

Добровольська О.Г., Українець М. О., проф., к.т.н.,

В статті йде мова про оптимізацію управління потокорозподілом у водопровідних мережах. З цією метою пропонується використовувати розроблену програму, що дозволяє визначати витрати води на ділянках мережі на основі значень тиску, що замірюється в її окремих вузлах.

В статье идет речь об оптимизации управления потокораспределением в водопроводных сетях. С этой целью предлагается использовать разработанную программу, которая позволяет определять расходы воды на участках сети на основе значений давления, измеренного в отдельных ее узлах.

The article deals with the optimization of flow control in water networks. For this purpose it is proposed to use the developed program, which allows to determine the costs of water on parts of the network based on the values of pressure measured in individual nodes.

Надання споживачам послуг належної якості з урахуванням зменшення енергоємності виробництва та перехід на економне витрачання енергоресурсів є однією з головних задач, що стоять перед українськими підприємствами комунального господарства в умовах ринкової економіки, є [1]. Ключовою ланкою вирішення цієї проблеми є забезпечення необхідного напору води для споживачів. Це пов'язано з роботою диспетчерської служби, головною задачею якої є забезпечення економічності роботи насосного обладнання. Одним із шляхів реформування водопровідно-каналізаційного господарства є модернізація систем подачі і розподілу води. Всі роботи по її реалізації повинні базуватись на гідравлічних розрахунках, результати яких дозволяють диспетчерським службам комунальних підприємств адекватно оцінювати стан потокорозподілу в мережах. Це дає можливість оптимізувати їх роботу, в результаті чого усуваються перевантаження мереж, скорочуються витрати внаслідок недопущення надмірних напорів та зменшується енергоємність водопостачання. Ефективне керування роботою кільцевих водопровідних мереж вимагає знання реальної картини розподілу напорів в вузлах мережі та витрат води в окремих її ділянках та у вузлах відбору води з них.

На сьогодні диспетчерські служби мають у своєму розпорядженні програмні продукти [2-6], які дозволяють зберігати та накопичувати інформацію щодо структури мережі, параметрів роботи її елементів, виконання необхідних гідравлічних розрахунків. В більшості випадків ці системи інформують диспетчера про напори в деяких точках мережі в цифровому чи програмному зображенні, про характеристики водоживлювачів та резервуарів, а також дають аналітично-графічне зображення мережі та її елементів. При цьому може передбачатися розрахунково-графічна обробка інформації, яка надходить, для окремих статичних моментів.

Вимоги енергозбереження стимулюють пошук шляхів вдосконалення автоматичного регулювання напору насосних станцій. Нові правила [7] технічної експлуатації систем водопостачання і водовідведення орієнтують на управління насосних станцій по напору в диктуючій точці. Аналіз літературних джерел [8] показав, що напір на виході більшості насосних станцій, що діють в системах водопостачання, регулюється перемиканням агрегатів або засувками на виходах. Фахівцями [8] запропоновано вдосконалення управління потокорозподілом за рахунок переходу від двохступінчатого графіка вихідного напору до більш гнучкішого, що відображає процеси змінення водоспоживання по годинам доби. Але при управлінні роботою водопровідних мереж недостатньо уваги приділяється можливості визначення дійсного потокорозподілу на основі результатів вимірювання тисків в окремих її вузлах.

Отримання повної картини розподілу параметрів, які характеризують роботу мережі, - складна задача. Це пояснюється не тільки складністю інструментального вимірювання окремих показників, але й розмірами систем подачі і розподілу води. Крім того, як правило, в кільцевих водопровідних мережах витрати води в ділянках не вимірюються тому, що існуючі лічильники мають направлену дію, а напрям руху води на ділянках змінюється в залежності від характеру водорозбору. Практично витрати води контролюються тільки на великих водоводах, а в окремих ділянках оцінюються опосередковано по динаміці напорів. Витрати окремих споживачів оперативно взагалі не вимірюються (за виключенням окремих великих споживачів). Все це створює певні труднощі для диспетчерів, які оперативно керують роботою систем подачі і розподілу води.

Для підвищення ефективності оперативного керування розподілом потоків в кільцевій мережі необхідно знати в реальному часі витрати води в кожній магістралі. Отримати всю картину розподілу потоків за рахунок її інструментального вимірювання неможливо. Цей розподіл формується з одного боку відборами окремих споживачів, а з іншого-гідравлікою роботи кільцевої мережі.

