

Розробка методики управління поточкорозподілом у водопровідних мережах в реальному часі

О. Г. Добровольська

Потребує обґрунтування метод визначення кількості контрольних вузлів при проектуванні мереж з урахуванням умов її живлення, а також в процесі її експлуатації при зміні гідравлічних характеристик ділянок. Це необхідно для суттєвого зменшення енергоспоживання насосного обладнання, попередження значних витоків. Досліджено процеси утворення зон недостатнього напору у водопровідних мережах. Запропоновано методику управління поточкорозподілом у водопровідній мережі, який дозволяє обґрунтовувати необхідну і достатню кількість контрольних вузлів та місця їх розташування.

Показано, що отримані при цьому рішення узгоджуються з існуючими методами забезпечення необхідних напорів в мережі. Але при цьому відкриваються додаткові можливості в управлінні поточкорозподілом, а саме уточнення розташування контрольних вузлів на водопровідній мережі при її експлуатації.

В результаті досліджень запропоновано спосіб визначення кількості контрольних вузлів, який дозволяє в залежності від площі зон з недостатнім напором визначати необхідну їх кількість при проектуванні водопровідної мережі та уточнювати розташування в процесі експлуатації.

Згідно з представленою методикою управління поточкорозподілом у водопровідних мережах, виконуються гідравлічні розрахунки для різних режимів водорозбору, визначаються витрати води в ділянках, які є дійсними на момент виміру п'єзометрів в контрольних вузлах. Визначаються фактичні вузлові напори, встановлюються вузли, що знаходяться на межі зон з недостатнім напором, з числа яких при необхідності призначаються додаткові вузли контролю тиску. На стадії проектування мереж моделюється зміна параметрів роботи мережі. П'єзометричні позначки у вузлах визначаються відносно вузлів живлення, значення напору в яких задаються. Критерієм вибору кількості контрольних вузлів та місць їх розташування є величина мінімального тиску в них та розмір зон з недостатнім напором.

Розроблені рекомендації та доповнення до діючих методів управління поточкорозподілом, за якими визначається кількість та розташування контрольних вузлів. Це дозволяє підтримувати необхідні тиски у вузлах мережі, попереджати їх перевищення, що сприяє зменшенню витоків та витрати на енергоспоживання в насосних станціях

Ключові слова: водопровідна мережа, керування поточкорозподілом, методика управління, зони недостатнього тиску, контрольні вузли

1. Вступ

Системи подачі та розподілення води комунальних водопроводів є найбільш енергомісткою частиною системи водопостачання міст. Тому одним із головних напрямлень скорочення енергетичних і матеріальних витрат в системах водопостачання є удосконалення керування поточкорозподілом в мережах [1–3].

Фактичний напір у вузлах мережі повинен бути максимально наближений до необхідного. В цьому полягає сутність оптимізації управління поточкорозподілом для зменшення загальних енерговитрат в мережі. Це вимагає налагодження чіткого взаємозв'язку між системою збору інформації та системою зворотнього зв'язку з виконавчими елементами. Тому є перспективним обґрунтування вибору кількості та розташування вузлів контролю тиску з урахуванням зон недостатнього напору при проектуванні мереж та з урахуванням змін гідравлічних характеристик.

Особливої актуальності тема дослідження набуває у зв'язку з тим, що значна частина водопровідних мереж в європейських країнах, зокрема, в Україні, Польщі, Словенії, Хорватії та інших, побудована із сталевих трубопроводів, пропускна здатність яких змінюється у часі в результаті впливу корозійних процесів [4–7]. Тому представлені рекомендації можуть бути запропоновані для застосування комунальних підприємств зазначених країн.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Однією із головних задач керування поточкорозподілом у водопровідних мережах є забезпечення значень вузлових тисків на рівні мінімально необхідних. Проблемні ситуації, що виникають під час експлуатації мереж, пов'язані з утворенням зон недостатнього та надмірного тиску. В першому випадку це погіршує якість водозабезпечення. В другому стає причиною виникнення нераціональних витоків та аварійних ситуацій в мережах.

Державними будівельними нормами ДБН В.2.5-74:2013 [8], директивою [9] представлена нормативно-технічна документація з досліджуваної проблеми. Відповідно до цього встановлені значення необхідного напору води, який рекомендовано дотримувати в системах водопостачання будівельних об'єктів:

$$H_{\text{нн}} = 10 + 4(n - 1), \quad (1)$$

де n – кількість поверхів у будівлі.

Розвиток інформаційних технологій на сучасному етапі сприяє поглибленню вивчення гідравлічних аспектів поточкорозподілу. Так, в роботі [10] зазначено, що застосування вимірювання параметрів в режимі он-лайн моніторингу є поширеним способом контролю тиску. В роботі [11] приведені результати досліджень застосування спеціалізованої платформи City Com для управління роботою мереж, що дає розширення можливостей для гідро-моделювання та інвентаризації водопровідних мереж. Але досягнення у розвитку інформаційних технологій стосуються питань зберігання, обробки, візуалізації елементів водопровідної системи. Враховуючи значну протяжність

водопровідних мереж, фахівці роблять висновок про доцільність розподілу мереж водопостачання на менші підсистеми – сектори, як зазначено в роботі [12]. Основною ідеєю секторування на думку фахівців [13] є покращення оперативного контролю. Про створення подібних вимірювальних зон зазначено в роботі [14]. Про метод зниження сумарних надмірних напорів у водопровідних мережах шляхом зонування йде мова в роботі [154]. Популярність ідеї створення подібних зон управління пояснюється об'єктивними труднощами, пов'язаними з регулюванням тисків у великій кількості вузлів. Ефективність застосування обладнання для підтримки мінімально необхідного тиску [16] в таких локальних областях збільшується. Але створення таких секторів потребує додаткових досліджень утворення зон з недостатніми та надмірними напорами з урахуванням зміни гідравлічних характеристик ділянок, водорозбору. Доцільність моделювання таких зон підтверджується висновками фахівців про застосування активного моніторингу потоку, тиску для виявлення прихованих витоків, представлені в роботі [17]. Визначення зон контролю тиску необхідно при встановленні регулюючих клапанів для зменшення надмірного тиску, що підтверджується висновками досліджень, представленими в роботі [18].

