

УДК 628.11

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.010721.116.774

ПОШУК ТОЧОК ПРИЄДНАННЯ ДОДАТКОВИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ

ШАРКОВ В. В.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
НЕСТЕРОВА О. В.², канд. техн. наук, доц.,
ЖУРАВЛЬОВА О. А.³, ст. викл.,
ЖЕФРУА Д. В.⁴, маг.

^{1*} Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: Shar_kov@ukr_net, ORCID ID: 0000-0001-8942-3701

² Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 756-34-74, e-mail: nesterova.olena@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-1035-6572

³ Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 728-45-39, e-mail: zhuravlova.olena@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-4964-343X

⁴ Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна

Анотація. *Постановка проблеми.* Реконструкція систем водопостачання для забезпечення зростаючих потреб споживачів у воді – це складне, тривале та дороге завдання. Варіанти реконструкцій включають розширення існуючих водозабірних споруд або будівництво нових у будь-яких точках існуючої водопровідної мережі. Різноманіття варіантів супроводжується не тільки змінами витрат води на ділянках мережі, а й змінами в розподіленні потоків. Уведення додаткових джерел у склад існуючих систем водопостачання потребує детального вивчення факторів, які впливають на технічні характеристики систем та відповідають за економічну складову проекту. *Методика.* Проаналізовано вплив визначальних факторів на сумарні втрати напору розподільчої мережі під час реконструкції системи водопостачання. Запропоновано алгоритм пошуку оптимальних точок мережі для приєднання додаткового джерела живлення, який включає визначення оптимального поточкорозподілення та відповідних технічних змін для кожного з обраних варіантів; сумарної потужності насосних станцій та напорів; аналіз комплектації системи водопостачання за обраними варіантами; економічний аналіз капіталовкладень у будівництво для влаштування схеми системи водопостачання за певним варіантом та експлуатаційних витрат під час виконання робіт. *Результати.* Вибір оптимальних точок приєднання додаткових джерел живлення залежить від величини витрат води на ділянках мережі та поточкорозподілення. Доведено, що вузли кінцевих ділянок мережі найбільше відповідають умовам пошуку оптимальних точок та можуть жититися з різних напрямків залежно від величини додаткової витрати. За додаткової витрати води, не більшої за дві вузлові, сумарні втрати напору на ділянках мережі мінімальні. У разі надходження до кінцевого вузла додаткової витрати, більшої, ніж дві вузлові, спостерігається збільшення втрат напору, які можуть мати критичні значення залежно від збільшення витрати. Введення до мережі додаткових витрат води, які перевищують дві вузлові, вимагає використовувати як точки приєднання проміжні вузли мережі, розташовані на ділянках із більшою пропускнуною спроможністю. *Наукова новизна.* Проведено аналіз факторів, що впливають на вибір точок приєднання додаткових джерел живлення мережі водопостачання у разі її розширення. Аналіз точок проводився в обмежених діапазонах величини витрат води додаткового живлення – менших та рівних вузловим, удвічі та втричі більших за вузлову. Визначено шляхи пошуку оптимального варіанта вибору вузла мережі як точки приєднання додаткового живлення. *Практична значимість.* Використання результатів аналізу дозволить найбільш ефективно вести пошук оптимального варіанта реконструкції систем водопостачання, враховувати вплив визначальних факторів на характеристики мереж у разі змін витрат води та поточкорозподілення.

Ключові слова: водопровідна мережа; додаткове живлення; оптимальні точки приєднання

IMPROVING THE METHOD OF DETERMINING THE VALUE OF WATER LEVELS IN VERTICAL WELLS OF GROUP WATER COLLECTION

SHARKOV V.V.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
NESTEROVA O.V.², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

ZHURAVLIOVA O.A.³, *Senior Lecturer*,
ZHEFRUA D.V.⁴, *Stud.*

^{1*} Department of Water Supply, Sewerage and Hydraulics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: Shar_kov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8942-3701

² Department of Water Supply, Sewerage and Hydraulics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (097) 290-98-55, e-mail: nesterova.olena@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-1035-6572

³ Department of Water Supply, Sewerage and Hydraulics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (097) 728-45-39, e-mail: zhuravlova.olena@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-4964-343X.

