р,i} + \sum h_i, \text{ м.} \quad (2)$$

Дослідження показали (табл. 1), що значення потрібних напорів насоса $H_{п,i}$ протягом доби змінюються в межах від 52,95 до 84,62 м, залежно від обсягів водоспоживання та подачі насоса.

Таблиця 1. Результати розрахунку сумісної роботи одного насоса Д 2000-100 (20Д-6) і безбаштової водопровідної мережі

Table 1. The results of the calculation joint work one pump Д 2000-100 (20Д-6) and towerless water network

Години доби	$Q_{m,i}$, л/с	$H_{п,i}$, м	$D = 855 \text{ мм}; n = \text{const}$			$D_{об} = 806 \text{ мм}; n = \text{const}$			$D_{об} = 806 \text{ мм}; \text{ зміна } n$	
			$H_{п,i}$, м	ΔH_i , м	N_i , кВт.год	$H_{п,i}$, м	ΔH_i , м	N_i , кВт.год	$n_{рег,i}$, об/хв	N_i , кВт.год
0-1	285,1	56,00	114,90	58,90	549,22	101,46	45,46	470,37	737	310,41
1-2	277,8	55,12	115,21	60,09	544,03	101,77	46,65	465,88	730	302,56
2-3	251,8	52,95	116,24	63,29	525,04	102,80	49,85	449,45	710	278,90
3-4	261,1	53,17	115,89	62,72	531,93	102,44	49,27	455,41	714	285,09
4-5	369,3	61,76	110,77	49,01	605,17	97,33	35,57	518,80	794	387,00
5-6	458,8	71,32	105,21	33,89	658,58	91,77	20,45	565,01	873	491,77
6-7	519,1	79,06	100,79	21,73	691,91	87,35	8,29	593,86	932	573,86
7-8	553,0	84,62	98,06	13,44	709,88	84,62	0,00	609,41	970	627,69
8-9	510,8	78,41	101,43	23,02	687,43	87,99	9,58	589,98	926	564,18
9-10	551,4	84,20	98,20	14,00	709,04	84,75	0,55	608,68	968	624,38
10-11	490,0	76,14	102,99	26,85	676,06	89,55	13,41	580,14	908	537,36
11-12	473,4	74,18	104,19	30,01	666,83	90,75	16,57	572,15	892	515,67
12-13	444,2	70,77	106,20	35,43	650,22	92,76	21,99	557,78	865	478,52
13-14	420,3	68,09	107,75	39,66	636,25	94,31	26,22	545,69	844	449,40
14-15	421,3	68,17	107,69	39,52	636,84	94,24	26,07	546,20	844	450,46
15-16	446,3	70,98	106,06	35,08	651,43	92,62	21,64	558,82	867	480,99
16-17	460,9	72,74	105,07	32,33	659,77	91,62	18,88	566,05	881	499,72
17-18	496,2	77,21	102,53	25,32	679,47	89,09	11,88	583,09	915	547,09
18-19	494,2	77,09	102,68	25,59	678,37	89,24	12,15	582,14	914	544,97
19-20	510,8	79,40	101,43	22,03	687,43	87,99	8,59	589,98	930	568,72
20-21	444,2	71,28	106,20	34,92	650,22	92,76	21,48	557,78	868	480,79
21-22	477,5	75,31	103,90	28,59	669,12	90,46	15,15	574,13	899	523,91
22-23	417,2	68,36	107,95	39,59	634,41	94,50	26,14	544,10	844	448,39
23-24	369,3	63,39	110,77	47,38	605,17	97,33	33,94	518,80	803	394,00
Всього	10404,0				15393,83			13203,70		11365,83

На рис. 2 наведено графічну залежність $H_{п,i} = f(Q_{п,i})$. При підборі насосів можна розглянути кілька варіантів:

1) працює один насос з постійною ($n = \text{const}$) або перемінною частотою обертів робочого колеса;

2) працює група із різних насосів, кожен з яких працює самостійно при відповідних величинах водоспоживання з мережі;

3) працює група з однакових насосів; кількість працюючих насосів вибирається залежно від розмірів водоспоживання; насоси можуть працювати з постійною або перемінною частотою обертів робочого колеса; регулюватись може один або кілька насосів.

Споживану потужність та аналітичні параметри характеристик $Q-H$ і $Q-N$ на-

сосних агрегатів визначали, користуючись залежностями з літературних джерел [18, 19].

Розглянемо такі можливі варіанти забезпечення споживачів водою.

1 варіант. Працює один насос марки Д2000-100 з $D_{\kappa} = 855 \text{ мм}$ і $n_{\kappa} = 970 \text{ об/хв.}$, у якого аналітичні параметри характеристик $Q-H$ і $Q-N$ мають значення:

$$H_{\phi} = 121; S_{\phi} = 0,000075; A = 179,77; \\ B = 16,966; \alpha = 0,545.$$

При максимальній витраті води $Q_{m,i} = 553 \text{ л/с}$, що здійснюється в годину (7-8), цей насос має напір $H_{п,i} = 98,06 \text{ м}$, що перевищує потрібний напір у цю годину ($H_{п,i} = 84,62 \text{ м}$) на $\Delta H = 13,44 \text{ м}$.