Чим більша кількість вузлів контролю тиску на мережі, тим більш достовірний результат про розподіл значень тиску в мережі можна отримати. Але враховуючи витрати на обладнання контрольних вузлів, треба визначити їх мінімальну достатню кількість та місця розташування на мережі. Варіантом подолання цієї проблеми може бути застосування чисельних методів визначення контрольних вузлів, як зазначено в роботі [19], але автори вказують на невирішеність цього питання. Наприклад, в роботі [20] пропонується застосування діагностичної матриці з використанням чисельних розрахунків гідравлічної моделі для визначення місць розташування датчиків тиску. Але складність розрахунків та змінність умов водоспоживання пояснюють недосконалість цих методів. Тому проблема пошуку розташування вузлів контролю тиску залишається невирішеною та обумовлює необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

3. Ціль та задачі дослідження

Мета дослідження – визначення впливу розміру зон з недостатнім напором на кількість та розташування контрольних вузлів при проектуванні та експлуатації водопровідних мереж з урахуванням умов живлення та зміни гідравлічних характеристик окремих ділянок

Це направлено на забезпечення мінімально необхідних значень тисків у вузлах водопровідних мереж.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначити розрахунковим шляхом вплив зон з недостатнім напором на кількість та розташування контрольних вузлів;
- розробити методику управління поточкорозподілом в реальному часі для проєктованих і діючих водопровідних мереж.

4. Матеріали та методи дослідження впливу умов живлення мережі на динаміку вузлових напорів та вибір контрольних вузлів

4.1. Вихідні дані для моделювання зон напорів у водопровідній мережі

Дослідження проводились на основі теоретичних проектуємих схем. В табл. 1 приведені схеми розглянутих мереж та вказані параметри роботи: загальна добова витрата $Q_{\text{доб}}$, ($\text{м}^3/\text{доб}$), максимальна подача в мережу Q_{II} , (л/с), номери вузлів підключення водоводів, номери елементів мережі, в яких моделювались зміни гідравлічних характеристик:

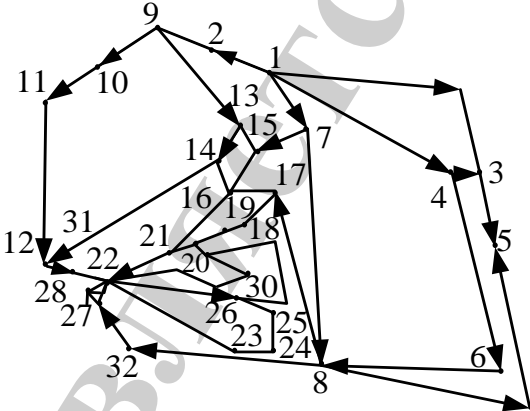
- кільцевої мережі (схема № 1) із 14 контурів, 32 вузлів та 45 ділянок;
- кільцевої мережі (схема № 2) із 13 контурів, 26 вузлів та 38 ділянок;
- кільцевої мережі (схема № 3) із 8 контурів, 18 вузлів та 25 ділянок;
- кільцевої мережі (схема № 4) із 15 контурів, 28 вузлів та 43 ділянок.

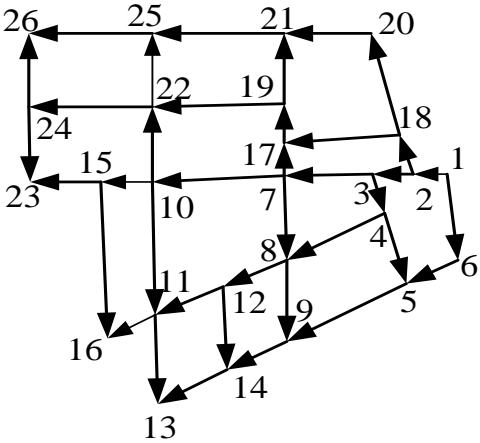
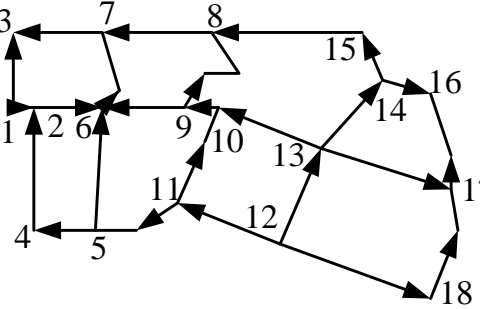
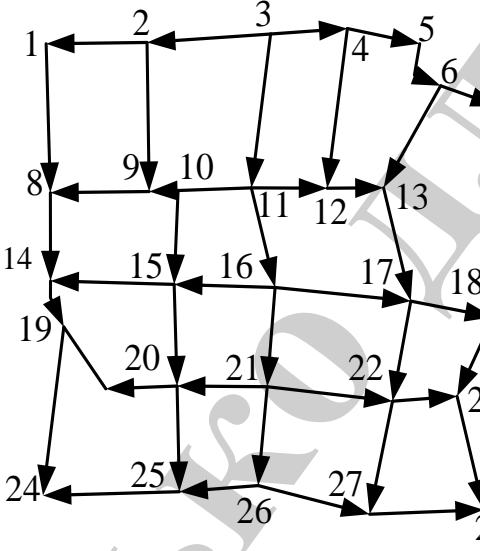
Для схем водопровідних мереж, представлених в табл. 1, були сформовані вихідні дані для виконання гідравлічного розрахунку мереж:

- визначено розрахункову витрату води за кількістю жителів та нормованою витратою води ;
- складено розрахункову схему за планом населеного пункту, пронумеровано вузли та ділянки;
- розраховано вузлові витрати, виконано початковий поточкорозподіл;
- сформовано вихідні дані для виконання гідравлічного розрахунку, представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики схем водопровідних мереж

Номер схеми	Схема мережі	Варіанти живлення	Зміна гідравлічних характеристик
1		$Q_{\text{доб}}=20000$ $\text{м}^3/\text{доб}$ $Q_{\text{II}}=275$ л/с 1) вузол № 1; 2) вузол № 8; 3) вузли № 1 та № 8; 4) вузли № 6 та № 11	Зміна відбору у вузлах № 4; 5; 7; 9–11; 13–15; 19; 20; 26; 27; 29; 30

2		$Q_{\text{доб}}=31500$ $\text{м}^3/\text{доб}$ $Q_{\text{II}}=697$ л/с 1) вузол №1; 2) вузол №14; 3) вузли № 7 (підземне джерело живлення).	Зміна пропускної здатності ділянок № 20–21; 25–26; 2–3; 15–23; 5–9; 19–21; 7–8; 11–13
3		$Q_{\text{доб}}=63000$ $\text{м}^3/\text{доб}$ $Q_{\text{II}}=1192$ л/с 1) вузол №1; 2) вузол №14; 3) вузли № 11 та № 12	Зміна пропускної здатності ділянок: 1) 1–2–6–9–10–13–17 2) 1–3–7–8–15–14–16–17–18–12–11–5–4.
4		$Q_{\text{доб}}=91000$ $\text{м}^3/\text{доб}$ $Q_{\text{II}}=1354$ л/с 1) вузол №3; 2) вузол №26; 3) вузол №19; 4) вузли № 11 та №18; 5) № 7 та №24; 6) № 14 та №19	Зміна відбору у вузлах № 8–11; 15–17; 20–22 та у вузлах № 2–6; 24–28.