Враховуючи, що визначати витрати всіх окремих споживачів неможливо в силу їх стохастичності, то доцільно уточнювати потокорозподіл в магістралях мережі, в яких стохастична складова в значній мірі нівелюється.

Вирішення згаданої вище задачі не може бути здійснено за допомогою традиційних методів гідравлічного розрахунку кільцевої мережі. Тому необхідно запропонувати новий метод, який дозволяв би практично розв'язати цю задачу.

Будь-яка диспетчерська служба в своєму розпорядженні має схему системи подачі і розподілу води з характеристиками трубопроводів, споживачів та загальної подачі води в мережу. Але в процесі експлуатації мереж гідравлічний опір трубопроводів зростає. Ці змінення неможливо врахувати відповідно дійсності при гідравлічних розрахунках. Як свідчить теорія розрахунку кільцевих водопровідних мереж, для аналітичного визначення витрат треба визначити m -рівнянь (де m - кількість вузлів). Реальна експлуатація будь-якої водопровідної мережі не обходиться без контролю тиску в одному або кількох вузлах мережі.

Розглянемо особливості поточкорозподілу в кільцевій мережі з контролюванням тисків в характерних точках. Розподіл потоків по території міста можна розглянути як деяку віртуальну поверхню над містом (рис.1) на висотах над окремими вузловими точками, які визначаються рівнянням:

$$P_i \geq Z_i + H_i, \quad (1)$$

де Z_i - позначка поверхні землі в i -му вузлі;

P_i - пезометрична позначка в i -му вузлі;

H_i - вільний напір в i -му вузлі.