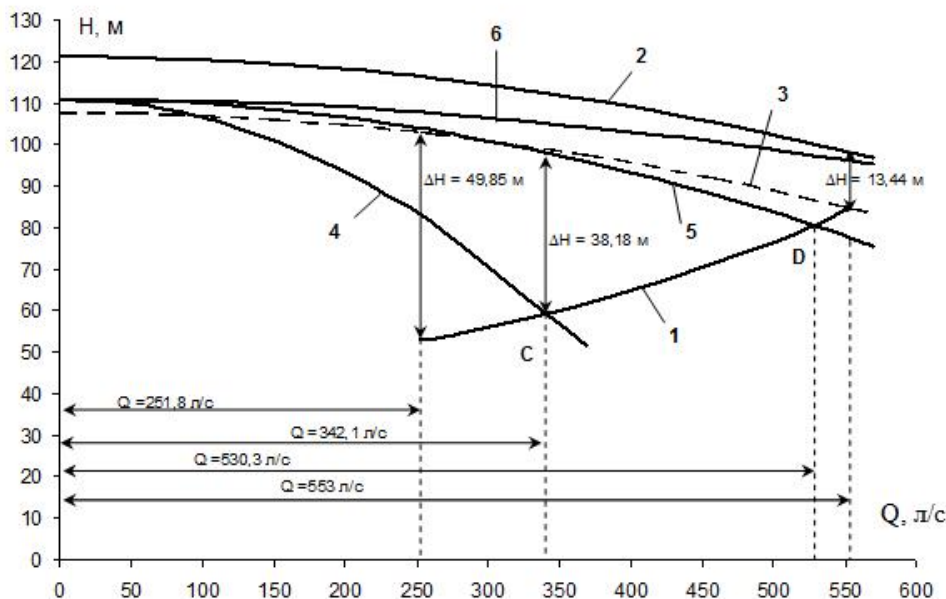


Рис. 2. Графіки Q - H насосів і безбаштової водопровідної системи: 1 – графік залежності $H_{п.і} = f(Q_{м.і})$; 2 – гідравлічна характеристика Q - H насоса Д2000-100 з $D_k = 855$ мм і $n_k = 970$ об/хв.; 3 – те саме, з $D_{об} = 806$ мм; 4 – гідравлічна характеристика Q - H одного насоса Д220-90 з $D_k = 546$ мм і $n_k = 1450$ об/хв.; 5 – те саме, двох паралельно працюючих насосів; 6 – те саме, трьох паралельно працюючих насосів

Fig. 2. Graphs of Q - H pumps and towerless water supply system: 1 – graph of dependence $H_{п.і} = f(Q_{м.і})$; 2 – hydraulic characteristics of Q - H pump Д2000-100 with $D_k = 855$ mm and $n_k = 970$ rpm; 3 – the same, with $D_{об} = 806$ mm; 4 – hydraulic characteristics Q - H of one pump Д220-90 with $D_k = 546$ mm and $n_k = 1450$ rpm; 5 – the same, two parallel running pumps; 6 – the same, three parallel running pumps

У табл. 1 наведено результати розрахунку сумісної роботи такого насоса і безбаштової водопровідної системи для випадків, коли насос не регулюється, регулюється обточуванням робочого колеса та зміною частоти обертів робочого колеса для досягнення рівності $H_{п.і} = H_{п.і}$.

Діаметр обточеного робочого колеса

$$D_{об} = 855 \sqrt{\frac{121 - 13,44}{121}} = 806 \text{ мм.}$$

У такого насоса параметри аналітичних характеристик:

$$H_{\phi} = 107,56; S_{\phi} = 0,000075; A = 150,66; B = 14,68; \alpha = 0,545.$$

Як показали дослідження (табл. 1), обточування робочого колеса дозволяє економити витрати електроенергії обсягом $\Delta N = 2190,13$ кВт.год/добу, що становить 14,2 %.

При регулюванні роботи насоса частота обертів робочого колеса $n_{рег.і}$ і витрата електроенергії за кожен годину доби:

$$n_{рег.і} = 970 \sqrt{\frac{107,56 - \Delta H_i}{107,56}}, \text{ об/хв.};$$

$$N_i = 1,03 \left[150,66 \left(\frac{n_{рег.і}}{970} \right)^2 + 14,68 \left(\frac{n_{рег.і}}{970} \right)^{1,455} Q_{pi}^{0,545} \right], \text{ Вт} \cdot \text{год.},$$

Результати розрахунків свідчать, що при регулюванні насоса додаткова економія витрат електроенергії складає $\Delta N = 1837,88$ кВт.год/добу, що становить 13,9 %.

2 варіант. Паралельно працює група однотипних насосів марки Д220-90 з $D_k = 546$ мм і $n_k = 1450$ об/хв. Один працюючий насос має такі параметри Q - H і Q - N характеристик:

$$H_{\phi} = 110,8; S_{\phi,1} = 0,000435;$$

$$A_1 = 81,316; B_1 = 1,928; \alpha = 0,833.$$

Подача одного насоса

$$Q_{н1, макс} = \sqrt{\frac{110,8 - 84,62}{0,000435}} = 245,3 \text{ л/с,}$$

а необхідна кількість насосів

$$v = 553 / 245,3 = 2,25,$$

тобто потрібно встановити 3 насоси.

У табл. 2 наведено результати розрахунків сумісної роботи безбаштової водопровідної мережі і насосів марки Д220-90 для випадків, коли частота обертів робочого колеса не регулюється та регулюється у одного з насосів.