⁴ Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine

Abstract. Purpose. Reconstruction of water supply systems to meet the increased water needs of consumers is a complex, time-consuming and expensive task. Reconstruction options include expanding existing water intakes or building new ones anywhere in the existing water supply network. The variety of options is accompanied by changes in water consumption in the sections of the networks and, importantly, in the flow distribution. The introduction of additional sources into the existing water supply systems requires a detailed study of the factors affecting the technical characteristics of the systems and responsible for the economic component of the project. **Methodology.** The influence of the determining factors on the total head losses in the water distribution network during the reconstruction of the water supply system is analyzed. An algorithm for finding the optimal network points for connecting an additional power source is proposed, which includes determining the optimal flow distribution and the corresponding technical changes for each selected option; total capacity of pumping stations and heads; analysis of the complete set of the water supply system of the accepted options; an economic analysis of the construction investment and operating costs that will accompany the operation of the water supply system design options. **Findings.** The choice of the optimal connection points for additional power sources depends on the amount of water flow in the network sections and the flow distribution. It is shown that the nodes of the end sections of the network most correspond to the conditions for searching for optimal points and can be fed from different directions, depending on the amount of additional flow. With an additional water flow rate no more than two nodal flow rates, the total head losses in the network sections are minimal. When an additional flow rate of more than two nodal flows enters the final node, an increase in head losses is observed, which can have critical values depending on its increase. The introduction of additional water flows into the network, which exceed two nodal ones, requires the use of intermediate network nodes located at sections with a higher throughput as connection points. **Originality.** The analysis of the factors influencing the choice of points of connection of additional power sources of the water supply network during its expansion is carried out. The analysis of the points was carried out with limited ranges of the values of water consumption of additional feeding – less and equal to the nodal ones, two and three times larger than the nodal ones. The ways of finding the optimal option for choosing a network node as a point of connection of additional power are shown. **Practical value.** The use of the analysis results will make it possible to most effectively search for the optimal variant of reconstruction of water supply systems, take into account the influence of determining factors on the characteristics of networks with changes in water consumption and flow distribution. The use of the analysis results will make it possible to most effectively search for the optimal variant of reconstruction of water supply systems, take into account the influence of determining factors on the characteristics of networks with changes in water consumption and flow distribution.

Keywords: *water supply system; additional power supply; optimal connection points*

Вступ. Районні системи водопостачання – централізовані системи розподілення води, особливості яких полягають в обслуговуванні великої кількості споживачів, розташованих на значних відстанях від джерел водопостачання та один від одного. Така особливість вимагає використання водопроводів значної довжини, переважно розгалужених.

Зростаючі потреби споживачів води таких систем диктують необхідність улаштування нових джерел водопостачання

або розширення існуючих, що викликає докорінні зміни в схемах систем водопостачання та їх поточкорозподіленні, а, відповідно, необхідність збільшення пропускної спроможності трубопроводів, прокладання нових ділянок водопроводів, установлення нового водопідйомного обладнання та зміни режимів подавання води.

Нові джерела водопостачання можуть розташовуватися в будь-якій точці системи водопостачання, що теоретично може

спонукати навіть до відокремлення деяких споживачів від централізованої системи.

Крім того, будівництво нових джерел водопостачання, наприклад, підземних, або розширення існуючих потребує вкладення значних коштів на облаштування нових свердловин, з'єднувальних трубопроводів, збірних колодязів, систем обробки води, насосних станцій, водопроводів, станцій підвищення напору та ін.

Мета дослідження – реконструкція систем водопостачання для забезпечення додаткових потреб споживачів у воді – складне, тривале та дороге завдання.

Варіанти реконструкцій включають розширення існуючих водозабірних споруд чи будівництво нових у будь-яких точках існуючої водопровідної мережі. Різноманіття варіантів супроводжується не тільки змінами витрат води на ділянках мережі, а й змінами в розподіленні потоків. Уведення додаткових джерел у склад існуючих систем водопостачання потребує детального вивчення факторів, які впливають на технічні характеристики систем та відповідають за економічну складову проекту.

