



## Тема 1.6.1 Принципи техніко-економічного розрахунку кільцевих водопровідних мереж


**Мета вивчення теми:** усвідомлення задач техніко-економічного розрахунку кільцевих мереж, засвоєння особливостей розрахунку економічних діаметрів ділянок, засвоєння використання принципів електрогідродинамічної аналогії в розрахунках водопровідних мереж.

### План

1.6.1.1 Сучасні методи розрахунків водопровідних мереж.

1.6.1.2 Розрахунок економічних діаметрів ділянок.

1.6.1.3 Використання принципів електрогідродинамічної аналогії в розрахунках водопровідних мереж.

 **Ключові терміни:** кільцева водопровідна мережа; моделювання стану мереж; поетапна корекція; техніко-економічний розрахунок; економічні діаметри; електрогідродинамічні аналогії; регулюючі ємності.

1.6.1.1. Основою для гідравлічних розрахунків водопровідних мереж є моделювання стану їх роботи. На сьогодні розроблені методики побудови таких моделей. Але навіть при наявності повної інформації щодо параметрів водопровідної мережі побудувати її адекватну модель важко через її розмірність та складність отримання і обробки вихідних даних. Тому застосування математичних моделей, що враховують реальні умови водоспоживання, виконання гідравлічних розрахунків на їх основі є актуальним питанням протягом всіх етапів регулювання потокорозподілу в системах подачі та розподілу води.

Відомий метод поетапної корекції, розроблений Академією комунального господарства, що застосовується для параметричної ідентифікації мереж. Метод вимагає первинного гідравлічного розрахунку мережі за відомою схемою з вузловими витратами й опорами. Потім отримані п'єзометри порівнюються з фактичними; коригуються значення опорів ділянок мережі за співвідношеннями між фактичними й розрахунковими втратами напору по кожній ділянці:

$$S_j^k = S_j^{k-1} (\nabla h_{jp} / \nabla h_{j\phi}), \quad (1.6.1.1)$$

де  $S_j^k$  – опір  $j$ -ої ділянки при  $k$ -ому коригуванні,  $\text{с/м}^2$ ;

$\nabla h_{jp}$  – розрахункове значення п'єзометру, м;

$\nabla h_{jф}$  – фактичне значення п'єзометру, м.

Незважаючи на нескладність, метод має слабку формалізацію та вимагає певної навички інженерів. Крім того, при розрахунках водопровідних мереж припущення щодо нульового тиску води при аварії на діючій мережі є помилковим. Під час аварії витрата води збільшується, що зафіксовано ультразвуковим витратовимірювачем, але тиск води не знижується до нульового значення.

Для магістралей більшої довжини був розроблений метод ідентифікації розрахункової схеми «математичний витратомір». Ідея методу полягала в застосуванні даних багаторазових манометричних зйомок при різних режимах роботи мереж для отримання системи лінійних рівнянь щодо витрат  $X_i$  по ділянках мережі. Автори методу зазначають, що точність рішення залежить від точності приладів, що застосовуються для вимірів тиску. Крім того, здійснювати багаторазову манометричну зйомку у всіх вузлах мережі складно, враховуючи необхідність технічного обладнання.

Для регулювання водних потоків необхідні сучасні системи теледіагностики мереж, вартість яких досить висока як для придбання у власність, так і для аренди, що робить їх доступними для регулярного застосування лише комунальними службами найбільших міст. За результатами такої комплексної діагностики складається анкета, в якій вказуються відомості про населений пункт, стан трубопроводу, стан навколишнього середовища, кількість аварій на мережі, кінцевим результатом досліджень є висновок про вплив часового й іншого факторів на старіння трубопроводу та надійність його роботи. У нашій країні така глибока діагностика трубопроводів не має широкого застосування через високу вартість її проведення. Концепцією визначення першочергового об'єкта відновлення ділянок мережі, а також напрямку регулювання потоків є узагальнення та використання архівних матеріалів з експлуатації мереж, необхідного математичного апарата та автоматизованої системи оцінки. Необхідною умовою здійснення оперативного керування є наявність пакету розрахункових програм. У кожному окремому випадку диспетчеру необхідно ввести інформацію про нові вихідні дані, скласти задачу розрахунку, вибрати необхідну програму та прорахувати всі можливі варіанти, щоб вибрати найбільш оптимальний.