Таблиця 2. Результати розрахунку сумісної роботи однотипних паралельно працюючих насосів Д220-90 і безбаштової водопровідної мережі

Table 2. The results of the calculation joint work of the same type parallel pumps Д220-90 and towerless water network

Години доби	$Q_{м,i}$, л/с	$Q_{н1,i}$, л/с	v , шт	Частота обертів не регулюється			Частота обертів регулюється у одного насоса			
				$H_{н,i}$, м	ΔH_i , м	N_i , кВт.год	$n_{рег,i}$, об/хв	$Q_{р1,i}$, л/с	$Q_{н,i}$, л/с	N_i , кВт.год
0-1	285,1	354,93	1	75,44	19,44	295,17	1317	285,1	0,00	265,88
1-2	277,8	357,77	1	77,23	22,11	290,60	1297	277,8	0,00	256,35
2-3	251,8	364,68	1	83,22	30,27	274,15	1236	251,8	0,00	225,75
3-4	261,1	363,98	1	81,14	27,97	280,07	1254	261,1	0,00	235,35
4-5	369,3	335,76	2	95,97	34,21	460,49	1087	33,54	335,76	399,90
5-6	458,8	301,26	2	87,91	16,59	519,50	1248	157,54	301,26	480,13
6-7	519,1	270,12	2	81,50	2,44	558,17	1418	248,98	270,12	557,69
7-8	553,0	245,32	3	96,02	11,40	690,09	1280	62,35	490,65	658,94
8-9	510,8	272,87	2	82,43	4,02	552,89	1398	237,93	272,87	546,99
9-10	551,4	247,28	3	96,10	11,90	689,02	1275	56,83	494,57	656,69
10-11	490,0	282,27	2	84,69	8,55	539,61	1342	207,73	282,27	519,74
11-12	473,4	290,14	2	86,43	12,25	528,94	1298	183,26	290,14	499,39
12-13	444,2	303,35	2	89,34	18,57	510,02	1227	140,85	303,35	467,32
13-14	420,3	313,34	2	91,59	23,50	494,38	1177	106,96	313,34	444,25
14-15	421,3	313,05	2	91,50	23,33	495,03	1179	108,25	313,05	445,12
15-16	446,3	302,56	2	89,14	18,16	511,39	1232	143,74	302,56	469,41
16-17	460,9	295,79	2	87,70	14,96	520,86	1267	165,11	295,79	485,17
17-18	496,2	277,88	2	84,02	6,81	543,58	1363	218,32	277,88	528,80
18-19	494,2	278,38	2	84,24	7,15	542,30	1359	215,82	278,38	526,53
19-20	510,8	268,67	2	82,43	3,03	552,89	1411	242,13	268,67	550,36
20-21	444,2	301,41	2	89,34	18,06	510,02	1233	142,79	301,41	468,40
21-22	477,5	285,63	2	86,00	10,69	531,58	1316	191,87	285,63	506,02
22-23	417,2	312,35	2	91,87	23,51	492,34	1178	104,85	312,35	442,49
23-24	369,3	330,13	2	95,97	32,58	460,49	1103	39,17	330,13	402,00
Всього	10404					11843,55				11038,68

При паралельній роботі однотипних насосів параметри $H_{ф}$ і α не змінюються, а параметри $S_{ф}$, A і B залежать від кількості одночасно працюючих насосів.

При роботі двох насосів:

$$S_{ф,2} = 0,00010875; A_2 = 162,632; B_2 = 2,165.$$

При роботі трьох насосів:

$$S_{ф,3} = 0,00004833; A_3 = 243,948; B_3 = 2,316.$$

На рис. 2 показано гідравлічні характеристики $Q-H$ (графіки 4, 5 і 6) при роботі відповідно одного, двох чи трьох насосів. Абсциси точок перетину графіків 1 і 4 (точка C) та 1 і 5 (точка D) визначають величину максимальної витрати водоспоживання в мережі, яка забезпечується відповідно одним та двома насосами. Після сумісного розв'язання рів-

нянь, що описують ці графіки, отримали координати точок:

а) для C : $Q_{м,C} = 342,1$ л/с; $H_{п,C} = 59,89$ м;

б) для D : $Q_{м,D} = 530,3$ л/с; $H_{п,D} = 80,22$ м.

Отже, в інтервалі витрат із водопровідної мережі від 251,8 до 342,1 л/с повинен працювати один насос; від 342,1 до 530,3 л/с будуть працювати два насоси, а при $Q_{м} > 530,3$ л/с – три насоси. У момент включення другого насоса при досягненні витрати 342,1 л/с надлишковий напір ΔH становитиме 38,18 м (рис. 2).

Вимогу, при якій напори насосів у будь-яку годину доби відповідають потрібним значенням, досягли регулюван-

ням одного насоса зміною частоти обертів колеса.

Коли насоси не регулюються, то добове споживання електроенергії на подачу розрахункових витрат води при наміченому режимі роботи насосів становить $N_{\text{доб.1}} = 11843,55$ кВт·год. При зміні частоти обертів робочого колеса у одного з трьох паралельно працюючих насосів добове споживання електроенергії зменшується до $N_{\text{доб.2}} = 11038,68$ кВт·год. Отже економія становить $\Delta N = 804,87$ кВт·год або 6,8 %.

Баштова схема водопостачання

Для можливості порівняння результатів розрахунку систем водопостачання з різними схемами перетворимо безбаштову водопровідну мережу (рис. 1), в мережу з контррезервуаром, залишивши без змін діаметри труб, а отже, і гідравлічні опори ділянок мережі. Розрахункову схему такої мережі показано на рис. 3,

а графік водоспоживання з неї – на рис. 4. Водонапірна башта розміщена на відстані 200 м від вузла 10 та з'єднана з ним трубопроводом діаметром 250 мм. Результати розрахунку такої системи наведено в табл. 3.