Таким чином, дослідження проводились на прикладі водопровідних мереж продуктивністю $Q=20000\text{--}91000$ $\text{м}^3/\text{доб}$. Для кожного варіанта живлення мережі моделювались зміни гідравлічних характеристик та виконувались гідравлічні розрахунки.

4. 2. Методика визначення зон недостатніх напорів

Визначення впливу структури розміщення водоживлювачів мережі на розміри зон недостатнього напору було розглянуто на прикладі водопровідних мереж, схеми яких представлені в табл. 1. При моделюванні умов живлення

мережі були розглянуті варіанти підключення водоводів, наближені до реальних умов. При моделюванні зміни гідравлічних характеристик ділянок брались до уваги конструктивні дані трубопроводів, а саме, їх матеріал та чисельні значення водорозбору з вузлів.

Зміна пропускної здатності ділянок моделювалась на прикладі схем № 2 і №3 шляхом зменшення діаметру від 10 % до 30 % із кроком $\Delta=10\%$ за формулами (2) та (3):

$$d_{\text{фi}} = K_c \cdot d_{\text{діл.i}}, \quad (2)$$

де $d_{\text{діл.i}}$, $d_{\text{ф.i}}$ – вихідний і фіктивний діаметри розглянутої i -ої ділянки мережі відповідно, м; K_c – коефіцієнт зміни опору:

$$K_c = 1 - P/100, \quad (3)$$

де P – відсоток зміни пропускної здатності труби, %.

Для схеми №2 промодельовано зміну опору 8 ділянок № № 20–21; 25–26; 2–3; 15–23; 5–9; 19–21; 7–8; 11–13, для схеми № 3 моделювання зміни опору виконувалось для 18 ділянок № 1–2–6–9–10–13–17 та №. 1–3–7–8–15–14–16–17–18–12–11–5–4.

Моделювання структури водорозбору було виконано на прикладі схем мережі № 1 і № 4 шляхом зміни водорозбору від 10 % до 20 % із кроком $\Delta q=10\%$ у наступних вузлах:

– для схеми № 1 промодельовано зменшення відбору у 9 вузлах № 4–5; 7; 9–11; 14 15; 30 та збільшення відбору у 6 вузлах № 13; 19; 20; 26; 2; 29;

– для схеми № 4 перерозподіл водовідбору промодельовано між 10 центральними вузлами № 8–11; 15–17; 20–22 та 10 кінцевими вузлами № 2–6; 24–28.

Витрата в мережі залишалась постійною за рахунок зменшення водорозбору з інших вузлів. Для кожної із розглянутих схем мережі було виконано гідравлічні розрахунки та визначені вільні напори в її вузлах при нормальних умовах експлуатації для різних варіантів живлення мереж та з урахуванням змін. При нормальних умовах вільні напори у вузлах визначались відносно критичної точки, при моделюванні змін умов водоспоживання – відносно вузла живлення.

Для визначення впливу структури розміщення водоживлювачів мережі на її гідравлічні характеристики для розглянутих схем визначено оптимальні умови живлення для забезпечення величин вузлових напорів, наближених до необхідних значень (1).

Для схем № 1–№ 4 проаналізовано площі зон з недостатнім напором, які можуть утворитись при зміні гідравлічних характеристик, кількість та розташування контрольних вузлів для попередження утворення таких зон.

5. Результати досліджень гідравлічних характеристик мережі

5. 1. Утворення зон недостатнього напору у водопровідній мережі

В результаті проведених досліджень по кожному із розглянутих варіантів зміни водорозбору були встановлені зони недостатнього напору, межі яких визначені по розташуванню вузлів з напором, що відповідає умові:

$$H_{\text{вi}} < H_{\text{н}}, \quad (4)$$

де $H_{\text{вi}}$ – значення вільного напору в i -му вузлі, м; $H_{\text{н}}$ – значення необхідного напору [8], м. Структура міста моделювалась з урахуванням переважно п'ятиповерхової забудови:

$$H_{\text{н}} = 10 + 4(n - 1),$$

де n – кількість поверхів у будинках, у дослідженнях розглянуті житлові райони з п'ятиповерховою забудовою, $n = 26$ м.

Межі зони утворюються в результаті проекції на водопровідну мережу віртуальної п'єзометричної поверхні площиною відносно рівня землі Z_i на висоті $Z_i + H_{\text{н}}$ при умові (4) та визначаються по довжинах ділянок l_i , що відтинаються на ділянках магістральних мереж цією площиною та обслуговують будинки при умові (4).

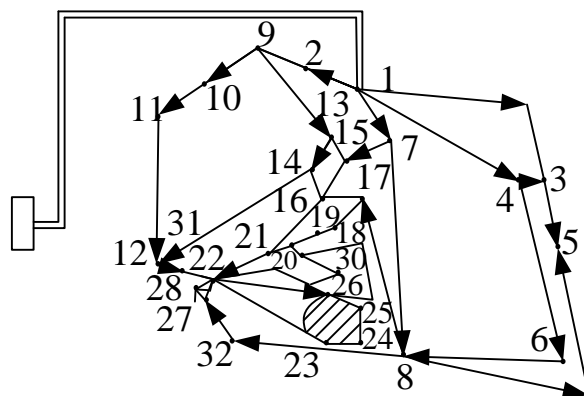
Як приклад, площадні графіки утворення зон недостатнього напору у водопровідній мережі за схемою №1 при зміні водорозбору в мережі представлені на рис. 1. На рис.1 представлені чотири варіанти/водоводів до мережі (фрагменти а, б, в, г). Моделювання утворення зон недостатнього напору виконано при однаковій зміні водорозбору у вузлах для кожного варіанта живлення мережі. Чисельні значення площі цих зон становили: 48,75 га (рис. 1, а) та 22,6 га (рис.1, б) для варіантів живленні мережі в одному вузлі; 24,4 га (рис. 1, в) та 33,9 га (рис. 1, г) для варіантів живлення мережі у двох вузлах.

Як видно з рис. 1,а при зміні структури водорозбору найбільшу площу зони недостатнього напору $F_{\text{з.н.н}}$ відносно загальної площі $F_{\text{заг}}$ ($F_{\text{з.н.н}}/F_{\text{заг}} = 12,5\%$) слід очікувати при умові живлення мережі у вузол 1.