1.6.1.2 Задачею виконання техніко-економічного розрахунку водопровідної мережі є визначення мінімуму функції

$$W = (I / t) \times C_{\text{б}} + C_{\text{ек}}. \quad (1.6.1.2)$$

Як було показано раніше, економічний діаметр можна визначити за формулою

$$D_i = \frac{1}{\varepsilon^{\alpha+m}} \frac{1}{Q^{\alpha+m}} \frac{1}{Q_i^{\alpha+m}}. \quad (1.6.1.3)$$

Але при розрахунках кільцевих водопровідних мереж значення величин  $Q_i$  є невідомими. Тому не можна визначити діаметр ділянки  $D_i$  за формулою (1.6.1.2). Кількість невідомих для кільцевої водопровідної мережі становить  $2p$ . За умовами гідродинаміки можна скласти наступне рівняння:

$$p = n + m - 1. \quad (1.6.1.4)$$

За умови оптимального визначення діаметру:

$$\partial W / \partial D_i = 0 \quad \text{або} \quad \partial W / \partial h = 0 \quad (1.6.1.5)$$

можна скласти  $p$  рівнянь. Таким чином, кількість рівнянь дорівнює кількості невідомих. Але при цьому визначити оптимальні економічні діаметри для найбільш оптимального поточкорозподілу у мережі не можна. Значення розподілу витрат води по ділянках кільцевої мережі, яке відповідає екстремальному значенню функції її вартості, є максимальним, а не мінімальним. Таким чином, поточкорозподіл, що відповідає цьому значенню, буде найменш оптимальним. Оптимальною є не кільцева, а тупикова мережа. У рівнянні (1.6.1.4) повністю не враховуються технічні характеристики мережі. Тому оптимізацію мереж виконують для заданого поточкорозподілу. При цьому задача зводиться до розв'язування рівнянь типу

$$\partial W / \partial D_i = 0 \quad (1.6.1.5)$$

при дотримуванні умов ув'язки

$$\sum h_i = 0 \quad (1.6.1.6)$$

для всіх контурів мережі.

Для окремого водовода, можна записати формулу приведеної величини щорічних витрат

$$W = 0,01[(E+p)\sum(a+bD_i^\alpha)l_i + P(H_0 + \sum h_i)Q], \quad (1.6.1.7)$$

де  $E$  – коефіцієнт порівняльної ефективності, який визначається за формулою

$$E = 1/t, \quad (1.6.1.8)$$

де  $t$  – розрахунковий термін окупності;

$a$  і  $b$  – коефіцієнти, які залежать від матеріалу труб і місцевих умов;

$l_i$  і  $D_i$  – довжина ділянки і її діаметр відповідно;

$H_0$  – геометрична висота підйому;

$\sum h_i$  – сума втрат напору на ділянках, які з'єднують початковий і кінцевий вузли мережі за одним з можливих напрямків;

$Q$  – витрата води об'єктом;

$P$  – параметр, який визначається за формулою

$$P = \frac{(E + \delta') \times f \times r + 8760 \times \sigma \times \gamma}{102 \times \eta}, \quad (1.6.1.9)$$

де  $f$  – вартість станції за 1кВт встановленої потужності;

$r$  – коефіцієнт запасу використання насосного обладнання;

$\gamma$  – коефіцієнт, який характеризує нерівномірність споживання електроенергії;

$p'$  – витрати на поточний ремонт насосної станції.

Якщо у формулі (1.6.1.7) записати значення витрат напору  $h_i$  через параметри  $D_i$  і  $Q_i$  та виконати диференціювання рівняння (1.6.1.7) за параметром  $D_i$ , то одержимо систему рівнянь для визначення діаметрів.

Визначення економічно найвигіднішого діаметру ділянки кільцевої мережі може бути приведено до вигляду:

$$D_i = \frac{1}{\partial^{\alpha+m}(x_i Q)} \frac{1}{\alpha+m} \frac{\beta}{Q_i^{\alpha+m}}, \quad (1.6.1.10)$$

де  $x_i$  – коефіцієнти, які приймають рівними фіктивним витратам, що будуть проходити по ділянках мережі при пропусканні через неї транзитом умовної витрати, яка дорівнює одиниці, для ув'язаної за фіктивними витратами  $q_i$  мережі.

Коефіцієнти  $x_i$  характеризують розташування окремих ділянок мережі та їх вплив на загальну роботу мережі. Якщо знайти коефіцієнти  $x_i$  та визначити найбільш вигідні діаметри мережі, то можна визначити теоретично мінімальну приведену величину витрат для всієї системи. З урахуванням необхідності використання стандартних діаметрів замість розрахункових у формулах для їх розрахунку використовують значення  $x_i$ , які визначають при першому розподілі потоків відповідно до вимог збереження балансу витрат у вузлах але без ув'язки за фіктивними витратами.

1.6.1.3 Принципи електрогідродинамічної аналогії (ЕГДА) був запропонований акад. Н.Н. Павловським і успішно використаний для дослідження законів і шляхів фільтрації води через гідротехнічні споруди [17, 23, 33]. Цей же принцип з деякими змінами застосовується і для розрахунку водопровідних мереж.

Падіння потенціалу в мережі відповідно до закону Ома дорівнює

$$U = r \times J. \quad (1.6.1.11)$$

де  $U$  – напруга струму;

$R$  – опір;

$J$  – сила струму.