Аналізуючи обсяги водоспоживання (рис. 4), приймаємо двоступеневий графік роботи насосів: протягом 6 годин роботи першої ступені (години 23-5) середня подача насосів становить $Q_{\text{н.1}} = 302,4$ л/с; протягом 18 годин роботи другої ступені (години 6-22) $Q_{\text{н.2}} = 477,2$ л/с.

Прийнявши для розрахунків значення площ водонапірної башти $\omega_6 = 78,5$ м², а РЧВ $\omega_p = 1600$ м², визначаємо величини їх поповнення чи спорожнення та глибин води в них (відповідно, $h_{\text{б.і}}$ та $h_{\text{р.і}}$) впродовж доби.

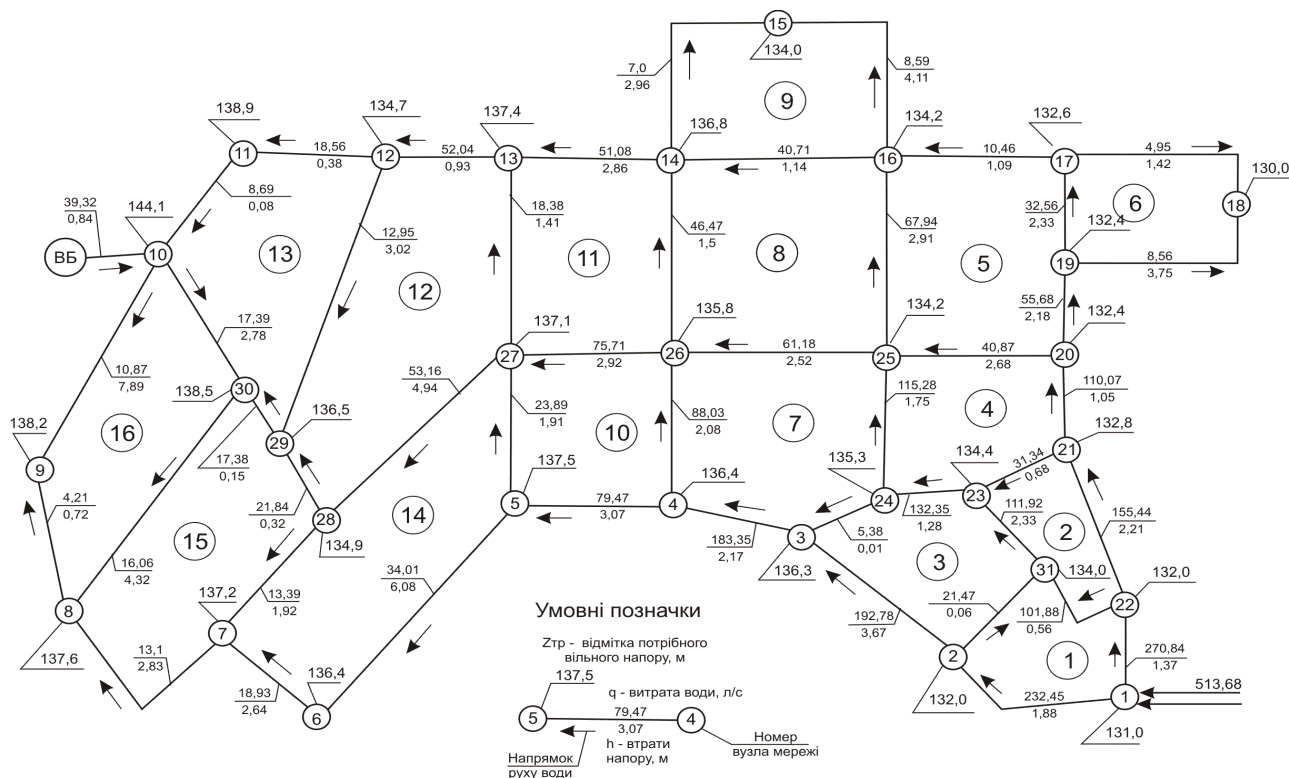


Рис. 3. Розрахункова схема водопровідної мережі з контррезервуаром при водоспоживанні $Q_{\text{max}} = 553$ л/с і фактичній подачі насосів $Q_{\text{н}} = 513,68$ л/с

Fig. 3. The calculated scheme of the water supply network with a counter-tank at water consumption $Q_{\text{max}} = 553$ l/s and the actual supply of pumps $Q_{\text{н}} = 513.68$ l/s