Методика. Задача визначення оптимальної схеми реконструкції системи водопостачання поділяється на декілька підзадач:

- визначення варіантів розвитку системи при введенні додаткових витрат води від нових джерел водопостачання;
- визначення оптимального потокорозподілення та відповідних технічних змін для кожного вибраного варіанта;
- визначення потужності насосних станцій та напорів, які вони повинні створювати для кожного варіанта;
- аналіз комплектації системи водопостачання прийнятих варіантів;
- економічний аналіз капіталовкладень у будівництво та експлуатаційних витрат, які будуть супроводжувати роботу вибраного варіанта схеми системи водопостачання.

Функція пошуку оптимального рішення розвитку районної системи водопостачання

(1) основана на пошуку варіанта системи водопостачання з мінімальними напорами, які створюються насосами всіх насосних станцій системи, зумовленими мінімальними втратами напору на ділянках мережі та кошторисом.

$$F(\Sigma H_{нп}) \rightarrow \min(F(\Sigma h_i); F(C_{сист})) \quad (1)$$

Методика розширення тупикових схем системи водопостачання з оптимальним трасуванням водопроводів розроблена досить ретельно та застосовує методи теорії графів, яка дозволяє з'єднати наявних споживачів води, існуючі та можливі джерела водопостачання в єдину систему.

Кожний варіант системи аналізується за втратами напору в трубопроводах, можливості використання пропускної спроможності існуючих ділянок труб, режимами роботи та напорами насосів насосних станцій.

Інтерес викликає аналіз точок приєднання додаткових джерел живлення – вузлів мережі, введення додаткових витрат води, до яких призводить до найменших сумарних втрат напору та капітальних витрат на реконструкцію системи водопостачання.

Для цього аналізувалася водопровідна мережа з одним джерелом живлення та кількома споживачами води (рис. 1). Для спрощення аналізу прийнято, що витрати води споживачами з вузлів, довжини ділянок мережі, а також гідрогеологічні умови вузлів мережі для облаштування додаткових водозабірних споруд однакові. Таке спрощення дозволило не враховувати вплив втрат напору по довжині ділянок мережі.

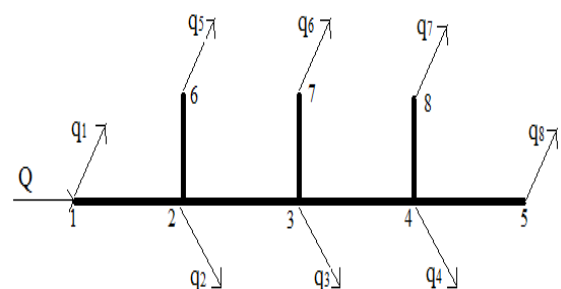


Рис. 1. Розрахункова схема водопровідної мережі

Аналіз проводився за різних значень витрат води, які вводяться до мережі від одного додаткового джерела живлення:

- додаткова витрата мережею дорівнюється витраті води з вузла;
- додаткова витрата дорівнюється двом витратам води з вузла;
- додаткова витрата дорівнюється трьом витратам води з вузла.

Такий діапазон додаткових витрат дозволив урахувати вплив можливої зміни поточкорозподілення води в мережі на кінцевий результат.

Сумарні втрати напору в мережі за введення додаткової витрати, рівної витраті з вузла мережі, залежно від точок приєднання, обчислюються рівняннями, які враховують діаметри трубопроводів, їх питомі опори S_i , $(\text{сек}^2/\text{м}^6) \cdot 10^{-6}$ та витрати води по ділянках мережі, q_i , л/сек.

Наведена схема мережі поділяється на чотири типи ділянок за витратами води. Ділянки 2–6, 3–7, 4–8 та 4–5 характеризуються питомим опором S_1 , ділянка 1–2 – S_2 , ділянка 2–3 – S_3 та ділянка 3–4 – S_4 . Після спрощень втрати напору в мережі за додаткового живлення, наприклад, із вузла 5 характеризуються рівнянням (2):

$$\sum h_5 = 3S_1 + 36S_2 + 16S_3 + 4S_4. \quad (2)$$

Аналіз рівнянь, складених для всіх варіантів живлення мережі, свідчить про схожість їх структури та відмінність за коефіцієнтами до величин питомих опорів трубопроводів.