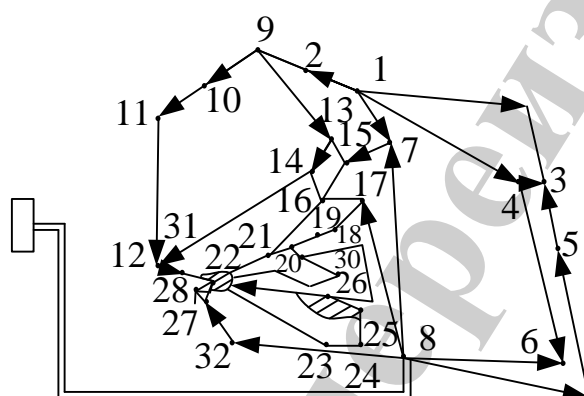
При однакових змінах водорозбору у вузлах співвідношення між площами цих зон для схем мереж з двома вузлами живлення залишається постійним (рис. 1, в, г). Розмір зони недостатнього напору не перевищує 8,5 % від загальної площі.

Найменша площа зони з недостатнім напором ($F_{\text{з.н.н}}/F_{\text{заг}} = 5,8\%$) утворюється при умові живлення у вузлі 8 (рис. 1, б). Для даного випадку це пояснюється розташуванням найвищих геодезичних позначок у вузлі 8. Крім того, розмір очікуваних зон недостатнього напору зменшується при збільшенні водорозбору у вузлах, розташованих у ближній відносно точки живлення зоні.

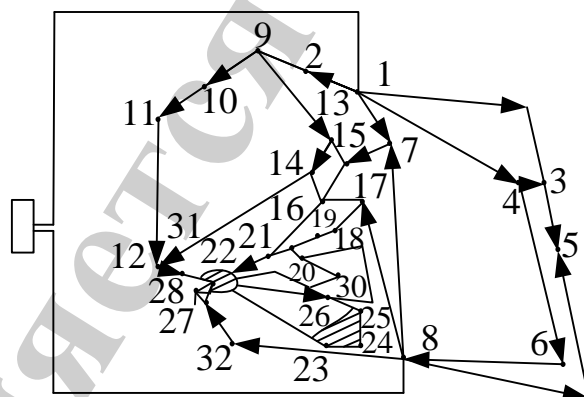
Гідравлічні характеристики мережі змінюються під впливом структурно-технологічних факторів: опір сталевих та чавунних ділянок мережі збільшується в процесі експлуатації, що зменшує пропускну здатність трубопроводів.



a



б



в

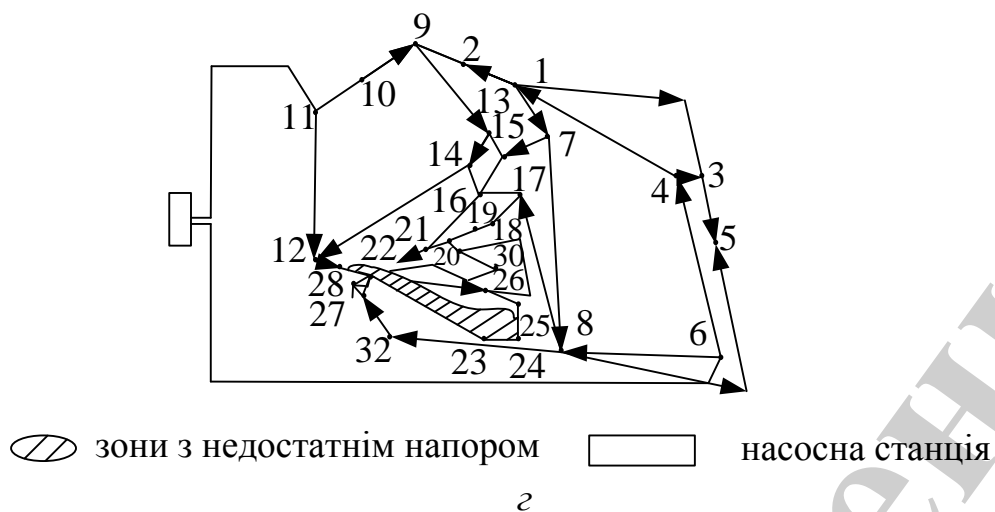
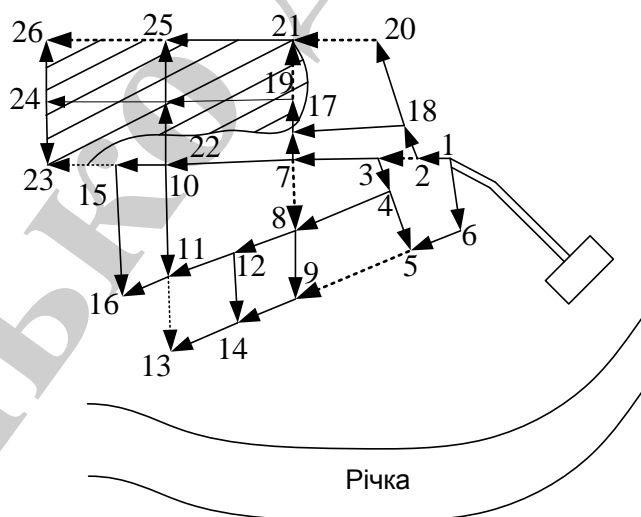
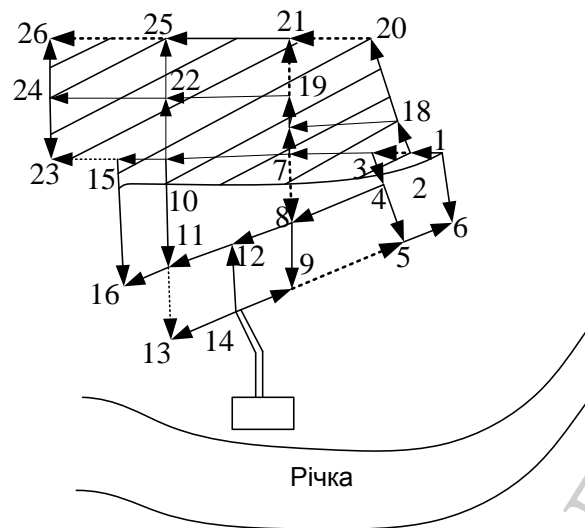


Рис. 1. Зони недостатнього напору з урахуванням зміни структури водо розбору для різних варіантів живлення мережі: *а* – подача води у вузол 1.; *б* – подача води у вузол 8; *в* – подача води у вузли 1 та 8; *г* – подача у вузли 11 та 6

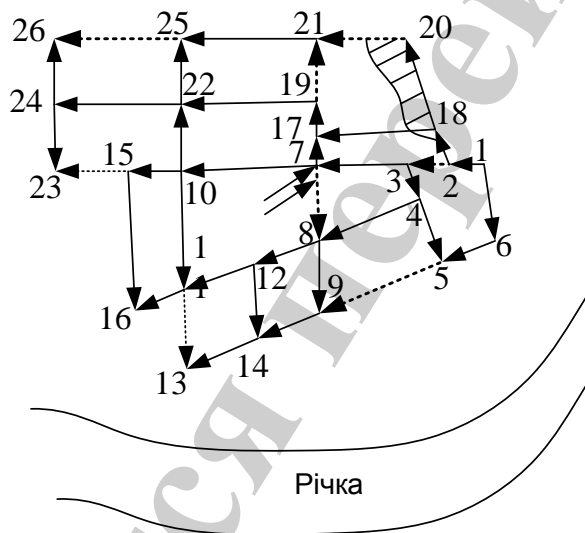
Процес виникнення можливих зон недостатніх напорів при зміні пропускної здатності ділянок на прикладі мережі за схемою № 2 представлено на рис. 2.