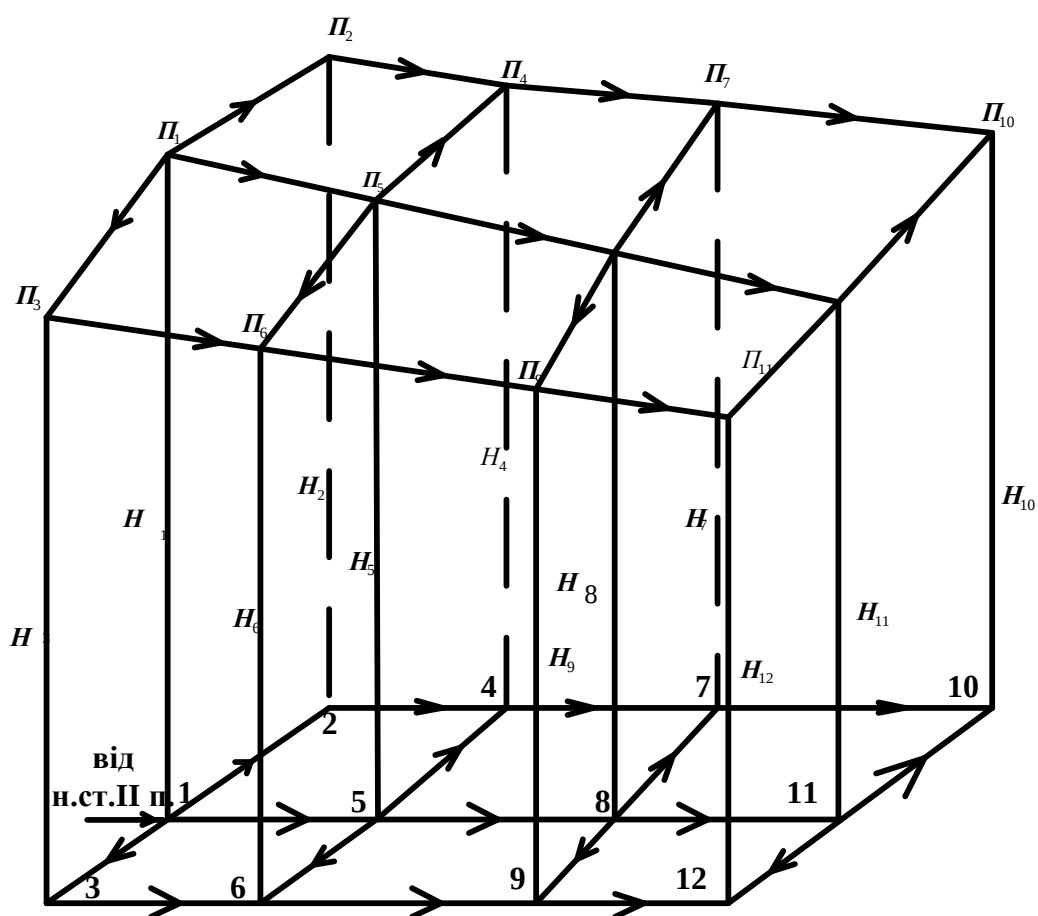


Рисунок 1 – Формування п'езометричної поверхні при розподілу води мережею міста

Вид цієї віртуальної поверхні буде повністю відображати поверхню гідравлічного потоку в водопровідній мережі, яка описується відомими співвідношеннями:

$$\sum Q_{\text{вузл}} = 0; \quad \sum h_k = 0, \quad (2)$$

де $\sum Q_{\text{вузл}}$ - алгебраїчна сума витрат в вузлах мережі;

$\sum h_k$ алгебраїчна сума втрат напору в окремих кільцях мережі.

Якщо виміряти тиски в окремих точках мережі, то вони зафіксують відповідні точки віртуальної поверхні, які в свою чергу зафіксують відповідні втрати напорів в окремих напрямках, що контролюються. В кожний момент експлуатації мережі витрати води в окремих ділянках невідомі, але вони формуються згідно

зі співвідношеннями (2). Якщо забезпечити виконання цих співвідношень, то в окремих ділянках мережі будуть отримані витрати, які забезпечують сумарні втрати напору між вузлами, які були визначені інструментально, та які будуть відрізнятися від реальних тільки за рахунок коливань між величинами відборів окремих споживачів. На основі цього можна розробити спосіб визначення витрат води в кожній ділянці водопровідної мережі і втрат напору в них.

Розглянемо водопровідну мережу, в окремих точках якої вимірюються тиски (рис.2).