Проведемо аналіз значимості величин питомих опорів трубопроводів S_i та їх впливу на кінцевий результат дослідження.

Питомі опори будемо розглядати виходячи з кратності збільшення витрат води (від одно- до семикратних величин) ділянками мережі та відповідних діаметрів трубопроводів (рис. 2).

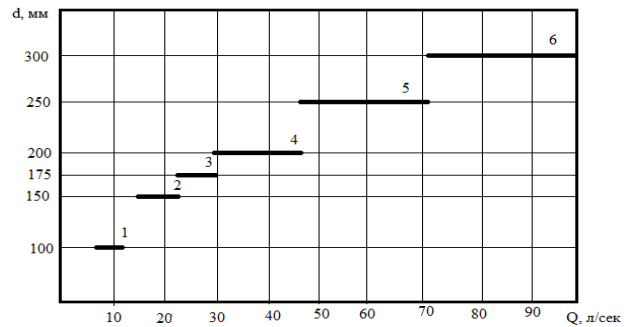


Рис. 2. Залежність діаметрів трубопроводів від граничних витрат води з економічним ефектом 0,75 1-, 2-, 3-, 4-, 5-, 6- кратність збільшення витрат води

Залежність на рисунку 3 свідчить, що у разі збільшення діаметра трубопроводу (за обґрунтованого збільшення витрати води) ступенево зменшується питомий опір. Така залежність вимагає врахування вагомості питомих опорів трубопроводів у виборі місця розташування додаткового джерела водопостачання.

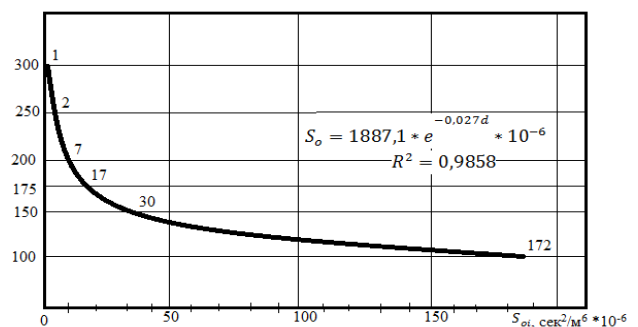


Рис. 3. Залежність питомих опорів трубопроводів від їх діаметрів; 1-, 2-, 7-, 17-, 30-, 172- кратність зменшення величин питомих опорів трубопроводів залежно від збільшення їх діаметрів

Якщо припустити, що питомий опір S_1 відповідає мінімальному діаметру трубопроводу мережі $d = 100$ мм, збільшення коефіцієнта S_1 з 3 до 4 в рівняннях для вузлів 4,3,2 та 1, тобто в 1,33 раза збільшить результат рівнянь на величину $172,9 \cdot 10^{-6}$ м.

У той же час збільшення коефіцієнта до питомого опору S_4 ($d = 200$ мм) з 4 до 9, тобто в 2,25 раза в рівняннях для вузлів 7,6,3,2 та 1, збільшить результати розрахунків усього на $34,75 \cdot 10^{-6}$ м.

Враховуючи вплив питомих опорів на результати досліджень, маємо, наприклад, для вузла 5:

$$\sum h_{\xi} = 611,62 \cdot 10^{-6}, \text{ м} \quad (3)$$

Аналогічно розраховуються втрати напору для всіх варіантів приєднання додаткового джерела живлення до мережі. Найменші результати дають рівняння з додатковим живленням у кінцевих вузлах мережі 5 та 8, тобто з вузлами, які приєднані до ділянок мережі з найменшими діаметрами трубопроводів.