Слід зазначити, що найбільші площі зон недостатнього напору слід очікувати при зміні пропускної здатності ділянок, у віддалених відносно вузла живлення районах. Так при подачі води у вузол 1 (рис. 2, *а*) співвідношення $F_{з.н.н}/F_{заг}=30,5\%$, а при живленні у вузлі 14 – $F_{з.н.н}/F_{заг}=62,5\%$ (рис. 2, *б*). Це пояснюється меншим резервом пропускної здатності віддалених ділянок.





б



в

Рис. 2. Зони недостатнього напору з урахуванням зміни пропускної здатності ділянок для різних варіантів живлення мережі: а – подача води у вузол 2; б – подача води у вузол 14; в – подача води у вузол 7

Площу цих зон можна суттєво зменшити при умові подачі живлення у центральні вузли мережі (рис. 2, в) – для зазначеного варіанту живлення – $F_{з.н.н}/F_{заг}=12,5\%$.

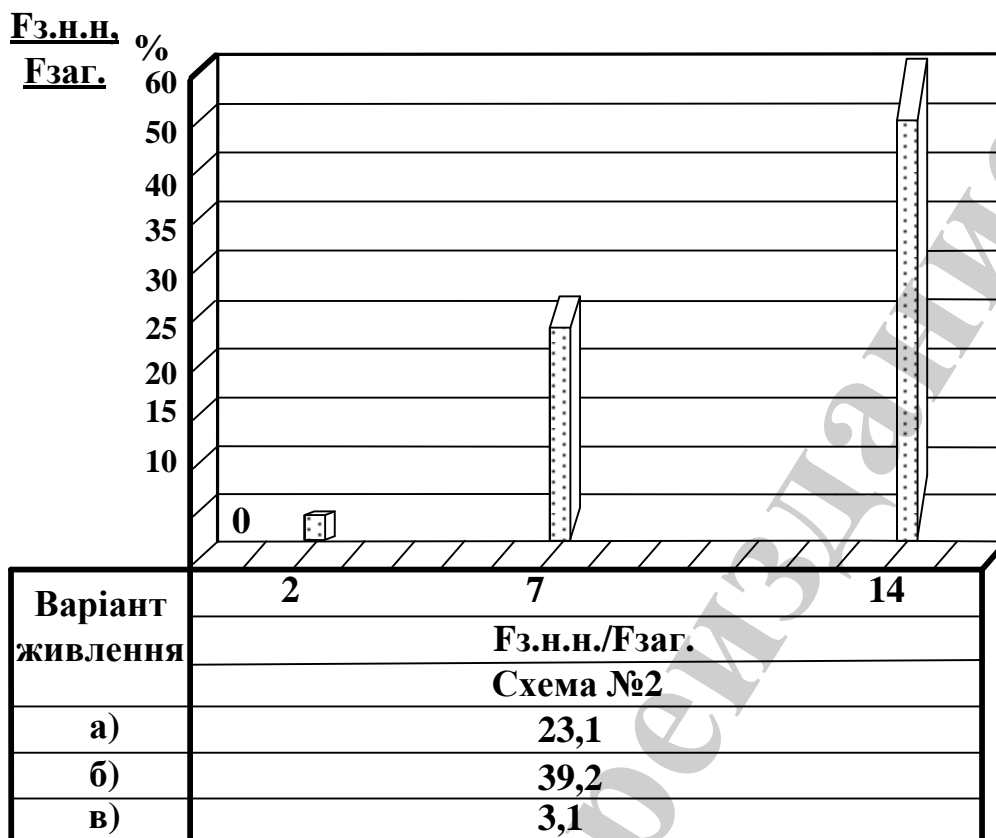
5. 2. Значення кількості вузлів контролю тиску

Для визначення впливу розміру зон недостатнього напору на розташування та кількість контрольних вузлів для водопровідних мереж за схемами № 1 та № 2 побудовані діаграми зміни кількості цих вузлів для різних варіантів живлення мереж, які показані на рис. 3. Для мережі за

схемою № 1 найменша площа зони з недостатнім напором спостерігається при варіанті живлення мережі у вузол № 8, найбільша-при живленні у вузлі 1 (рис. 3, а). При однакових змінах у водорозборі найбільша площа зон недостатнього напору виникає в мережах, з найвищими геодезичними позначками на їх початку, що відповідає варіанту живлення у вузлі № 1. Це пояснюється наявністю найбільших надмірних вузлових напорів для мереж з найвищими геодезичними позначками в кінці. Для водопровідної мережі за схемою № 2 найбільша кількість вузлів з недостатнім напором відповідає варіанту живлення мережі у вузлі № 7 (рис. 3, б). В даному випадку це пояснюється більш рівномірним розподілом потоків при надходженні води в центральний вузол мережі. Такий варіант живлення є можливим при наявності підземного джерела.



а



б

Рис. 3. Зміна кількості вузлів n з напором, що менший за необхідний, для різних варіантів живлення мереж за схемою № 1 та № 2

При наявності інформації про вільні напори у вузлах мережі на момент виміру тиску в окремих її точках, диспетчер має можливість візуальної оцінки ситуації. При наявності одного вузла, вільний напір в якому менший за необхідний, що відповідає незначним змінам у роботі мережі, він і є контрольним. Якщо цей вузол співпадає з існуючою точкою контролю тиску, то на даному етапі доцільно залишити її незмінною. При однаковій зміні водорозбору кількість вузлів з недостатнім напором у 2,5 рази більша при умові подачі води у найвищі позначки мережі (рис. 4, а). Це пояснюється меншими значенням надмірних напорів в мережі.

Кількість вузлів з напором, що менший за необхідний, не є головним критерієм для оцінки зміни водорозбору. Трапляються ситуації, коли в зоні недостатнього напору з меншою площею знаходиться більша кількість вузлів з напором, що менший за необхідний.