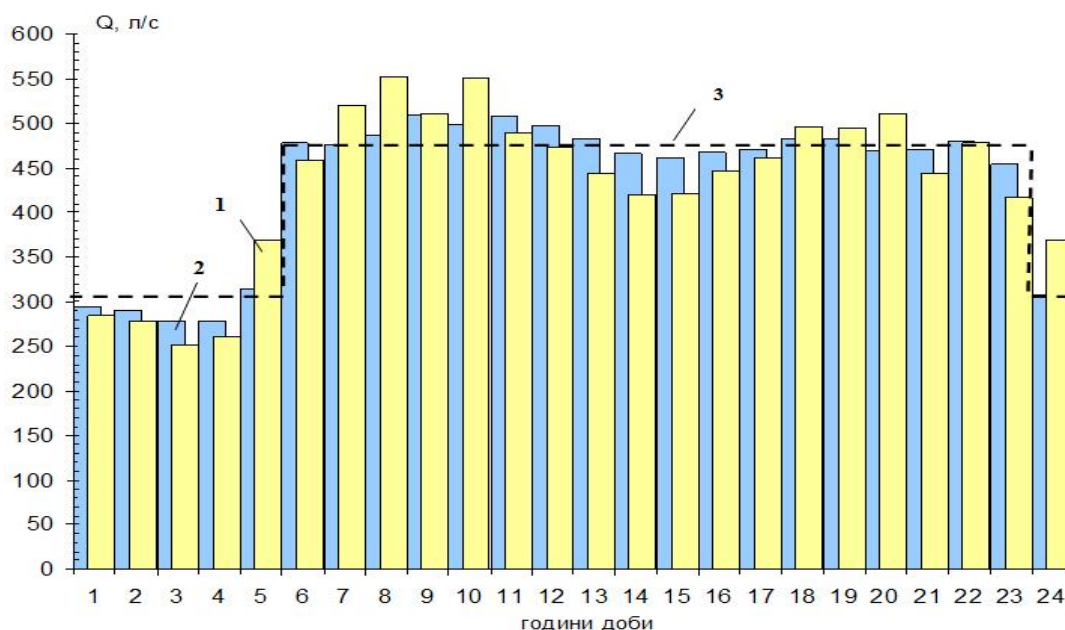


Рис. 4. Сумісні графіки водоспоживання і роботи насосів: 1 – графік водоспоживання; 2 – фактичний графік роботи насосів сумісно з мережею та резервуарами; 3 – намічений графік роботи насосів

Fig. 4. Compatible schedules of water consumption and operation of pumps: 1 – schedule of water consumption; 2 – the actual schedule of pumps in conjunction with the network and tanks; 3 – the planned schedule of work of pumps

Таблиця 3. Показники сумісної роботи насосів і водопровідної мережі з контррезервуаром протягом доби максимального водоспоживання при наміченому і фактичному графіках роботи насосів

Table 3. Indicators of joint operation pumps and water supply network with the counter-tank during the day of maximum water consumption with the planned and actual schedules of pumps

Години	$Q_{м.і}, л/с$	$Q_{н.і}, л/с$	$h_{р.і}, м$	$h_{б.і}, м$	$H_{п.і}, м$	$N_{і}, кВт.год$	$Q_{н.і}, л/с$	$h_{р.і}, м$	$h_{б.і}, м$	$H_{р.і}, м$	$N_{і}, кВт.год$
0-1	285,1	302,4	0,59	7,81	58,87	229,7	294,2	0,60	6,39	55,92	226,3
1-2	277,8	302,4	0,88	8,94	59,40	229,7	290,9	0,92	6,99	56,03	224,9
2-3	251,8	302,4	1,18	11,26	62,73	229,7	278,3	1,27	8,20	56,31	219,7
3-4	261,1	302,4	1,47	13,15	61,03	229,7	278,9	1,61	9,02	57,17	220,0
4-5	369,3	302,4	1,77	10,08	51,45	229,7	314,8	1,88	6,52	57,64	234,8
5-6	458,8	477,2	1,67	10,93	76,29	463,4	478,6	1,78	7,43	54,87	464,3
6-7	519,1	477,2	1,57	9,01	70,07	463,4	476,9	1,68	5,49	55,89	463,2
7-8	553,0	477,2	1,47	5,53	69,50	463,4	487,4	1,56	2,48	54,05	469,7
8-9	510,8	477,2	1,38	3,99	70,56	463,4	509,1	1,39	2,41	51,16	483,5
9-10	551,4	477,2	1,28	0,59	82,72	463,4	498,9	1,24	0,00	51,25	477,0
10-11	490,0	477,2	1,18	0,00	72,72	463,4	507,3	1,08	0,79	48,99	482,4
11-12	473,4	477,2	1,08	0,17	75,02	463,4	497,9	0,93	1,92	49,95	476,3
12-13	444,2	477,2	0,98	1,69	79,37	463,4	481,7	0,82	3,63	51,22	466,1
13-14	420,3	477,2	0,88	4,30	84,22	463,4	465,9	0,75	5,73	53,04	456,5
14-15	421,3	477,2	0,79	6,86	84,10	463,4	461,0	0,69	7,55	55,21	453,6
15-16	446,3	477,2	0,69	8,28	79,30	463,4	467,3	0,61	8,51	57,09	457,3
16-17	460,9	477,2	0,59	9,03	77,07	463,4	470,1	0,53	8,93	58,13	459,0
17-18	496,2	477,2	0,49	8,15	72,59	463,4	482,1	0,42	8,28	58,63	466,4
18-19	494,2	477,2	0,39	7,37	72,95	463,4	482,9	0,31	7,76	58,10	466,9
19-20	510,8	477,2	0,29	5,83	89,88	463,4	468,6	0,23	5,83	57,69	458,1
20-21	444,2	477,2	0,20	7,35	80,16	463,4	469,8	0,15	7,00	55,83	458,9
21-22	477,5	477,2	0,10	7,33	75,46	463,4	479,3	0,05	7,09	57,09	464,7
22-23	417,2	477,2	0,00	10,08	85,79	463,4	453,8	0,00	8,77	57,27	449,3
23-24	369,3	302,4	0,29	7,02	66,44	229,7	308,2	0,28	5,97	59,00	232,1
24-25										55,92	
Всього	10404	10404				9719,2	10404				9731,3

Відмітка мінімального рівня води у башті при наміченому графіку роботи насосів:

$$Z_{6,\min} = 138,2 + 9,49 + 2,9 = 150,6 \text{ м.}$$

Висота башти від поверхні землі до мінімального рівня води:

$$H_6 = Z_{6,\min} - Z_{3,6} = 150,6 - 125,3 = 25,3 \text{ м.}$$

Регулюючі об'єми води в баку башти $W_6 = 13,15 \cdot 78,5 = 1032,2 \text{ м}^3$ і резервуарі $W_p = 1,77 \cdot 1600 = 2832 \text{ м}^3$.