Такі результати стали можливими у разі виконання раніше встановленої умови – додаткова витрата води дорівнюється витраті води з вузла. В цьому випадку ділянка мережі (для вузла 5 – ділянка 4–5), яка раніше живила вказаний вузол, не використовується, оскільки змінився напрямок його живлення. Тому вибираючи варіант приєднання додаткового живлення до мереж, слід, насамперед, розглядати крайні, найбільш віддалені точки мережі, які приєднані до мережі трубопроводами з найменшими діаметрами.

Таблиця

Загальні втрати напору на ділянках мережі за приєднання додаткового джерела в точках

Номер точки приєднання джерела водопостачання	Втрата напору в мережі за визначеної витрати додаткового джерела $\sum h \cdot 10^{-6}$, м		
	$Q_{\text{додат}} = Q_i$	$Q_{\text{додат}} = 2Q_i$	$Q_{\text{додат}} = 3Q_i$
5	611,62	739,27	1260,18
8	611,62	739,27	1260,18
4	712,65	739,27	1260,18
7	646,37	801,82	1368,51
3	747,37	801,82	849,91
6	665,99	829,75	1368,51
2	838,99	829,75	849,91
1	849,91	849,91	876,79

Для визначення змін у мережі проаналізовано вплив витрат води додаткового живлення на сумарні втрати напору – дві вузлові витрати та три вузлові витрати.

При цьому ділянки мережі з вузлами, до яких приєднане додаткове джерело живлення, в першому випадку проводять до мережі розрахункову витрату води, за якою підбиралися діаметри трубопроводів, в другому – більшу, ніж розрахункова.

У першому випадку витрата не викликає підвищення швидкостей руху води, а відповідно, і втрат напору, в другому – витрати вищі критичні, відповідно викликать необґрунтовано високі втрати напору.

У першому випадку оптимальними є точки 4, 5 та 8.

В другому випадку оптимальні точки – 1, 2 та 3.

Висновки

1. Проблема пошуку оптимальних точок приєднання додаткових джерел живлення ускладнюється змінами витрат води на ділянках мережі, а в деяких випадках і потокорозподіленням.

2. Аналіз мережі за обмеженої величини додаткової витрати води показав, що кінцеві ділянки мережі, до яких приєднуються додаткові джерела водопостачання, працюють у різних режимах із різними витратами.

За додаткової витрати води, яка дорівнює вузловій, живиться лише кінцевий вузол мережі. При цьому схема водопостачання може розвиватися в напрямку децентралізації, поділяючи єдину мережу на частини, залежно від джерела живлення. В такому випадку сумарні витрати напору в мережі найменші.

3. У разі надходження в кінцевий вузол додаткової витрати меншої за вузлову спостерігається двостороннє живлення вузла, що також зменшує сумарні втрати напору та виключає децентралізацію системи водопостачання.

4. У випадку надходження до кінцевого вузла додаткової витрати, більшої за вузлову, спостерігається одностороннє живлення вузла зі зміною потокорозподілення, що також виключає децентралізацію системи водопостачання. Додаткова подвійна вузлова витрата води сумарні втрати напору в мережі не змінює.

5. За надходження до кінцевого вузла додаткової витрати більшої, ніж дві вузлові, спостерігається збільшення втрат напору, які можуть мати критичні значення залежно від її величини.