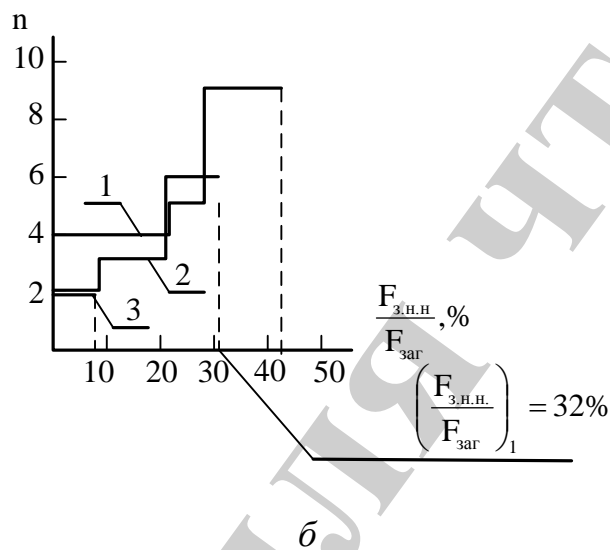
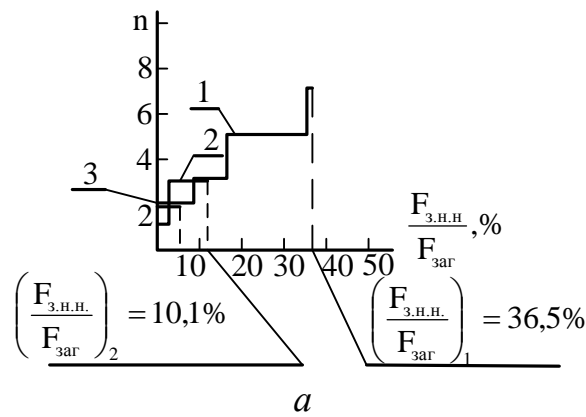


Рис. 4. Залежність кількості вузлів n з напором, що менший за необхідний, від змін площ недостатнього напору $F_{3.н.н.}$ з урахуванням гідравлічних факторів: a – при збільшенні водорозбору у вузлах 8–11; 15–17; 20–22; $б$ – при збільшенні водорозбору у вузлах 2–6; 24–28; 1, 2, 3 – графічні залежності відповідно для варіантів живлення мережі у вузлі № 9; № 26 та № 3

Так, для першого варіанту живлення мережі у вузлі № 19 при $F_{3.н.н.}/F_{заг}=30\%$ кількість вузлів з недостатнім напором становить 9, а для тієї ж схеми, але для умови подачі води у вузол № 26 при $F_{3.н.н.}/F_{заг}=32\%$ кількість вузлів, що знаходиться в зоні недостатнього напору становить 5 (рис. 4, б). Виходячи з цих результатів, можна констатувати, що критерієм для вибору кількості вузлів контролю тиску є розмір очікуваної зони недостатнього напору. Тобто, при $F_{3.н.н.}/F_{заг} \leq 40\%$ достатньо введення одного контрольного вузла з найменшим вільним напором з числа тих, що розташовані на межі очікуваної зони, при $F_{3.н.н.}/F_{заг}=40-60\%$ необхідно обладнання 2–3 додаткових контрольних вузла, що вибираються за вказаними критеріями.

5. 3. Методика управління потокорозподілом для проєктованих та діючих водопровідних мереж

Ефективність керування потокорозподілом у водопровідних мережах залежить від правильного вибору кількості та місць розташування вузлів контролю тиску. Аналіз потокорозподілу для проєктованих і діючих водопровідних мереж з метою визначення та уточнення розташування контрольних вузлів та необхідної кількості, представлений на рис. 5, включає наступні етапи:

1. Уведення початкових даних складається із креслення схеми мережі та створення бази даних її фактичних параметрів (блоки № 2 і 3). На даному етапі фактична прив'язка до місцевості необхідна для візуальної оцінки проєктувальником або диспетчером розподілу тиску у вузлах мережі та меж зон недостатнього напору. При цьому виконується уточнення місць обладнання контрольних вузлів та додаткове конструювання ділянок мережі.

2. Визначення вузлових витрат для різних режимів водопостачання (блоки № 4 і 6).

3. Визначення витрат в ділянках мережі, що є дійсними на момент виміру п'єзометрів у контрольних вузлах.

4. Уведення значень перепаду п'єзометрів, виміряних в контрольних вузлах, за допомогою програмного модуля для коригування вихідних даних при змінах в роботі системи (блок № 7).

5. Визначення фактичних вільних напорів у вузлах мережі, що відповідають визначеному потокорозподілу. П'єзометричні позначки у вузлах мережі визначаються відносно вузлів живлення відповідно до заданих значень напору в них. Вузли, для яких не виконується умова (4), знаходяться на межах зон недостатнього напору в мережі.