Середній напір насосів:

для першої ступені $H_{н.1,ср} = 60,0 \text{ м}$;

для другої ступені $H_{2,ср} = 77,7 \text{ м}$.

Аналізуючи отримані результати, можна розглянути варіант, коли встановлюються різні насоси для кожної ступені наміченого графіка їх роботи. У період з 23 до 6 години працює один насос Д1250-65 з $n_k = 1450 \text{ об/хв}$ і $D_k = 460 \text{ мм}$, що має параметри $Q-H$ і $Q-N$ характеристик: $H_\phi = 76,5$; $S_\phi = 0,0001$; $A = 104,8$; $B = 0,413$ і $\alpha = 1,0$.

У період з 6 до 23 години працює один насос Д1600-90 з $n_k = 1450 \text{ об/хв}$ і $D_k = 540 \text{ мм}$, що має параметри:

$H_\phi = 107,3$; $S_\phi = 0,000088$; $A = 301,83$; $B = 0,00218$ і $\alpha = 1,818$.

Добове споживання електроенергії на подачу розрахункових витрат води при наміченому режимі роботи насосів становить $N = 9719,2 \text{ кВт}\cdot\text{год}$.

Однак фактична подача насоса у кожну годину доби відрізняється від наміченої за графіком і визначається за формулою

$$Q_{н,i} = \sqrt{\frac{H_\phi - H_{г,i} - h_{м,i}}{S_k + S_\phi + S_\phi}}, \text{ л/с,} \quad (3)$$

у якій невідомими є геометрична висота водопідйому $H_{г,i}$ та втрати напору в мережі $h_{м,i}$, які, залежать від подачі насоса $Q_{н,i}$.

Задача вирішується методом поступового наближення до значень, коли геометрична висота водопідйому на початок даної та наступної доби збігаються. Результати цих розрахунків наведено у табл. 3, звідки видно, що фактична пода-

ча насоса Д1250-65 коливається в межах від 278,3 до 314,8 л/с, а насоса Д1600-90 – від 453,8 до 509,1 л/с.

Добове споживання електроенергії на подачу розрахункових витрат води при такому режимі роботи насосів становить $N = 9731,3 \text{ кВт}\cdot\text{год}$.

Потрібна геометрична висота водопідйому між найнижчими рівнями регулюючих запасів води в баку башти і резервуарі

$$H_{тр} = Z_{6,\min} - Z_{p,\min}, \text{ м,} \quad (4)$$

де $Z_{6,\min}$ і $Z_{p,\min}$ – мінімальні відмітки, відповідно, башти і резервуара.

У результаті розрахунку п'єзометричних відміток в усіх вузлах мережі протягом доби встановлено, що диктуючою точкою на мережі у години (6-7), (7-8), (9-10) та (19-20) буде вузол 9, а в інші години доби – вузол 10. Мінімальною відмітка в башті буде в годину (9-10), що дорівнює $Z_{6,\min} = 148,12 \text{ м}$.

Отже $H_{тр} = 148,12 - 98 = 50,12 \text{ м}$.

Висота башти від поверхні землі до мінімального рівня регулюючого об'єму

$$H_6 = Z_{6,\min} - Z_3 = 148,12 - 125,3 = 22,82 \text{ м,}$$

а потрібні регулюючі об'єми води в баку башти $W_6 = 9,02 \cdot 78,5 \approx 708 \text{ м}^3$ і резервуарі $W_p = 1,88 \cdot 1600 = 3008 \text{ м}^3$.

При порівнянні результатів розрахунку водопровідної системи за наміченим і фактичним графіком роботи насосних агрегатів бачимо, що існують суттєві відмінності, що дають змогу знизити вартість капітального будівництва контррезервуара:

а) висота водонапірної башти зменшується на 2,48 м;

б) регулюючий об'єм води у баку башти зменшується на $324,2 \text{ м}^3$, тобто на 31 %.

Порівнюючи між собою варіанти живлення розглянутої водопровідної мережі при наявності на мережі водонапірної башти та без неї, бачимо, що для мережі з контррезервуаром добова витрата електроенергії зменшується порівняно з безбаштовими системами в середньому на

20-25%, якщо насоси не регулюються, та на 12-14% – при їх регулюванні. Крім того, мережа з контррезервуаром має вищу ступінь надійності водозабезпечення споживачів під необхідним напором. Разом з тим, спорудження водонапірної башти збільшує будівельну вартість системи. Тому остаточне рішення повинно прийматись тільки на основі техніко-економічних розрахунків можливих варіантів з урахуванням вимог надійності водозабезпечення.