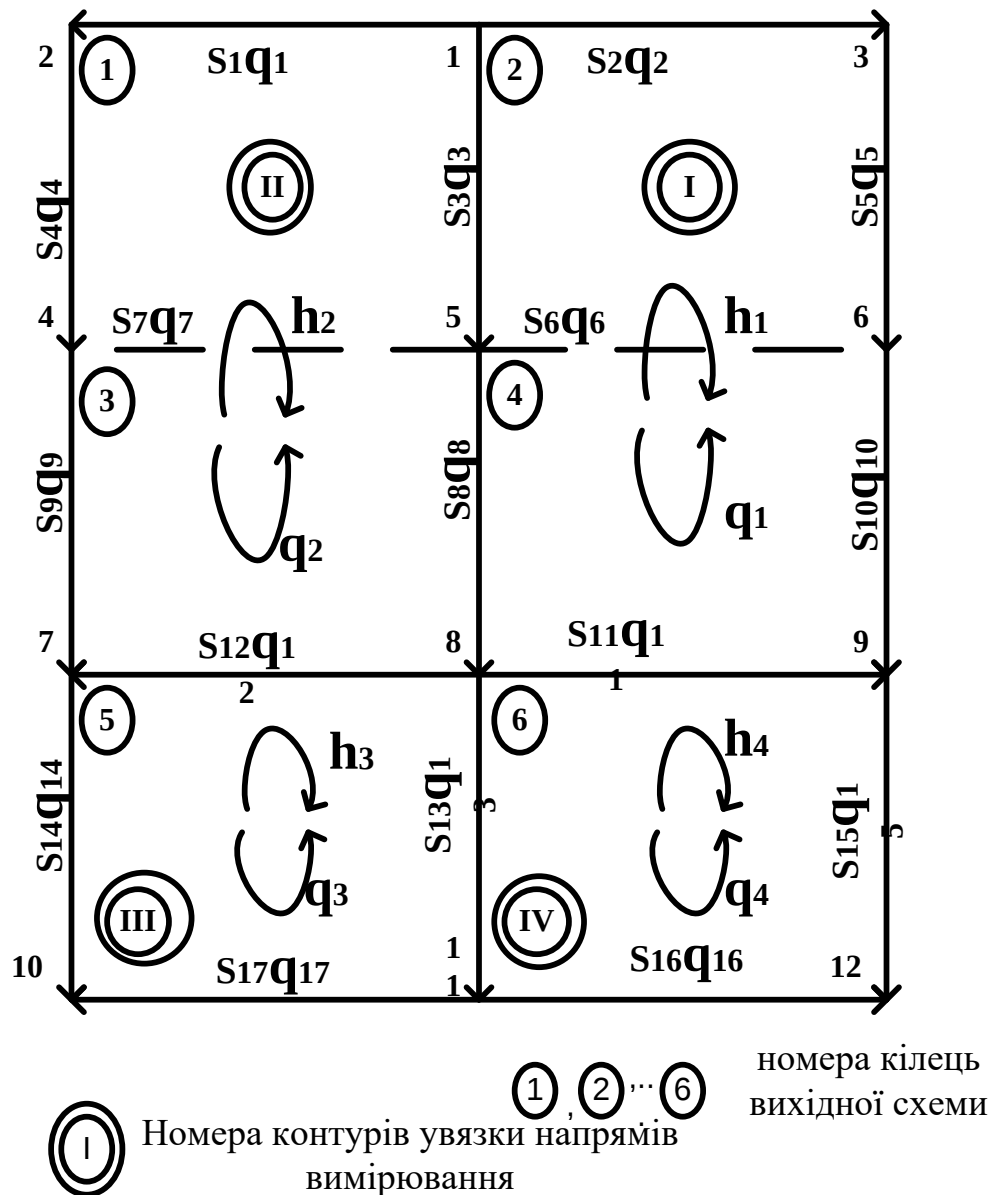


Рис 2 - Ув'язувальні контури напрямів вимірювання
(1,8,10,12-вузли вимірювання тисків)

Для кожної кільцевої мережі у сталому режимі повинні виконуватись умови (2).Тоді для будь-яких напрямів, які з'єднують точки вимірювання, справедливі співвідношення

$$\Delta h_1 = \Delta h_2 = \dots = \Delta h_i = \dots \Delta h_n, \quad (3)$$

де $\Delta h_1, \Delta h_2, \dots, \Delta h_i, \dots, \Delta h_n$ - втрати напорів на ділянках напрямків 1,2,...,i,...,n.

Для того, щоб ув'язати мережу з врахуванням відповідних вимірних перепадів у відповідні кільця необхідно внести виправлення, які описуються рівнянням

$$\Delta h_i^{kv} - 2 \sum (sq)_i^{kv} \pm \sum (sq)_{д.л.}^{kv} \Delta q_{сум.к}^{kv} = 0, \quad (4)$$

де kv - індекс кілець вимірювання при їх ув'язці ;

$\sum (sq)_i^{kv}$ - сумарні добутки $(sq)_i^{kv}$ для i-го кільця ув'язки контуру вимірювання;
 $\sum (sq)_{д.л.}^{kv}$ - сумарні добутки ділильних ліній;
 $\Delta q_{сум.к.}^{kv}$ - виправлювальні витрати суміжних з тим кільцем, яке розглядається.

Особливістю розв'язування цієї задачі являється те, що воно аналогічне ув'язці кільцевої мережі після того, як в неї вносяться виправлення, які враховують неспівпадання розрахункового перепаду тисків з вимірним. Аналіз особливостей ув'язки водопровідної мережі з врахуванням результатів вимірювання тисків в окремих вузлах показує, що загальна виправлювальна витрата описується рівнянням:

$$\Delta q = \frac{\Delta h - \sum q_i \Delta q_i}{2 \sum (sq)^{kv}}, \quad (5)$$

де Δh_i - нев'язка в i-му кільці без врахування результатів вимірювання;

$s_i q_i$ - добуток sq для i-го кільця;

Δq_i^{kv} - виправлювальна витрата контуру вимірювання для i-го кільця;

$\sum (sq)^{kv}$ - сума $(sq)^{kv}$ для контуру вимірювання.

Враховуючи, що при керуванні існуючою водопровідною мережею її структура, геометричні розміри, діаметри труб, їх матеріал (а отже і s_0) відомі, невідомими будуть тільки витрати на ділянках. Тоді загальна кількість невідомих в кільцевій мережі з p – ділянками також буде p , тобто в ній витрати визначаються однозначно, якщо не враховувати можливі зміни опорів ділянок в процесі експлуатації (кількість невідомих витрат дорівнює кількості рівнянь, які можна скласти за умови гідравліки роботи кільцевих водопровідних мереж).