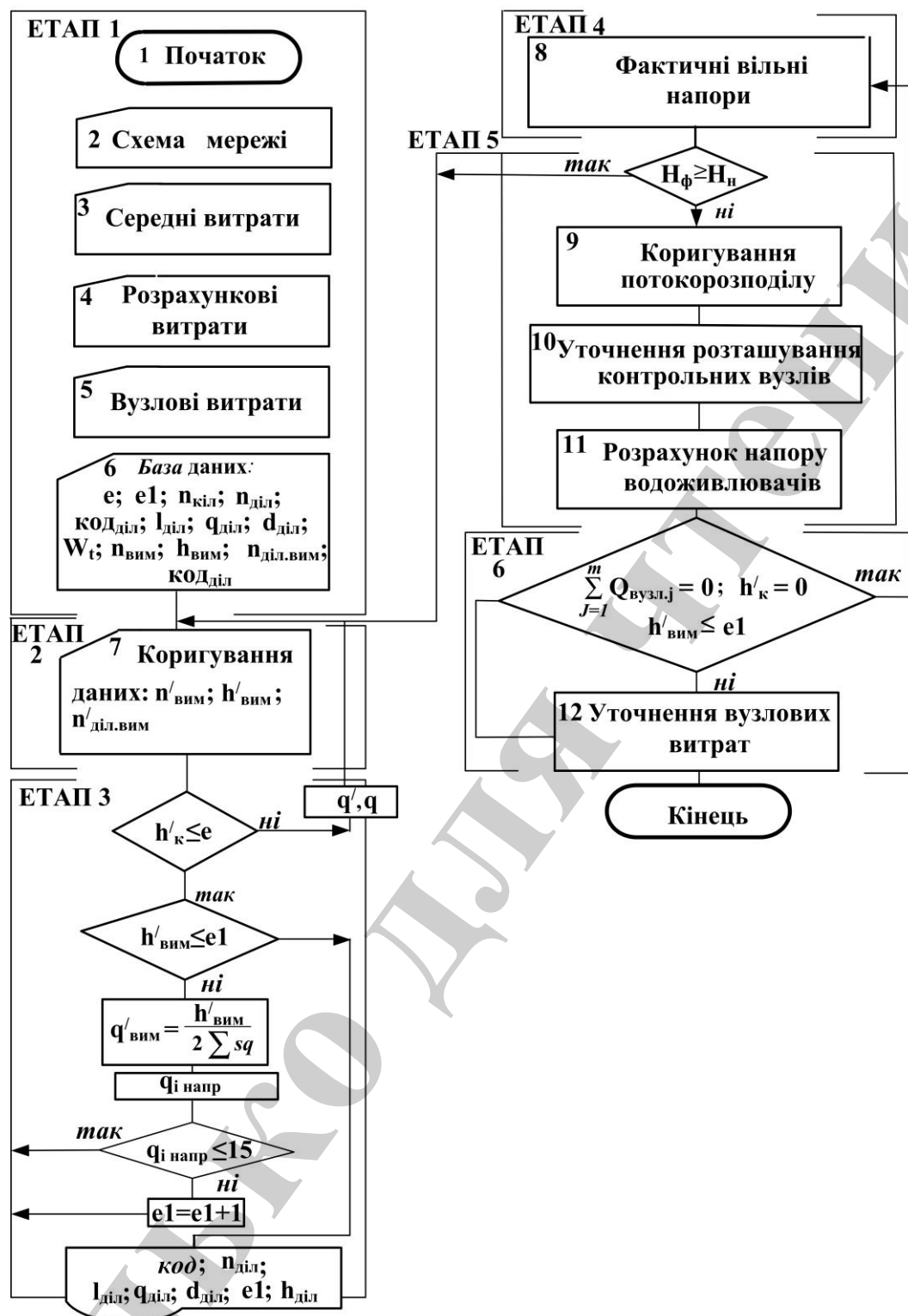


Рис. 5. Етапи методики управління поточкорозподілом: e – допустима нев’язка у кільці; $e1$ – допустима нев’язка на шляху вимірювання тисків; $n_{\text{кіль}}$ – кількість кілець мережі; $n_{\text{діл}}$ – кількість ділянок в мережі; $\text{код}_{\text{діл}}$ – код ділянки; $l_{\text{діл}}$ – довжина i -тої ділянки; $q_{\text{діл}}$ – витрата в i -тій ділянці; $d_{\text{діл}}$ – діаметр труби i -тої ділянки; W_t – матеріал труб; $n_{\text{вим}}$, $n'_{\text{вим}}$ – кількість шляхів вимірювання; $h_{\text{вим}}$, $h'_{\text{вим}}$ – перепад п’єзометрів у вузлах вимірювання; $n_{\text{діл.вим}}$ – кількість ділянок на i -му шляху вимірювання; h'_k – нев’язка в кільці; $q'_{\text{вим}}$ – поправкова витрата; $H_{\text{ф}}$ – фактичний напір в i -му вузлі; $H_{\text{н}}$ – необхідний напір в i -му вузлі

Таким чином, диспетчер має можливість аналізу оперативної або прогнозованої ситуації. Це дозволяє враховувати зміну параметрів роботи мережі внаслідок впливу будь-яких факторів: забудови місцевості, структури водорозбору, зміни пропускної здатності ділянок, врахування рельєфу місцевості при проектуванні.

6. Аналіз витрат в ділянках та вільних вузлових напорів, визначених в умовах реального часу, для уточнення розташування вузлів контролю та обґрунтування поточного розподілу з метою коригування напорів у вузлах.

7. Розрахунок напору водоживлювачів з урахуванням вимірів тиску в окремих точках кільцевої водопровідної мережі.

6. Обговорення результатів дослідження методології управління поточним розподілом в реальному часі

При визначенні кількості та місць обладнання контрольних вузлів у водопровідній мережі, необхідність чого є результатом аналізу утворення зон недостатнього напору (рис. 1, 2), закономірною є констатація залежності між кількістю вузлів та розміром цих зон.

При керуванні поточним розподілом у водопровідних мережах необхідна візуальна оцінка очікуваної зони недостатнього напору. У порівнянні з аналогічними методами встановлення кількості контрольних вузлів [19, 20] позитивна дія результатів дослідження полягає у встановленні взаємозв'язку між кількістю вузлів контролю тиску та площею можливої зони недостатнього напору в мережі. Це дозволяє працівникам диспетчерських служб комунальних підприємств не тільки візуально оцінити ситуацію, але й прийняти рішення за результатами розрахунків. При наявності одного вузла з напором, меншим за необхідний, та збігу його з існуючою точкою контролю тиску, доцільно залишити її незмінною. Критеріями для збільшення кількості контрольних вузлів та визначення розташування є величина мінімального вільного напору у вузлі, що знаходиться на межі очікуваної зони недостатнього напору та її розмір. При $F_{з.н.н}/F_{заг} < 40\%$ достатньо введення одного контрольного вузла з найменшим вільним напором з числа тих, що розташовані на межі очікуваної зони, при $F_{з.н.н}/F_{заг} = 40-60\%$ необхідно обладнання 2-3 додаткових контрольних вузлів, що вибираються за вказаними критеріями.

Порівняння застосування різних методів визначення вузлів контролю тиску для конкретної схеми водопровідної мережі вказує на взаємну сумісність [19].

Вочевидь, основою процесу управління поточним розподілом у проєктованих та діючих водопровідних мережах є визначення та уточнення розташування контрольних вузлів, завдяки чому можна зменшити витрати та енергоспоживання в насосних станціях. Підтримка тиску в контрольних вузлах запобігає виникненню значного перевищення тиску в інших. Наприклад, попередження втрат води при 64 аварійних витоках на протязі року тривалістю в 1 добу для ділянок діаметром 400 мм (0,4 м) дозволяє отримати економію води Q : $Q = 2.5 \times (3.14 \times 0.4^2) / 4 = 0.314 \text{ м}^3/\text{с}$ або 27130 $\text{м}^3/\text{доб}$. З урахуванням 0,04 – коефіцієнту впливу керування поточним розподілом на зменшення витрат при

витоках [8], середнього тарифу на воду 0,82 грн/м³ економія коштів E становить: $E=27130 \times 64 \times 0,04 \times 8,2=567000$ грн/рік.

Але на відміну від результатів досліджень, опублікованих в [17, 18, 20], отримані дані щодо взаємозв'язку між площею зон недостатнього напору та рекомендованою кількістю контрольних вузлів. Наприклад, достовірність способу визначення витоків, який базується на застосуванні діагностичної матриці для чисельних розрахунків гідравлічної моделі [20] залежить від кількості датчиків. Тому методика управління потокорозподілом з урахуванням мінімальної необхідної кількості контрольних вузлів сприяє зменшенню інвестиційних витрат для обладнання таких вузлів.