Для малих населених пунктів, віддалених від існуючих централізованих систем водопостачання, можна розглянути два альтернативних варіанти водозабезпечення. Згідно з першим, до даного населеного пункту можна прокласти водовід, який з'єднає споживачів з діючою централізованою системою водопостачання сусіднього міста. За другим варіантом, при наявності власних джерел водопостачання, навіть з підвищеним вмістом заліза в підземних водах, можна запроектувати локальний водопровід з використанням гідроавтоматичної установки для знезалізнення води [20], яка забезпечує високу якість очищення та зручна в експлуатації, оскільки у ній досягається повна автоматизація роботи, що не вимагає кваліфікованого обслуговуючого персоналу. Використовуючи імітаційне моделювання сумісної роботи споруд та порівнюючи капітальні й експлуатаційні затрати за розглянутими варіантами, підбирають економічно доцільну схему водопостачання.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Застосовуючи метод імітаційного моделювання роботи гідравлічно взаємодіючих споруд, можна досліджувати і аналізувати показники енергоспоживання в системі водопостачання за різними альтернативними варіантами подачі розрахункових витрат води у водопровідну мережу для потреб споживачів. Це дає змогу встановити найбільш доцільну з економічної точки зору схему водозабезпечення, підібрати необхідне облад-

нання та призначити енергозберігаючі режими експлуатації споруд. Зниження енергоспоживання дозволяє скоротити експлуатаційні витрати на комунальних підприємствах та зменшити собівартість води.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Arregui F. J., Cobacho R., Soriano J., Jimenez-Redal R.** Calculation proposal for the economic level of apparent losses (ELAL) in a water supply system. *Water*, 2018, 10(12), 1809.
2. **Silva M. A., Amado C., Loureiro D.** Propagation of uncertainty in the water balance calculation in urban water supply systems – A new approach based on high-density regions. *Measurement*, 126, October 2018, 356-368.
3. **Wu G. Z., Sakaue K., Murakawa S.** Verification of calculation method using Monte Carlo method for water supply demands of office building. *Water*, 2017, 9(6), 376.
4. **Wang L., Wu J.-H., Yang D.-M., Gao J., Liu Y.-M.** Study on Protection and Pump-stopping Water Hammer Calculation of Water Supply Project for Xin'an Pump Station. *Water Resources and Power*, 2018, 1. URL: https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-SDNY201801044.htm
5. **Shcherbakov V. I., Nguyen H. C.** The energy equivalence principle for calculation of water supply networks with many areas. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 2016, 4, 27-34. URL: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches/article/view/15319>
6. **Хоружий П. Д., Хомуцька Т. П., Хоружий В. П.** Ресурсозберігаючі технології водопостачання. К.: Аграрна наука, 2008. 534 с.
7. **Петросов В. А.** Устойчивость водоснабжения. Х.: Фактор, 2007. 360 с.
8. **Хомуцька Т. П.** Шляхи забезпечення ефективної роботи підприємств водопостачання // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 25. К.: КНУБА, 2015, 273-278.
9. **Vakilifard N., Anda M., Bahri P. A., Ho G.** The role of water-energy nexus in optimizing water supply systems – Review of techniques and approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 82(1), 2018, 1424-1432.
10. **Lam K. L., Kenway S. J., Lant P. A.** Energy use for water provision in cities. *Journal of Cleaner Production*, 143, 2017, 699-709.

11. **Qun M., Wang J., Liu C.** Energy-Saving Optimization of Water Supply Pumping Station Life Cycle Based on BIM Technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 100, 012201.
12. **De Marchis M., Milici B., Volpe R., Messineo A.** Energy saving in water distribution network through pump as turbine generators: economic and environmental analysis. *Energies*, 2016, 9(11), 877.
13. **Guo X.** Energy-saving Technology Application in Building Water Supply and Drainage Construction. *Journal of World Architecture*, 2019, 3(6).
14. **Shi H., You F.** Energy optimization of water supply system scheduling: Novel MINLP model and efficient global optimization algorithm. *AIChE Journal*, 2016, 62(12), 4277-4296.
15. **Zhou Y., Lee E. W. M., Wong L. T., Mui K. W.** Modeling Study of Design Flow Rates for Cascade Water Supply Systems in Residential Skyscrapers. *Water*, 2019, 11(12), 2580.
16. **Duan H.-F., Pan B., Wang M., Chen L., Zheng F., Zhang Y.** State-of-the-art review on the transient flow modeling and utilization for urban water supply system (UWSS) management. *Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua* jws2020048, 2020.
17. **Zhang S., Yang J., Wan Z., Yi Y.** Multi-water source joint scheduling model using a refined water supply network: Case study of Tianjin. *Water*, 2018, 10(11), 1580.
18. **Хомуцька Т. П.** Енергоощадне водопостачання. К: Аграрна наука, 2016. – 304 с.
19. **Хоружий П. Д.** Расчет гидравлического взаимодействия водопроводных сооружений. Львов: Вища школа, 1983. – 152 с.
20. **Хомуцька Т., Хоружий В., Андрєв В., Нор В.** Очистка природних і доочищення стічних вод на гідроавтоматичній установці в локальних водопроводах // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2019, 32, 51-58.

REFERENCES

1. **Arregui, F., Cobacho, R., Soriano, J., & Jimenez-Redal, R. (2018).** Calculation proposal for the economic level of apparent losses (ELAL) in a water supply system. *Water*, 10(12), 1809. doi: 10.3390/w10121809
2. **Silva, M. A., Amado, C., & Loureiro, D. (2018).** Propagation of uncertainty in the water balance calculation in urban water supply systems – A new approach based on high-