Виконані дослідження дозволяють реалізувати достатньо простий спосіб прогнозування витрат води у всіх ділянках водопровідної мережі, а отже і витрат напору в них. Алгоритм прогнозування розподілу потоків в мережі в реальному часі зводиться до наступного:

- підготувати розрахункову схему поточкорозподілу в існуючій мережі;
- визначити розрахункові втрати напорів між вузлами підключення водоводів і кожним вузлом, в якому вимірюється тиск;
- визначити відхилення між розрахунковими витратами на кожному із шляхів та відповідними різницями тисків між показаннями манометрів на кінцях шляхів, які розглядаються;
- у всі шляхи, що розглядаються, внести виправлювальні витрати, які б ліквідували різниці в сумарних розрахункових та вимірювальних витратах;
- провести повторну ув'язку мережі, яка показує при яких витратах в ділянках мережі досягаються виміряні перепади тисків.

Враховуючи, що оперативне керування відбувається на існуючій мережі, цей алгоритм можна реалізувати на ПЕОМ. При розробці відповідних програм можна дотримуватись наступних рекомендацій:

А) Розрахункова схема поточкорозподілу в існуючій мережі необхідна як еталон для порівняння розрахункових витрат напору з тими, що вимірюються. Її створення базується тільки на тій подачі, яка надходить в мережу і при постійній подачі або подачі, яка змінюється в невеликих межах, вона може бути однією і тою ж (або їх кількість може бути рівною кількості ступенів подачі насосної станції другого підйому). При цьому її уточнення немає необхідності, тому що її результати корегуються вимірюваннями реальних тисків. При створенні такої схеми виникає питання розподілу потоків по тих магістралях, що виходять з вузла, до якого приєднуються водоводи. Враховуючи корекцію потоків за результатами вимірювання, першопочатковий розподіл загальної витрати по окремих магістралях можливо брати пропорційним діаметрам магістралей, що виходять з вузла приєднання водоводів.

Б) Розподіл по ділянках відхилення між розрахунковими та вимірними витратами тисків на напрямках від вузла 31 до вузла вимірювання визначається за формулою

$$\Delta q_{(i-y)n}^{kv} = \frac{s_{i-y} \Delta M}{\sum (s_0 l)_n} n, \quad (6)$$

де $\Delta q_{(i-y)n}^{kv}$ - уязувальна витрата для ділянки n-ої магістралі з початковим вузлом i та кінцевим вузлом y , яка повинна ліквідувати різницю між розрахунковими та виміряними втратами напорів;
 s_{i-y} - повний опір ділянки $i-y$;

$\sum (s_0^l)_n$ - сума повних опорів на ділянках n -ої магістралі від вузла №1 до вузла вимірювання тиску;
 ΔM_n - різниця показів манометрів у вузлі 31 та в кінцевій точці n -ої магістралі.

В) Метод ув'язки кільцевої мережі принципового значення не має і може бути будь-яким з тих, які використовуються зараз.

На кафедрі водопостачання та водовідведення Запорізької державної інженерної академії розроблені програми Gidrast2.for і Gidrast3.for, які дозволяють ув'язувати кільцеві водопровідні мережі з врахуванням результатів вимірювання тисків в окремих її вузлах.

В основу задачі дослідження аналітичних можливостей цих програм покладено:

- встановлення розбіжностей між результатами розрахунку за пропонуєними алгоритмами та класичними методами гідравлічного розрахунку;
- вибір шляху вимірювання перепадів тисків на ділянках мережі;
- визначення оптимальної кількості вузлів вимірювання тиску;
- оцінка можливості забезпечення коливань подачі з урахуванням встановленого насосного обладнання на основі аналізу гідравлічних режимів реальної водопровідної мережі.

Фактично суть задачі зводиться до того, щоб для відомої структури і конструкції мережі визначити можливі витрати на її ділянках і втрати напорів в них, при яких перепади у вузлах, які контролюються інструментально, дорівнюють виміряним. Якщо досягти умов ув'язки по вибраних напрямках вимірювання тисків при 15 циклах наближення не вдається, збільшується пошарово перепад напорів між вузлами вимірювання на 0,1 м, і цикл наближення повторюється. Після ув'язки мережі друкуються результати кінцевої ув'язки та максимальна величина нев'язки перепадів напорів між контрольними точками, при якій досягається ув'язка кільцевої мережі. При цьому вихідна поверхня деформується. Але ця деформація буде тільки на ділянках між окремими вузлами, враховуючи те, що у вузлах, де напір контролюється, положення точки не змінюється.