Зазначені рекомендації з впровадження методики управління потокорозподілом в проєктованих і діючих водопровідних мережах потребують реалізації інтегрованих систем управління технічною інфраструктурою. Як зазначають фахівці [4, 7, 14], цей процес потребує налагодження взаємозв'язку між об'єктами водопостачання. Від комунальних підприємств будуть потрібні початкові капітальні вкладення в систему управління технічною інфраструктурою. Також необхідні витрати на монтаж додаткових та переобладнання існуючих вузлів контролю тиску при необхідності переміщення. Однак більшість комунальних підприємств вже мають автоматизовані системи управління, а додаткова комплектація буде окуплена в термін до 5 років за рахунок зниження витоків та енергоспоживання насосного обладнання.

В статті представлені результати досліджень утворення зон недостатнього напору та аналізу впливу їх розміру на розташування і кількість контрольних вузлів для схем водопровідних мереж, розташованих на території з площею 390 га. Рельєф місцевості впливає на розмір та розташування зон з недостатнім напором, але точність визначення цих зон та принцип вибору вузлів контролю тиску є незмінними для будь-яких вхідних параметрів (продуктивності водопровідної мережі, її топології, рельєфу території).

Представлена методика управління потокорозподілом вимагає ідентифікації вихідних даних для достовірного відображення топології водопровідної мережі та візуального аналізу динаміки вузлових напорів в режимі «он-лайн». Це потребує сучасного комп'ютерного обладнання для налагодження оперативної роботи системи управління потокорозподілом, що для багатьох комунальних підприємств є складним завданням, але необхідною умовою для забезпечення взаємозв'язку системи збору інформації та системи зворотного зв'язку з виконавчими елементами.

7. Висновки

1. В результаті проведених розрахунків визначений вплив розміру зон недостатнього напору на кількість та місця обладнання контрольних вузлів. Встановлено, що критерієм для вибору контрольних вузлів та уточнення розташування є розмір очікуваних зон недостатнього напору. При відношенні площі цих зон $F_{з.н.н.}$ відносно загальної площі $F_{заг}$ $F_{з.н.н.}/F_{заг} \leq 40\%$ достатньо введення одного контрольного вузла. При $F_{з.н.н.}/F_{заг}=40-60\%$, крім існуючої контрольної точки, слід передбачати 2–3 контрольних вузли на межі можливих зон недоста-

тнього напору, моделювання утворення яких виконується на стадії проектування мережі. При уточненні розташування контрольних вузлів в процесі експлуатації рекомендується влаштовувати їх на межі очікуваної зони недостатнього напору, виходячи з її розміру та тенденції до збільшення.

2. Запропонована методика управління потокорозподілом в реальному часі, заснована на моделюванні та аналізі зон напорів в мережі, дозволяє в залежності від потреби змінювати кількість та розташування вузлів контролю тиску. Відмінною рисою такого підходу до керування потокорозподілом є своєчасне попередження аварійних ситуацій, задавання оптимального устрою мережі та режимів експлуатації. Запропонована методика управління потокорозподілом може бути реалізована в роботі диспетчерських служб комунальних підприємств.

Література

1. Jones G. Gravity-driven water flow in networks. John Wiley & Sons, 2011. doi: <https://doi.org/10.1002/9780470939659>
2. Di Nardo A., Di Natale M., Di Mauro A. Water supply network district metering: theory and case study. Springer, 2013. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1493-3>
3. Hulsman A. Climate change, water supply and sanitation: risk assessment, management, mitigation and reduction. IWA Publishing. London, 2015. 408 p.
4. Стан водопровідних мереж України та шляхи запобігання погіршенню якості питної води // Полимерные трубы – Украина. 2013. URL: <http://polypipe.info/news/238-stanvodoprovodnuhmerezhuukraini>
5. Rajakovic-Ognjanovic V., Grgur B. Corroded scale analysis from water distribution pipes // Hemijska industrija. 2011. Vol. 65, Issue 5. P. 507–515. doi: <https://doi.org/10.2298/hemind110523049r>
6. Potential impacts of changing supply-water quality on drinking water distribution: A review / Liu G., Zhang Y., Knibbe W.-J., Feng C., Liu W., Medema G., van der Meer W. // Water Research. 2017. Vol. 116. P. 135–148. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.03.031>
7. Trębicka A. Modeling of water distribution system parameters and their particular importance in environment engineering processes // Inżynieria Ekologiczna. 2016. Issue 47. P. 47–53. doi: <https://doi.org/10.12912/23920629/62846>
8. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Київ, 2013. 172 с.
9. Директива Европейского Парламента и Совета от 29 мая 1997 по сближению законодательств Государств-Членов, касающаяся оборудования, работающего под давлением 97/23/ЕС // Официальный журнал. 1997. № L 181, 09/07/1997. С. 0001–0055.
10. Xhafa S., Avdullahu I., Ahmeti M. Automation Control on Water Supply Networks // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49, Issue 29. P. 175–179. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.098>

11. Yeksayev A. Pipeline Networks E-modelling Based on CityComTM Technology: Experience of Industrial Implementation for Large Water-supply Systems // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 154. P. 107–114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.427>
12. A Graph Theoretical Sectorization Approach for Energy Reduction in Water Distribution Networks / Castro-Gama M. E., Pan Q., Jonoski A., Solomatin D. // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 154. P. 19–26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.414>
13. A Novel Water Supply Network Sectorization Methodology Based on a Complete Economic Analysis, Including Uncertainties / Campbell E., Izquierdo J., Montalvo I., Pérez-García R. // *Water*. 2016. Vol. 8, Issue 5. P. 179. doi: <https://doi.org/10.3390/w8050179>
14. Social Network Community Detection for DMA Creation: Criteria Analysis through Multilevel Optimization / Brentan B. M., Campbell E., Meirelles G. L., Luvizotto E., Izquierdo J. // *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. Vol. 2017. P. 1–12. doi: <https://doi.org/10.1155/2017/9053238>
15. Тевяшев А., Матвиенко О. И. Стохастическая модель и метод зонирования водопроводных сетей // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Т. 1, № 4 (67). С. 17–24. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.21080>
16. Yu F., Li X.-Y., Han X.-S. Risk response for urban water supply network using case-based reasoning during a natural disaster // *Safety Science*. 2018. Vol. 106. P. 121–139. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.03.003>
17. Karathanasi I., Papageorgakopoulos C. Development of a Leakage Control System at the Water Supply Network of the City of Patras // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 162. P. 553–558. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.100>
18. Gençoğlu G., Merzi N. Minimizing Excess Pressures by Optimal Valve Location and Opening Determination in Water Distribution Networks // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 186. P. 319–326. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.254>
19. Kwietniewski M., Kowalski D. The problem of the location of measurement points in monitoring systems of water supply systems // *Gaz, Woda and Sanitary Technique*. 2009. Issue 6. P. 24–29.
20. Stachura M., Fajdek B. Planning of a water distribution network sensors location for a leakage isolation // *Proceedings of the 28th EnviroInfo Conference*. Oldenburg, 2014.