6. Уведення до кінцевих вузлів додаткових витрат води, які перевищують межі пропускної спроможності ділянок трубопроводу, вимагає використовувати як вузли приєднання проміжні вузли мережі. При цьому пропускна спроможність ділянок мережі, на яких розташовані ці вузли, більша.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамов Н. Н. Водоснабжение. Москва : Стройиздат, 1982. 440 с.
2. Кравченко В. С. Водопостачання та водовідведення : навч. посіб. Рівне : Укр. держ. акад. водного гос-ва, 1997. 235 с.
3. Орлов В. О., Зошук А. М. Сільсько-господарське водопостачання та водовідведення : підруч. Рівне : УДУВГП, 2002. 203 с.
4. Журба М. Г., Соколов Л. И., Говорова Ж. М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений : учеб. пособ.; изд. 2-е, перераб. и доп. Т. 3. Москва : Изд-во АСВ, 2004. 256 с.
5. Тугай А. М., Терновцев В. О., Тугай Я. А. Розрахунок і проектування споруд систем водопостачання : навч. посіб. Київ : КНУБА, 2001. 256 с.
6. Абрамов Н. И., Поспелова М. М., Сомов М. А. и др. Расчет водопроводных сетей : учеб. пособ. для вузов; 4-е изд., перераб. и доп. Москва : Стройиздат, 1983. 275 с.
7. Шарков В. В., Головачинская А. С. Анализ влияния определяющих факторов на продуктивность трубчатых колодцев. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Днепропетровск, 2015. Вып. 84. С. 207–211.
8. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. [Чинні з 01-01-2014 р.]. Київ : Мінрегіон України, 2013. 301 с. (Державні будівельні норми України).
9. Рудик В. П., Петимко П. И., Семенов В. Д., Сергеев Ю. С. Эксплуатация систем водоснабжения. Киев : Будівельник, 1993. 184 с.
10. Halhal D. I., Walters G. A., Savic D. A. Scheduling of water distribution system rehabilitation using structured messy genetic algorithms. *Evolutionary Computation*. 01 January, 1999. Vol. 7 (3). Pp. 311–329. URL : DOI: [10.1162/evco.1999.7.3.311](https://doi.org/10.1162/evco.1999.7.3.311) PMID: 10491467.

REFERENCES

1. Abramov N.N. *Vodosnabzhenie* [Water supply]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1982, 440 p. (in Russian).
2. Kravchenko V.S. *Vodopostachannya ta vodovidvedennya : navch. posib.* [Water supply and diversion : tutorial]. Rivne : Ukr. Derzh. Akad. Vodnogo Gos-va Publ., 1997, 235 p. (in Ukrainian).
3. Orlov V.O. and Zoshchuk A.M. *Silsko-gospodarske vodopostachannya ta vodovidvedennya* [Agriculture water supply and diversion]. Rivne : UDUVGP Publ., 2002, 203 p. (in Ukrainian).
4. Zhurba M.G. and Sokolov L.I. *Vodosnabzheniye. Proyektirovaniye sistem i sooruzheniy : ucheb. posob.* [Water supply. Design of systems and structures : tutorial]. Vol. 3, Moscow : ACB Publ., 2004, 256 p. (in Russian).
5. Tuhay A.M. and Ternovtsev V.O. *Rozrakhunok i proektuvannya sporud system vodopostachannya : navch. posib.* [Calculation and design of water supply systems : tutorial]. Kyiv : KNUBA Publ., 2001, 256 p. (in Ukrainian).
6. Abramov N.I. and Pospelova M.M. *Raschet vodoprovodnykh setey : ucheb. posob.* [Calculation of water supply networks : tutorial]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1983, 275 p. (in Russian).
7. Sharkov V.V. and Holovachinskaia A.S. *Analiz vliianiia opredeliuiushchikh faktorov na produktivnost trubchatykh kolodtsev* [Analysis of the impact of the determinants of productivity tube wells]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroyenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2015, iss. 84, pp. 207–211. (in Ukrainian).
8. DBN V.2.5-74:2013. *Vodopostachannya. Zovnishni merezhi ta sporudi. Osnovni polozhennya proektuvannya* [Water supply. External networks and structures. Basic design provisions]. [Valid from 3 01-01-2014]. Kyiv : Minregion of Ukraine, 2013, 301 p. (State Building Norms of Ukraine). (in Ukrainian).
9. Rudik V.P., Petimko P.I., Semenyuk V. D. and Sergeev Yu. S. *Ekspluatatsiya sistem vodosnabzheniya* [Operation of water supply systems]. Kyiv : Budivelnik Publ., 1893, 184 p. (in Ukrainian).
10. Halhal D.I., Walters G.A. and Savic D.A. Scheduling of water distribution system rehabilitation using structured messy genetic algorithms. *Evolutionary Computation*. 01 January, 1999, vol. 7 (3), pp. 311–329. URL : DOI: [10.1162/evco.1999.7.3.311](https://doi.org/10.1162/evco.1999.7.3.311) PMID: 10491467.

Надійшла до редакції: 02.06.2021.