- density regions. *Measurement*, 126, 356-368. doi: 10.1016/j.measurement.2018.05.061
3. **Wu, G. Z., Sakaue, K., & Murakawa, S. (2017).** Verification of calculation method using Monte Carlo method for water supply demands of office building. *Water*, 9(6), 376. doi: 10.3390/w9060376
4. **Wang, L., Wu, J.-H., Yang, D.-M., Gao, J., & Liu, Y.-M. (2018).** Study on Protection and Pump-stopping Water Hammer Calculation of Water Supply Project for Xin'an Pump Station. *Water Resources and Power*, 1. Retrieved from: https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotalsDNY201801044.htm
5. **Shcherbakov, V. I., & Nguyen, H. C. (2016).** The energy equivalence principle for calculation of water supply networks with many areas. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 4, 27-34. Retrieved from: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches/article/view/15319>
6. **Khoruzhyy, P. D., Khomutetska, T. P., & Khoruzhyy, V. P. (2008).** *Resursozberihayuchi tekhnolohiyi vodopostachannya*. Kyiv: Ahrarna nauka, 534. [in Ukrainian].
7. **Petrosov, V. A. (2007).** *Ustoychivost' vodosnabzheniya*. Kharkiv: Faktor, 360. [in Russian].
8. **Khomutetska, T. P. (2015).** Shlyakhy zabezpechennya efektyvnoyi roboty pidpryemstv vodopostachannya. *Problems of water supply, sewerage and hydraulic*, 25, 273-278. [in Ukrainian].
9. **Vakilifard, N., Anda, M., Bahri, P. A., & Ho, G. (2018).** The role of water-energy nexus in optimising water supply systems – Review of techniques and approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 82(1), 1424-1432. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.125
10. **Lam, K. L., Kenway, S. J., & Lant, P. A. (2017).** Energy use for water provision in cities. *Journal of Cleaner Production*, 143, 699-709. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.056
11. **Qun, M., Wang, J., & Liu, C. (2017).** Energy-Saving Optimization of Water Supply Pumping Station Life Cycle Based on BIM Technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 100, 012201. doi: 10.1088/1755-1315/100/1/012201
12. **De Marchis, M., Milici, B., Volpe, R., & Messineo, A. (2016).** Energy saving in water distribution network through pump as turbine generators: economic and environmental analy-

sis. *Energies*, 9(11), 877. doi: 10.3390/en9110877

13. Guo, X. (2019). Energy-saving Technology Application in Building Water Supply and Drainage Construction. *Journal of World Architecture*, 3(6). doi: 10.26689/jwa.v3i6.938

14. Shi, H., & You, F. (2016). Energy optimization of water supply system scheduling: Novel MINLP model and efficient global optimization algorithm. *AIChE Journal*, 62(12), 4277-4296. doi: 10.1002/aic.15332

15. Zhou, Y., Lee, E. W. M., Wong L. T., & Mui, K. W. (2019). Modeling Study of Design Flow Rates for Cascade Water Supply Systems in Residential Skyscrapers. *Water*, 11(12), 2580. doi: 10.3390/w11122580

16. Duan, H.-F., Pan, B., Wang, M., Chen, L., Zheng, F., & Zhang, Y. (2020). State-of-the-art review on the transient flow modeling and utilization for urban water supply system (UWSS) management. *Journal of Water*

Supply: Research and Technology – Aqua jws2020048. doi: 10.2166/aqua.2020.048

17. Zhang, S., Yang, J., Wan, Z., & Yi, Y. (2018). Multi-water source joint scheduling model using a refined water supply network: Case study of Tianjin. *Water*, 10(11), 1580. doi: 10.3390/w10111580

18. Khomutetska, T. P. (2016). *Enerhooshchadne vodopostachannya*. Kyiv: Ahrarna nauka, 304. [in Ukrainian].

19. Khoruzhiy, P. D. (1983). *Raschet gidravlicheskogo vzaimodeystviya vodoprovodnykh sooruzheniy*. L'vov: Vishcha shkola, 152. [in Russian].

20. Khomutetska, T., Khoruzhiy, V., Andreyev, V., & Nor, V. (2019). Purification of natural and waste water using a hydro-automatic plant in local water supply systems. *Problems of water supply, sewerage and hydraulic*, 32, 51-58. doi: 10.32347/2524-0021.2019.32.51-58

Simulation modeling of water supply systems in order to save energy

Tetiana Khomutetska, Viktor Khoruzhiy, Julia Nedashkivska, Igor Nedashkovskiy, Victor Nor

Abstract. The water supply industry is one of the most energy-intensive, therefore, an urgent task today is to find methods for ensuring energy-efficient water supply to settlements and individual objects. Water supply systems are a complex of structures in interaction, therefore, a change in the operation of any one structure will certainly affect the performance of others and the entire water supply system as a whole. Nowadays, the majority of public utilities enterprises are characterized by high depreciation of fixed assets, primarily water supply networks, which is the cause of significant losses and secondary pollution of water. Changes in the norms and modes of water consumption in settlements lead to the creation of excessive pressures in the water supply system and an increase in its accident rate. At the same time, the operation of pumps is often outside the recommended application with low rates of efficiency, and therefore the specific power consumption for water supply in many regions of the country continues to remain at a high level. During operation, the characteristics of all structures of hydraulic interaction gradually change, which leads to the emergence of contradictions between the design and real operational indicators of the water supply system, the lack of supply of consumers with the required amount of water and pressure in the network. The situation can be improved by using rational schemes, energy-saving technologies and modern efficient equipment, materials and means on the way of transporting water from a water source to a consumer. It is possible to reduce the energy consumption in the system by applying the method of simulation modeling of the operation of hydraulically interacting structures, which allows one to study various options for supplying the estimated water flow rates, analyze the results obtained in terms of specific energy consumption and establish reasonable water supply schemes and energy-saving modes of operation of structures. The article provides an example of using this method.

Key words: water supply system; pumping station; water supply network; simulation modeling; energy saving

Стаття надійшла до редакції 28.11.2020