З цієї метою були проаналізовані результати гідравлічних розрахунків, проведених на основі 6 схем водопровідних мереж з різною кількістю вузлів живлення (від 1 до 3) з однаковою та змінною довжиною ділянок та 2 схем реальних водопровідних мереж для м. Ялта і м. Запоріжжя в залежності від кількості вузлів вимірювання тисків та варіації перепадів напорів між цими вузлами.

Методика дослідження. Формування вхідних даних для проведення досліджень полягає у визначенні фактичних параметрів водопровідної мережі (витрати кожної ділянки, їх довжини, діаметрів), кодів ділянок, перепаду тиску між вузлами вимірювання, який необхідно забезпечити, точності розрахунків сумарних втрат напорів в кільцях і на шляху вимірювання. За цими даними проводиться ув'язка водопровідної мережі за допомогою вказаних програм з врахуванням сумарної втрати напорів між вузлами вимірювання. Перевіряється ув'язка мережі для розглянутих варіантів. Отримані результати співставляються з результатами початкових вхідних даних. Визначаються абсолютні відхилення витрат води

Δq_i і втрат напору Δh_i за формулами:

$$\Delta q_i = q_{1i} - q_{2i} \quad (7)$$

$$\Delta h_i = h_1 - h_2 \quad (8)$$

де q_{1i} , h_{1i} - відповідно витрата води та втрати напорів на i -ій ділянці за вихідною схемою, л/с;
 q_{2i} , h_{2i} - витрата води та втрати напорів на відповідній ділянці за результатом гідравлічного розрахунку з врахуванням необхідної сумарної втрати напорів між вузлами вимірювання, м.

Відхилення витрат води P_{qi} на кожній ділянці і втрат напорів P_{hi} у відносному значенні визначаються за формулами:

$$P_{qi} = \frac{q_{1i} - q_{2i}}{q_{1i}} \cdot 100\% \quad (9)$$

$$p_{hi} = \frac{h_{1i} - h_{2i}}{h_{1i}} \cdot 100\% \quad (10)$$

Результати досліджень отримані із використанням програми Microsoft Office Excel у вигляді порівняльних таблиць, за даними яких побудовані діаграми.

Аналіз результатів гідравлічних розрахунків, проведених на основі 6 схем водопровідних мереж з різною кількістю вузлів живлення (від 1 до 3) та кількістю кілець від 6 до 16 показав, що при неспівпаданні напрямків руху води на ділянках на шляху вимірювання використання вищевказаних не забезпечує виконання умови нерозривності суцільності потоку, тобто $\sum Q_{вузл} \neq 0$. Порухення балансу витрат у вузлах тим більше, чим більше відрізняються між собою витрати по ділянках за вихідними даними та витрати, отримані з урахування розрахункового перепаду тиску між обраними точками. Друга умова ув'язки мережі $\sum h_{kil} = 0$ виконується для всіх випадків, при цьому нев'язка на шляху вимірювання не більше 0,1 м. Вибір точок вимірювання на кінцях шляху, де ділянки мають потоки, які розходяться, але мають дуже невеликі втрати напорів, не впливає на результати прогнозування. На рис. 3 у вигляді діаграм представлені результати аналітичного визначення витрат на ділянках для фрагменту водопровідної мережі м. Запоріжжя. Шлях вимірювання перепаду тиску складався з ділянок з однаковим напрямом руху води (за виключенням діаграми №4), значення розбіжностей між витратами на ділянках в абсолютному відношенні не перевищило 1,6 %.