Падіння потенціалу є процес аналогічний втратам напору, сила струму – витраті води  $Q$ , а опір провідника – гідравлічному опору трубопроводу  $S$ . Втрати напору для ламінарного потоку

$$h = S \times Q. \quad (1.6.1.12)$$

В цьому випадку спостерігається повна аналогія. Але режим руху води в трубах не ламінарний, а турбулентний та визначається за формулою

$$h = S \times Q^\beta. \quad (1.6.1.13)$$

Для того, щоб руху води був аналогічний руху струму, необхідно визначити опір провідника за формулою

$$r = S \times J^{\beta-1}. \quad (1.6.1.14)$$

Тоді

$$U = S \times J^{\beta-1} \times J = S \times J^\beta. \quad (1.6.1.15)$$

Таким чином, якщо замінити ділянки водопровідних мереж резисторами із визначенням опору за формулою (1.6.1.15), у вузли надходження води подати струм відповідної сили, із вузлів відбору води відвести струм, то сила струму в кожній ділянці буде дорівнювати витратам води у відповідних ділянках водопроводу. Дійсно, якщо розглянути як описуються електричні і водопровідні мережі, то можна визначити аналогії, зазначені у таблиці 1.6.1.1.

Таблиця 1.6.1.1. Аналогії між рухом води та рухом струму у мережі

Для електричної мережі	Для водопровідної мережі:
Напруга $U = rJ^\beta$ ,	Втрати напору $h = SQ^\beta$ ,
Сума значень сили струму у вузлах $\sum J_{\text{вузл.}} = 0$ ,	Сума вузлових витрат води $\sum Q_{\text{вузл.}} = 0$ ,
Сума значень напруги у ділянках, що розташовані по контуру електричної мережі $\sum U_k = 0$ .	Сума втрат напору у ділянках, що розташовані по контуру водопровідної мережі $\sum h_k = 0$ .

Подібні аналогії справедливі тільки для нелінійної зміни опору резистора. Джерело постійного струму з квадратичним внутрішнім опором моделює характеристику Q-H відцентрових насосів. Заряд ємності та процес наповнення резервуару описуються рівняннями одного виду.

На сьогодні у сфері управління роботою водопровідних мереж в нашій країні застосовуються програмні продукти, орієнтовані на геоінформаційні технології, придатні для формування вихідних даних шляхом імпортування файлів з існуючих геоінформаційних систем, надається увага удосконаленню систем подачі і розподілу води із врахуванням зміни їх параметрів в процесі експлуатації.

Безпосереднє використання імпортування необхідних даних з електронних моделей у схеми мереж для виконання розрахунків можливо для невеликих мереж, при цьому складно забезпечувати адекватність розрахункових схем та водопровідних мереж .

Програма EPANET, розроблена Льюїсом Росманом (Відділ водних ресурсів та водопостачання Національної дослідницької лабораторії управління ризиками Цинцинатті, США) виконує гідравлічні розрахунки на основі «градієнтного алгоритму» з визначенням втрат напору за формулами Хазена-Вільямса, Дарсі-Вейсбаха, Шезі-Манінга, аналізує зміни якості води: концентрації хімічних речовин в мережі протягом тривалого часу, має підоснову для складання топографічних схем, задає зміни режимів водоспоживання. Програма має перелік статистичних помилок між змодельованими та замірними величинами в будь-якому місці виконання заміру, що дозволяє оцінити відхилення від нормативних параметрів та визначити пріоритетність напрямку коригування.

Комплексна топографічно-інформаційна система для комунального господарства Watercad 6.0 проектує системи водопостачання, моделює роботу водопровідних мереж для різних гідравлічних режимів, має можливість контролю якості води в будь-якому вузлі, виконує економічні розрахунки системи. Функція візуального відтворення зон розподілу тиску дозволяє оцінити ситуацію при зміні умов водоспоживання та визначити місцями контролю тиску. Але керуючий вплив на основі візуального аналізу вузлових напорів носить суб'єктивний характер.

Шляхи модернізації водопровідних мереж зосереджуються на дослідженні стану внутрішньої поверхні трубопроводів та їх залишкового ресурсу, моделюванні аварійних ситуацій знаходженні місць витоків при наявності повної інформаційної бази, застосуванні інформаційних систем для контролю гідравлічних характеристик мережі.

## **? Питання для самоконтролю**

1. В чому полягає принцип застосування методу поетапної корекції?
2. В чому полягає принцип застосування методу ідентифікації розрахункової схеми «математичний витратомір»?
3. Чим відрізняється метод наближених обчислень для гідравлічних розрахунків мереж від контурного та вузлового методів?
4. Як визначити економічно вигідний діаметр ділянки водопровідної мережі?
5. Яким чином застосовується метод ЕГДА для розрахунків водопровідних мереж?