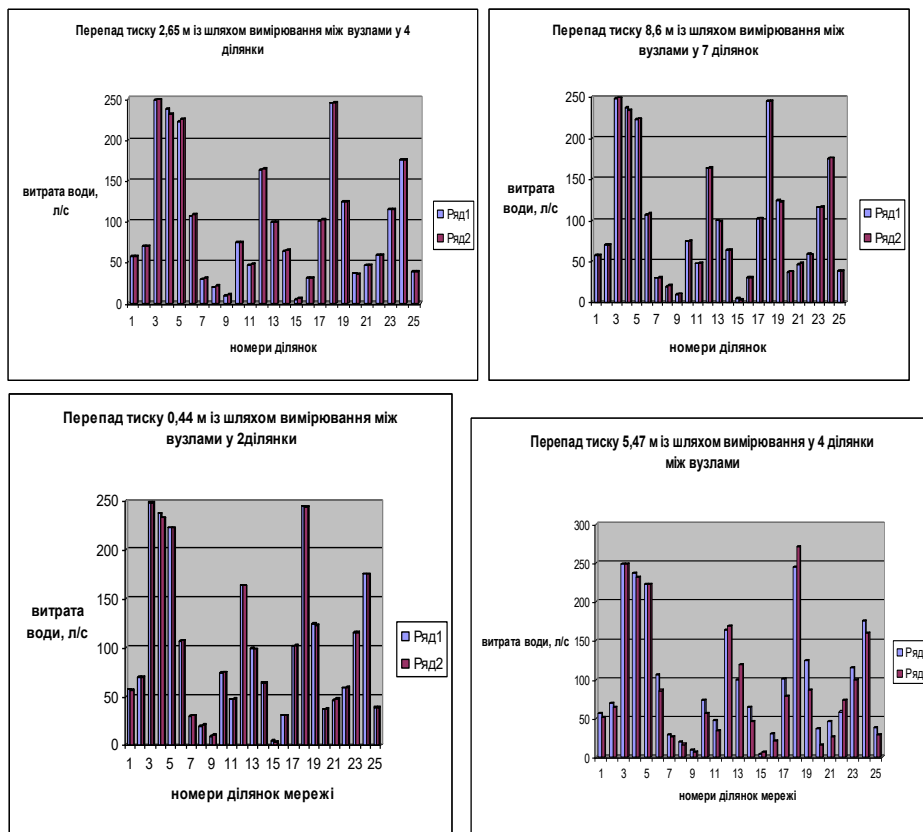


Рис. 3 –Аналіз результатів розрахунку мережі за вихідною схемою та розрахунку із урахуванням перепаду тиску між вузлами вимірювання (для схеми фрагменту водопровідної мережі м. Запоріжжя)

Аналіз можливості забезпечення коливань подачі води в мережу з урахуванням встановленого насосного обладнання було проведено на основі схеми фрагменту водопровідної мережі м. Ялта. Результати розрахунку мережі при варіації перепадів тиску від 0 до 20% із шляхом вимірювання між вузлами у 4 ділянки представлені на рис. 4.

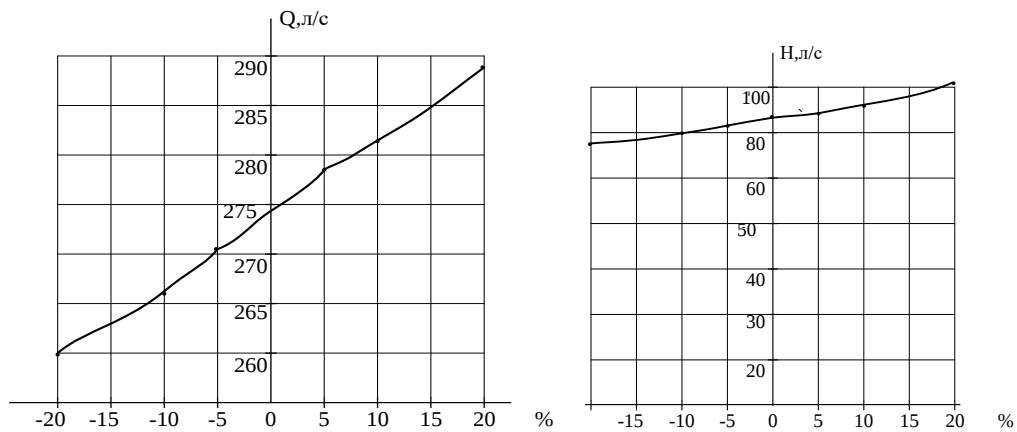


Рис. 4- Результати розрахунку змінення витрати води, що подається в мережу та напору насосів другого підйому при змінненні тиску в мережі

Для даного прикладу встановлене насосне обладнання дозволяє забезпечувати перепади подачі води в мережу в межах робочої зони.

Висновки: Програми Gidrast2.for і Gidrast3.for придатні для аналітичного визначення витрат ділянок кільцевої водопровідної мережі і втрат напору в них на основі вимірювання напорів в обмеженій кількості вузлів. Програми дають такі ж результати гідравлічних розрахунків, як і при класичному методі, при умові, коли вимірювання перепадів тисків на магістральних лініях робиться між вузлами, розташованими на послідовних ділянках з однаковим напрямком руху води. При невпевненості, що напрям руху буде однаковий, необхідно обрати кілька вузлів на шляху вимірювання так, щоб напрям руху води між двома вузлами був однаковим. Використання цих програм дозволяє по невеликій кількості контрольних точок на мережі прогнозувати розподіл потоків в її ділянках та полегшує оперативне прийняття рішень при керуванні роботою водопровідної мережі.

Таким чином при невірному виборі точок вимірювання отриманий результат не відповідає фактичним витратам по ділянкам мережі.

вибір точок вимірювання на кінцях шляху, де ділянки мають потоки, які розходяться, але мають дуже невеликі втрати напорів, не впливає на результати прогнозування.

При цьому був обраний однаковий напрям руху води. Таким чином, рекомендується вибирати точки вимірювання на послідовних ділянках з однаковим напрямом

Суть задачі зводиться до того, щоб для відомої структури і конструкції мережі визначити можливі витрати в мережі і втрати напорів в них, при яких перепади у вузлах, які контролюються інструментально, дорівнюють виміряним. Якщо досягти умов ув'язки про напрямках при 15 циклах наближення не вдається, збільшується допустимий перепад напорів між вузлами вимірювання на 0,1 м, і цикл наближення повторюється. Після ув'язки мережі друкуються результати кінцевої ув'язки та максимальна величина нев'язки перепадів напорів між контрольними точками, при якій досягається ув'язка кільцевої мережі.

Мета роботи: перевірити можливість аналітичного визначення витрат ділянок кільцевої водопровідної мережі і втрат напору в них на основі вимірювання напорів в обмеженій кількості вузлів за допомогою програми Gidrast2.for.

Задачі дослідження:

- а) виконати аналіз результатів гідравлічних розрахунків кільцевої мережі:
 - з однією точкою живлення і однаковою довжиною ділянок;
 - з однією точкою живлення і змінною довжиною ділянок;
 - з кількома точками живлення і однаковою довжиною ділянок;
 - реальної кільцевої мережі;
- б) перевірити можливість визначення витрат води і втрат напорів у всіх розглянутих мережах при двох вузлах вимірювання тисків;
- в) провести аналіз змін витрат і втрат напорів на ділянках кільцевих мереж в залежності від кількості вузлів вимірювання тисків;
- г) провести аналіз змін витрат і втрат напорів на ділянках кільцевих мереж в залежності від варіації перепадів напорів між вузлами вимірювання;
- д) зробити загальні висновки та розробити рекомендації відносно використання програми Gidrast2.for і Gidrast3.for.

Висновки

1. Результати дослідження показали можливість використання програми Gidrast2.for для прогнозування розподілу витрат і втрат напорів на ділянках діючої водопровідної мережі.
2. Програма дає такі ж результати гідравлічних розрахунків, як і при класичному методі, коли вимірювання перепадів тисків на магістральних лініях робиться між точками, які розташовані на послідовних ділянках з однаковим напрямком руху води (при кількості

- ділянок між точками вимірювання не більше чотирьох).
3. Коли між точками вимірювання є ділянки, в яких потоки сходяться або розходяться в проміжному вузлі результати ув'язки не співпадають з результатами, отриманих класичним методом. Відхилення тим більше, чим більші втрати напорів на ділянках на шляху вимірювання, де потоки сходяться або розходяться.
 4. При неспівпаданні напрямків руху води на ділянках на шляху вимірювання використання програми `Gidrast2.for` не забезпечує виконання умови нерозривності суцільності потоку, тобто $\sum_{\text{вузл.}} Q \neq 0$. При цьому друга умова ув'язки мережі при отриманні нових результатів завжди виконується з нев'язкою на шляху вимірювання не більшою 0,1 м.
 5. При прогнозуванні витрат між точками вимірювання, які мають кількість ділянок більше чотирьох, загальний шлях вимірювання необхідно розбити на декілька шляхів вимірювання за рахунок додаткових вузлів вимірювання між кінцевими точками.
 6. У випадку невпевненості, що напрям руху буде однаковий, необхідно обрати кілька точок на шляху вимірювання так, щоб напрям руху води між двома точками був однаковим.
 7. Перевірка можливості забезпечення коливань подачі води в реальній водопровідній мережі показали, що встановлені типи насосів дозволяють це зробити.